

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ESTRUTURA NA
COMPRESSIBILIDADE E NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE UM SOLO LATERÍTICO**

NARAYANA SANIELE MASSOCCO

ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO
CO-ORIENTADOR: VINÍCIUS DE OLIVEIRA KUHN

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-183/23

BRASÍLIA / DF, MARÇO DE 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ESTRUTURA NA
COMPRESSIBILIDADE E NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE UM SOLO LATERÍTICO**

NARAYANA SANIELE MASSOCCO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA.

APROVADA POR:

PROF. MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSC. (UNB)
(ORIENTADOR)

PROF. VINÍCIUS DE OLIVEIRA KUHN, DSC (UFOB)
(CO-ORIENTADOR)

- PROF. JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, DSC (UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

- PROF. SANDRO LEMOS MACHADO, DSC (UFBA)
(EXAMINADOR EXTERNO)

- BRUNA DE CARVALHO FARIA LIMA LOPES, DSC (UST)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 de março de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

MASSOCCO, NARAYANA SANIELE	
Avaliação do efeito da estrutura na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico [Distrito Federal] 2023	
149 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2023)	
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Solos lateríticos	2. Comportamento Hidromecânico
3. Distribuição de tamanho de poros	4. Estrutura
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MASSOCCO, N. S. (2023). Avaliação do efeito da estrutura na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-183/23, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Narayana Saniele Massocco

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação do efeito da estrutura na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico

GRAU / ANO: Doutor / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Narayana Saniele Massocco

Rua Almirante Lamego, nº 748, apt 201, bloco A

CEP: 88015600 - Florianópolis/SC – Brasil

nsaniele@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus,

Agradeço aos meus Pais por sempre acreditarem em mim, muitas vezes mais do que eu mesma.

Agradeço a minha melhor surpresa do doutorado: meu parceiro de vida Michael, compartilhar o cotidiano com você sempre é prazeroso, obrigada por todo suporte e apoio.

Agradeço aos orientadores Manoel Porfírio e Vinícius Kuhn, a criteriosidade de vocês nas revisões e discussões com certeza engrandeceram a tese.

Agradecer ao Saimo, técnico do laboratório de Geotecnia da UnB, por todo suporte dado na realização do equipamento bem como na aquisição de dados a partir do Arduino.

Agradeço ao Sérgio Marques pelas dicas, ajuda e incentivo na consolidação do sistema de aquisição gráfico a partir do LabVIEW.

Aos ensaios realizados no laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic/UFG) meus agradecimentos.

Ao apoio e suporte financeiro do CNPq.

RESUMO

Um dos principais fatores que influenciam o comportamento do solo é a estrutura na qual foi formado. Diante disto, estudos vêm sendo elaborados com o intuito de identificar como a microestrutura afeta o comportamento. No entanto, sabe-se que solos lateríticos possuem aspectos como agregações, cimentações, distribuição de poros aos quais impactam na resposta hidráulica e mecânica. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo verificar a influência desses elementos da estrutura no comportamento hidráulico e mecânico de um solo laterítico metaestável. Por ser um solo com estrutura bimodal, a investigação propôs análises a partir de diferentes amostras que apresentam estruturas distintas: intacta, compactadas (na energia Proctor Normal e Modificada) e reconstituídas (com utilização de agentes dispersantes como água destilada e hexametáfosfato de sódio). Os ensaios hidráulicos e microestruturais, no primeiro momento, possibilitaram compreender como essas diferentes amostras se comportam e como se dispõem estruturalmente. A partir disso foi possível estabelecer uma análise quantitativa, semiquantitativa e qualitativa na distribuição de poros com uso de ensaios MIP (microscopia de intrusão de mercúrio), MEV (microscopia eletrônica de varredura) e de granulometria. Identificaram-se que as amostras na energia Proctor Normal apresentam macroporos evidentes, já a modificada possui apenas microporos, por outro lado as reconstituídas têm redução de agregação bem como efeito do agente dispersante com uso de hexametáfosfato. Essas análises juntamente com os experimentos de adensamento possibilitaram definir o possível estado intrínseco do solo e quantificá-lo em macroporos e microporos. Os ensaios de cisalhamento direto proporcionaram além da análise do comportamento, verificar a disposição das agregações após ruptura a partir da retirada de amostras de uma banda cisalhada sendo estas encaminhadas para ensaios MIP e MEV nas tensões de 70 kPa e 300 kPa. Isto possibilitou verificar mudanças quanto a forma da agregação bem como orientação após o cisalhamento. Concluiu-se, de uma forma geral, que o efeito da compactação na estrutura está associado a observação de dilatância e de valores de intercepto coesivo diferentes de zero. Por outro lado, as amostras intactas tiveram suas fracas cimentações destruídas rapidamente refletindo em comportamento de resistência ao cisalhamento próximo aos das amostras reconstituídas.

PALAVRAS-CHAVE: Solos com dupla porosidade, Comportamento mecânico, Microestrutura, tensão-deformação, dilatância, solo laterítico.

ABSTRACT

One of the main factors that influence the soil behavior is the structure in which a soil was formed. Therefore, studies have been developed in order to identify how the microstructure affects behavior. However, it is known that in lateritic soils aspects such as aggregation, cementation, pore distribution impact the hydraulic and mechanical response. In this sense, this work aims to verify the influence of these structural elements on the hydraulic and mechanical behavior of a metastable lateritic soil. The investigation proposed analyzes based on samples that have different structures: intact, compacted (in Normal and Modified Proctor energy) and reconstituted (with the use of dispersing agents such as distilled water and sodium hexametaphosphate) due to its bimodal structure. The hydraulic and microstructural tests, at first, made it possible to understand how these different samples behave and how they are structurally arranged. From this, it was possible to establish a quantitative, semi-quantitative and qualitative analysis of the pore distribution using MIP, SEM and granulometry tests. It was identified that the samples in the Normal Proctor energy have evident macropores, the modified energy has only micropores, and the reconstituted samples have reduced aggregation as well as the effect of the dispersing agent with the use of hexametaphosphate. These analyzes together with the consolidation tests made it possible to define the possible intrinsic state of the soil and quantify it in macropores and micropores. Finally, the direct shear tests provided, in addition to behavior analysis, to verify the arrangement of the aggregations after rupture from the removal of samples from a sheared band, which were sent to MIP and SEM tests at tensions of 70 kPa and 300 kPa. This made it possible to verify changes in the form of aggregation as well as orientation after shearing. It was concluded, in general, that the effect of compaction on the structure is associated with the observation of dilation and non-zero cohesive intercept values. On the other hand, the intact samples had their weak cementations quickly destroyed, reflecting in shear behavior close to those of the reconstituted samples.

KEYWORDS: Double porosity soils, Hydromechanical behavior, Microstructure, stress-strain, dilatation, lateritic soil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÕES	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ESCOPO DO TRABALHO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	SOLO TROPICAL: FORMAÇÃO E MINERALOGIA	6
2.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO SOLO TROPICAL	10
2.2.1	ESTRUTURA INDEFORMADA	11
2.2.2	ESTRUTURA COMPACTADA.....	13
2.2.3	ESTRUTURAS RECONSTITUÍDAS	16
2.3	COMPORTAMENTO ESTRUTURAL: COMPRESSIBILIDADE.....	19
2.4	COMPORTAMENTO ESTRUTURAL: TENSÃO DEFORMAÇÃO	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	ÁREA DE ESTUDO: COLETA DE AMOSTRAS	30
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA.....	32
3.2	DEFINIÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	35
3.2.1	ESTABELECIMENTO DAS AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS	43
3.3	EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS.....	47
3.4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
3.4.1	ENSAIOS HIDRÁULICOS	51
3.4.2	ENSAIOS DE COMPRESSÃO OEDOMÉTRICA	52
3.4.3	ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	52
3.4.4	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	53
3.5	VARIABILIDADE DAS AMOSTRAS	56
4	COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E VOLUMÉTRICO DA MICROESTRUTURA DO SOLO LATERÍTICO	60

4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL A PARTIR DE ENSAIOS MEV, MIP E GRANULOMETRIA	60
4.2 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E ESTRUTURA	71
4.2.1 ANÁLISE DA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA A PARTIR DAS CURVAS DE CONTRAÇÃO	74
4.2.2 PERMEABILIDADE E ESTRUTURA	80
4.3 RESUMO.....	81
5 QUANTIFICAÇÃO DA ESTRUTURA BIMODAL NA COMPRESSIBILIDADE A PARTIR DO ACRÉSCIMOS DE TENSÕES	83
5.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO A PARTIR DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS ..	83
5.2 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA: ESTADO INTRÍSECO	87
5.2.1 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA: QUANTIFICAÇÃO	90
5.3 RESUMO.....	94
6 EFEITO DA ESTRUTURA NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO LATERÍTICO	96
6.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS DAS ESTRUTURAS DAS AMOSTRAS.....	97
6.2 EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS APÓS ADENSAMENTO E CISALHAMENTO	98
6.3 CURVAS TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTOS.....	102
6.4 DILATÂNCIA.....	107
6.5 ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA E ESTRUTURA APÓS CISALHAMENTO.....	111
6.6 RESUMO.....	124
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
7.7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
APÊNDICE A – ÍNDICES DE VAZIOS EM RELAÇÃO À UMIDADE: AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS.....	138
APÊNDICE B – SOFTWARE LABVIEW	139

APÊNDICE C – CURVAS DE ADENSAMENTO: RAIZ DO TEMPO X DESLOCAMENTO	
141	
APÊNDICE D – AMOSTRAS CISALHADAS	144
APÊNDICE E – IMAGENS DE MEV DELIMITADAS	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Normas utilizadas para os ensaios de caracterização física	31
Tabela 3.2 - Nível de agregação do solo estudado	33
Tabela 3.3 - Resumo das características composicionais do solo e estudo dos grãos.....	34
Tabela 3.4 - Ensaios de Fluorescência	35
Tabela 3.5 - Dados das amostras constituintes.....	42
Tabela 3.6 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras intactas.....	58
Tabela 3.7 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras compactadas	58
Tabela 3.8 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras reconstituídas.....	59
Tabela 4.1 – Índices de vazios em relação aos ensaios de MIP e MEV	64
Tabela 4.2 – Índices de vazios discretizados, variável microestrutural e agregação relativa ..	70
Tabela 4.3 – Parâmetros de ajustes de Durner (1994) em relação a umidade <i>versus</i> sucção ..	71
Tabela 4.5 – Dados de índices de vazios e deformação volumétrica.....	79
Tabela 5.1 – Parâmetros de compressibilidade do solo em diferentes condições.....	84
Tabela 5.2 – Parâmetros de compressibilidade discretizados	92
Tabela 6.1 – Ângulos de atrito real último.....	109
Tabela D. 1 – Amostras cisalhadas condição: Intacta (N)	144
Tabela D. 2 - Amostras cisalhadas condição: Proctor normal (PN).....	145
Tabela D. 3 - Amostras cisalhadas condição: Proctor Modificado (M).....	146
Tabela D. 4 - Amostras cisalhadas condição: Lama com água destilada (LD).....	146
Tabela D. 5 - Amostras cisalhadas condição: Lama com Hexametáfosfato	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Etapas do desenvolvimento da tese	5
Figura 2.1 – Evolução mineralógica devido ao intemperismo químico no solo de Brasília – DF (Cardoso, 2002).....	7
Figura 2.2 - Perfil de um solo tropical. (a) Teor de minerais em maior proporção por profundidade (b) Índices de vazios conforme profundidade a partir da SWCC (Modificado de Guimarães, 2002).	7
Figura 2.3 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura a) Interagregados (macroporos) b) Intra-agregados (Borges, 2015).	8
Figura 2.4 - Microestrutura do solo natural coletado a 1 m. a) Lupa óptica 1m, x100 b) MEV 1m, x1000 (Burgos, 2016).....	9
Figura 2.5 - Arranjo das partículas elementares (Modificado de Collins, 1985).	11
Figura 2.6 - Arranjo das partículas por combinação (Modificado de Collins, 1985).	12
Figura 2.7 - Estrutura da Argila porosa de Brasília a) Representação dos grãos e modos porosos (Otálvaro, 2013) b) Distribuição do tamanho de poros (Kuhn <i>et al.</i> , 2021).	13
Figura 2.8 - Variação microestrutural de um solo sedimentar compactado em diferentes umidades (a) PSD em diferentes umidades (b) Variação da VME (Modificado de Cheng <i>et al.</i> , 2020).....	14
Figura 2.9 - Distribuição tamanho de poros de um solo do Distrito Federal. (Otálvaro <i>et al.</i> , 2015).....	15
Figura 2.10 - Argila porosa de Brasília em condição de campo (N), compactada (C) e reconstituída (S): (a) Distribuição de poros (b) Densidade de poros (Borges, 2014).	17
Figura 2.11 - Arranjo das partículas por combinação (Modificado de Leroueil e Vaughan, 1990).....	19
Figura 2.12 - Comportamento compressível de amostras lateríticas. (a) Ensaio edométrico (b) Variação de I_v em amostras intactas (IL), compactadas (CL) e reconstituídas (RL). (Modificado de Ng <i>et al.</i> , 2020b).....	20
Figura 2.13 - Curvas de compressão a) Amostra intacta b) Amostra Compactada c) Reconstituída. (Kuhn <i>et al.</i> , 2021).	21
Figura 2.14 - Resultados de ensaios triaxiais isotrópicos. a) Trajetórias de tensões b) Curvas de tensão-deformação de uma argila. c) Curvas de tensão-deformação de uma rocha branda de calcário. (Modificado de Leroueil e Vaughan, 1990).	23

Figura 2.15 - Comportamentos de solos cimentados. (a) Efeito da cimentação prevalece sobre o friccional (b) Efeito friccional prevalece sobre a cimentação. (Modificado de Cuccovillo e Coop, 1999).....	24
Figura 2.16 - Resposta esquemática do modelo para as condições: (a) Cisalhamento (b) Compressibilidade. (Modificado de Mendonza e Farias, 2020).	25
Figura 2.17 - Método de análise de imagens. (a) Detecção da Posição da partícula (b) Diagrama de rosas indicando a orientação (c) Modelo de identificação do comportamento. (Modificado de Hattab e Fleureau, 2010).	25
Figura 3.1 – Etapa 1: processo de definição das estruturas, caracterização e preparação das amostras.....	27
Figura 3.2 – Etapa 2: Construção dos equipamentos de cisalhamento direto	28
Figura 3.3 – Etapa 3: Programa experimental ensaios mecânicos, hidráulicos e microestruturais	29
Figura 3.4 – Localização cartográfica da área de estudo: 15°45'57,6”S e 47°52'22,3”W (a) Local da coleta de amostra (b) Amostra do solo laterítico.....	30
Figura 3.5 – Preparação para os ensaios (a) Peneiramento úmido (b) Amostra do solo laterítico após peneiramento (c) Amostra indeformada (d) Armazenamento	32
Figura 3.6 - Curvas granulométricas do solo em estudo. *defloc= defloculante	33
Figura 3.7 – Difração de raios X do latossolo sem e com uso de hexametáfosfato	34
Figura 3.8 – Compactação Proctor em diferentes energias da área em análise. (a) Pesquisas em solos próximos da área de estudo (b) Curva de compactação mini	36
Figura 3.9 – Compactação Proctor normal em diferentes umidades de compactação: (a) e x w; (b) e x sucção; (c) Sr x w; (d) Sr x sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w x sucção.	37
Figura 3.10 – Compactação Proctor intermediário em diferentes umidades de compactação da área em análise. (a) e x w; (b) e x sucção; (c) Sr x w; (d) Sr x sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w x sucção.	38
Figura 3.11 – Compactação Proctor modificado em diferentes umidades de compactação. (a) e x w; (b) e x sucção; (c) Sr x w; (d) Sr x sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w x sucção.	39
Figura 3.12 – Compactação Proctor modificado em diferentes umidades de compactação. (a) Amostra indeformada (N); (b) Amostra compactada (PN); (c) Amostra compactada com energia modificada (M); (d) Reconstituída com água destilada (LD); (e) Reconstituída com uso de hexametáfosfato de sódio	41

Figura 3.13 – Curvas de compactação com as energias e pontos de moldagem.....	41
Figura 3.14 – Moldes para compactação semiestática (a) Base cilíndrica (b) molde e prensa (c) Molde quadrado (d) detalhe lateral molde quadrado	43
Figura 3.15 – (a) Granulômetro a laser (b) Amostra para ensaio de granulometria	43
Figura 3.14 – Produção de amostras reconstituídas. (a) Mistura (b) Sedimentação.....	44
Figura 3.15 – Ensaio de Atterberg com água destilada e hexametáfosfato. (a) Limites de liquidez (b) Concentração de hexametáfosfato para 100 gramas de argila porosa a 20,5 % de umidade com água destilada.	45
Figura 3.16 – Peso específico seco com a variação de umidade em diferentes concentrações. (a) Água destilada (b) Concentração de hexametáfosfato (c) Com todas as amostras reconstituídas	46
Figura 3.17 – Granulometria de amostras reconstituídas com uso de água destilada.....	46
Figura 3.18 – Granulometria de amostras reconstituídas com hexametáfosfato.....	47
Figura 3.19 –. Equipamento de cisalhamento direto. a) Vista geral do equipamento de cisalhamento direto, b) detalhado com o sistema de aquisição e c) detalhamento da caixa de cisalhamento.....	48
Figura 3.20 - Sistema de aquisição de dados (a) Sistema montado do Arduino (b) Interface visual por Labview.	49
Figura 3.21 – Módulos do sistema de aquisição Arduino (a) Sensor de temperatura (b) LCD visual (c) Conversor para célula de carga (d) Fonte de alimentação (e) ADS 16bits (f) Arduino utilizado no sistema.....	49
Figura 3.22 – Blocos de função do LabVIEW (a) <i>visa serial port</i> (b) <i>visa read</i> (c) <i>match parttern</i> (d) <i>fract string to number</i> (e) <i>format into string</i> (f) <i>format date to string</i> (g) <i>spreadsheet string to array</i> (h) <i>Array to cluster</i> (i) <i>unbundle</i> (j) <i>bundle</i> (k) <i>property node</i> (l) <i>concatenate string</i> (m) <i>build path</i> (n) <i>TDMS open</i> (o) <i>Array to matrix</i> (p) <i>get date</i> (q) <i>time string</i> (r) <i>waveform charts</i>	50
Figura 3.23 - Gráficos de calibração dos equipamentos que compõe o cisalhamento direto. (a) Gráfico de calibração de transdutores (b) Gráfico calibração célula de carga.....	50
Figura 3.24 – (a) Amostras para curvas de contração (b) Vista das peças do permeâmetro de cima (c) Vista lateral do permeâmetro (d) Desenho esquemático do permeâmetro	52
Figura 3.25 - Posição para extração das amostras. (a) Vista lateral antes do carregamento (b) Após cisalhamento. Para MEV:#1, #3. Para MIP: #2, #4.....	54
Figura 3.26 - Representação para quantificação da estrutura agregada. (Modificado de Bullock e Murphy, 1980).....	54

Figura 3.27 - Ilustração e parâmetros para análise de ensaios MEV. (a) Ilustração esquemática quanto a agregação (b) Parâmetros para qualificar as características dos poros ou agregações. (Modificado de Wang <i>et al.</i> , 2020).	55
Figura 3.28 - Método de análise para a definição de parâmetros a partir dos ensaios MEV. a) Imagens em escala de cinza. b) binarização da imagem c) Seleção das agregações d) Seleção dos poros.	56
Figura 3.29 – Condições das amostras (a) Representação de todas as amostras (b) PN (c) M (d) Intacta (N) (e) LD (f) LH	58
Figura 4.1 - Imagens microestruturais por MEV. a) Amostra indeformada x100 b) Amostra indeformada x1000 c) Amostra indeformada x10000 d) Proctor normal x100 e) Proctor normal x10000 f) Proctor normal x10000 g) Energia Modificada x100 h) Energia Modificada x1000 i) Energia Modificada x10000 j) Lama x100 k) Lama x1000 l) Lama x10000 m) Lama com hexametáfosfato x100 n) LH x1000 o) LH x10000.	61
Figura 4.2 – Relação de poros do solo em estudo por MEV. a) Porosidade b) Índice de vazios estimado	62
Figura 4.3 – Relação de poros do solo em estudo por MIP. a) PSD b) Índice de vazios estimado pelo medido c) Curvas de intrusão de mercúrio nos poros das amostras.....	63
Figura 4.4 – Granulometria com ultrassom e sem ultrassom. (a) Amostra intacta passada na peneira de 2mm a 20% de umidade (b) LD (c) LH (d) PN (e) M.....	65
Figura 4.5 – Gráficos semiquantitativos (a) Área dos agregados (b) Forma dos agregados (c) Área dos poros (d) Forma dos poros	66
Figura 4.6 – Gráficos semiquantitativos da orientação dos agregados a) Intacta b) Reconstituída com água destilada c) Energia proctor normal d) Reconstituída com hexametáfosfato e) Energia modificada f) Frequência relativa <i>versus</i> orientação de todas as estruturas	67
Figura 4.7 – Gráficos semiquantitativos dos poros a) Intacta b) Reconstituída com água destilada c) Energia proctor normal d) Reconstituída com hexametáfosfato e) Energia modificada f) Frequência relativa <i>versus</i> orientação de todas as estruturas	68
Figura 4.8 – A evolução microestrutural para as diferentes estruturas a) Relação entre ξ_m e AR b) Relação entre índice de vazios, ξ_m e AR.....	70
Figura 4.9 – Curvas de retenção característica nas condições N, PN, M, LD e LH.	72
Figura 4.10 – Curvas de índice de água e previsão de PSD para solo. (a) Índices de água (b) Previsão da distribuição de poros.....	73
Figura 4.11 – PSD medidas e previstas. a) N b) LD c) PN d) LH e) M f) D_{macro} previsto <i>versus</i> D_{macro} por MIP	74

Figura 4.12 – Curvas de contração da amostra indeformada (N) a) Índice de vazios <i>versus</i> umidade b) Índice de vazios <i>versus</i> sucção c) Umidade volumétrica d) Grau de Saturação...	75
Figura 4.13 – Curvas de contração da amostra Proctor normal (PN) a) Índice de vazios <i>versus</i> umidade b) Índice de vazios <i>versus</i> sucção c) Umidade volumétrica d) Grau de Saturação...	76
Figura 4.14 – Curvas de contração da amostra com energia modificada (M) a) Índice de vazios <i>versus</i> umidade b) Índice de vazios <i>versus</i> sucção c) Umidade volumétrica d) Grau de Saturação	77
Figura 4.15 – Curvas de contração da amostra reconstituída com água destilada (LD) a) Índice de vazios <i>versus</i> umidade b) Índice de vazios <i>versus</i> sucção c) Umidade volumétrica d) Grau de Saturação	78
Figura 4.16 – Curvas de contração da amostra com energia modificada (M) a) Índice de vazios <i>versus</i> umidade b) Índice de vazios <i>versus</i> sucção c) Umidade volumétrica d) Grau de Saturação	79
Figura 4.17 – Deformação volumétrica <i>versus</i> sucção no processo de secagem.....	80
Figura 4.18 – Permeabilidade saturada para as diferentes amostras. (a) $ksat$ <i>versus</i> V_p (b) $ksat$ <i>versus</i> V_p/V_v	81
Figura 5.1 – Curvas de adensamento raiz do tempo <i>versus</i> deformação axial. a) $\sigma'_v = 20$ kPa b) $\sigma'_v = 100$ kPa c) $\sigma'_v = 600$ kPa d) $\sigma'_v = 1500$ kPa	84
Figura 5.2 – Comportamento compressível através de ensaios edométricos unidimensional. a) N b) LD c) LH d) PN e) M f) Comparativos de todas as curvas de adensamento	85
Figura 5.3 – Variação dos parâmetros de compressibilidade com aumento de tensão aplicada (a) Coeficiente de adensamento (b) Coeficiente de variação volumétrica (c) Permeabilidade (d) coeficiente de compressibilidade	86
Figura 5.4 – Variação da taxa de vazios normalizada para as diferentes condições.....	87
Figura 5.5 – Variação da taxa de vazios normalizada para as diferentes condições.....	89
Figura 5.6 – a) Índices de vazios em relação à ICL b) Tensão <i>versus</i> índice de vazios das amostras reconstituídas	90
Figura 5.7 - Taxa de vazios em relação aos valores intrínsecos da amostra reconstituída LD. (a) Sensibilidade à tensão (b) Valores de $e-e^*$	90
Figura 5.8 - Taxa de vazios em relação aos valores intrínsecos da amostra LH a) Sensibilidade à tensão b) Valores normalizados de Valores de $e-e'$	91
Figura 5.9 - Comportamento compressível através de ensaios edométricos unidimensional. a) N b) PN c) M d) LD	93
Figura 5.10 – Relação da variável microestrutural conforma tensão aplicada.....	94

Figura 6.1 – Identificação dos componentes da estrutura. (a) N (b) PN (c) M (d) LD (e) LH	98
Figura 6.2 – Curvas de adensamento obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto. (a) Amostra N (b) LD (c) PN (d) LH (e) M.....	99
Figura 6.3 – Ensaio MIP antes e após cisalhamento. (a) PN: e_{MIP} x diâmetro de poro (b) PN:PSD (c) M: e_{MIP} x diâmetro de poro (d) M:PSD (e) LD: e_{MIP} x diâmetro de poro (f) LD: PSD (g) LH: e_{MIP} x diâmetro de poro (h) LH: PSD	101
Figura 6.4 – Modelo proposto por Vargas (1973) para amostra N: (a) observada em edômetro; (b) Resistência drenada em cisalhamento direto. (Modificado de Reis, 2004).....	102
Figura 6.5 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal: a) N; b) LD; Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal: c) N ; d) LD;.....	103
Figura 6.6 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal: a) PN; b) M; Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal: c) PN ; d) M	104
Figura 6.7 – Curvas de amostra reconstituída com hexametáfosfato (LH). (a) Tensão cisalhante x deslocamento horizontal (b) Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal	105
Figura 6.8 – Comparação entre as diferentes estruturas: curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal. (a) $\sigma' = 10$ kPa (b) $\sigma' = 30$ kPa (c) $\sigma' = 70$ kPa (d) $\sigma' = 170$ kPa (e) $\sigma' = 300$ kPa	107
Figura 6.9 – Curvas Q/P x deslocamento horizontal (a) N (b) LD (c) LH	108
Figura 6.10 – Curvas Q/P x deslocamento horizontal (a) M (b) PN.....	109
Figura 6.11 – Dilatância x deslocamento horizontal (a) N (b) PN (c) M (d) LD (e) LH.....	110
Figura 6.12 – Ângulos de atrito de pico e último a partir das Curvas Q/P (a) Ângulo de atrito de pico (φ'_m) (b) Ângulo de atrito último (μ°)	111
Figura 6.13 – Envoltória cisalhante amostra intacta (N).....	111
Figura 6.14 – Estrutura intacta (N). (a) x100: $\sigma' = 0$ kPa (b) x1000: $\sigma' = 0$ kPa (c) x1000: $\sigma' = 0$ kPa (d) x100: $\sigma' = 70$ kPa (e) x1000: $\sigma' = 70$ kPa (f) x10000: $\sigma' = 70$ kPa (g) x100: $\sigma' = 300$ kPa (h) x1000: $\sigma' = 300$ kPa (i) x10000: $\sigma' = 300$ kPa.....	112
Figura 6.15 - Gráficos semiquantitativos amostra N (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados.....	113
Figura 6.16 – Orientações quanto aos agregados da amostra N. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa <i>versus</i> orientação	113
Figura 6.17 - Envoltória cisalhante amostra Proctor normal. (a) Envoltória generalizada (b) Envoltória valores de tensões efetivas menores que 400 kPa.	114

Figura 6.18 – Estrutura PN após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$	115
Figura 6.19 – Gráficos semiquantitativos amostra PN (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados.....	115
Figura 6.20 – Orientações quanto aos agregados da amostra PN. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa <i>versus</i> orientação	116
Figura 6.21 – Comportamento cisalhante estrutura com a energia modificada.	116
Figura 6.22 – Estrutura M após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$	117
Figura 6.23 – Gráficos semiquantitativos amostra M (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados.....	118
Figura 6.24 – Orientações quanto aos agregados da amostra M. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa <i>versus</i> orientação	118
Figura 6.25 – Envoltórias de cisalhamento: tensão de pico	119
Figura 6.26 – Estrutura LD após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$	120
Figura 6.27 – Gráficos semiquantitativos amostra LD (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados.....	120
Figura 6.28 – Orientações quanto aos agregados da amostra LD. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa <i>versus</i> orientação	121
Figura 6.29 – Estrutura LH após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$	121
Figura 6.30 – Evolução microestrutural a partir da ação tensão-deformação	123
Figura A. 1 – Índice de vazios x umidade em diferentes concentrações. (a) Água destilada (b) Concentração de hexametáfosfato (c) Com todas as amostras reconstituídas.	138
Figura B. 1 – Interface visual desenvolvida a partir do <i>software</i> Labview.....	139
Figura B. 2 – Código desenvolvido a partir do Labview	140
Figura C. 1 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra N.....	141

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACOES

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_L	- Parâmetro de ajuste para SWCC relativo aos macroporos
AR	- Agregaco relativa
a_S	- Parâmetro de ajuste para SWCC relativo aos microporos
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
a_v	- Coeficiente de compressibilidade
b_L	- Parâmetro de ajuste da curva de contração dos macroporos
b_S	- Parâmetro de ajuste da curva de contração dos microporos
c'	- Coesão efetiva
Cc	- ndice de compressão
SACC	- Curva característica solo-ar
SWCC	- Curva característica solo-gua
CP	- Corpo de prova
Cr	- ndice de recompressão
CSL	- Linha de estado crítico (Roscoe, Schofield e Wroth, 1958).
c_v	- Coeficiente de adensamento
D	- Diâmetro do poro
D	- Módulo oedométrico
D0	- Dosagem zero, caulim puro
DRx	- Difracção de raios-X
e	- ndice de vazios
e_1	- Parâmetro de ajuste relativo ao primeiro modo de poro
e_2	- Parâmetro de ajuste relativo ao segundo modo de poro
e_a	- ndice de ar
e^L	- ndice de vazios dos macroporos
e_{Macro}	- ndice de vazios do macroporo (Alonso et al., 1999)
e_{micro}	- ndice de vazios do microporo (Alonso et al., 1999)
e_{MIP}	- ndice de vazios obtido no ensaio MIP
e_{nw}	- ndice não molhante
e^S	- ndice de vazios dos microporos
e_{sat}	- ndice de vazios saturado

ESEM	- Microscopia eletrônica de varredura ambiental
e_w	- Índice de água
e_w^L	- Índice de água dos macroporos
e_w^S	- Índice de água dos microporos
FURNAS	- Furnas Centrais Elétricas S/A
G_s	- Densidade relativa
ICL	- Linha intrínseca de compressão
IP	- Índice de plasticidade: $(w_L - w_P)$
k	- Coeficiente de permeabilidade
K20	- Coeficiente de permeabilidade a 20° de temperatura
LCVI	- Linha de compressão virgem intrínseca do solo
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
MH	- Silte de alta compressibilidade
MIP	- Porosimetria por intrusão de mercúrio
ML	- Silte de baixa compressibilidade
m_v	- Coeficiente de variação volumétrica
N	- Amostra na condição intacta, indeformada
n_1	- Parâmetro de ajuste relativo ao primeiro modo de poro
n_2	- Parâmetro de ajuste relativo ao segundo modo de poro
NCL	- Linha de compressão normal
n_L	- Parâmetro de ajuste para SWCC relativo aos macroporos
n_S	- Parâmetro de ajuste para SWCC relativo aos microporos
p	- Pressão de mercúrio aplicada
p'	- Tensão média efetiva: $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$
pH	- Potencial hidrogeniônico
pH9	- Potencial hidrogeniônico igual a 9
p_L	- Parâmetro de ajuste da curva de contração dos macroporos
p_S	- Parâmetro de ajuste da curva de contração dos microporos
PSD	- Distribuição de tamanho de poros
S	- Sucção
SEM	- Microscopia eletrônica de varredura
SUCS	- Sistema unificado de classificação dos solos

$SHexa$	- Solução de 43 gramas de hexametáfosfato em 100 gramas de água destilada
t_{100}	- Tempo que representa 100% de adensamento
US	- Ultrassom
$u_a - u_w$	- Sucção matricial
UnB	- Universidade de Brasília
w	- Teor de umidade
w_i	- Teor de umidade inicial
w_L	- Limite de liquidez
γ_d	- Peso específico aparente seco
$\epsilon_{molhagem}$	- Deformação volumétrica na molhagem
$\epsilon_{secagem}$	- Deformação volumétrica na secagem
ϵ_{total}	- Deformação volumétrica total
θ	- Teor de umidade volumétrico
θ_{nw}	- Ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro
θ_w	- Ângulo de contato entre o meio poroso e a água
σ	- Tensão normal
σ_{Hg}	- Tensão superficial do mercúrio
σ_n	- Tensão normal
σ_{pa}	- Tensão de pré-adensamento
σ_w	- Tensão superficial da interface ar-água
τ_{ff}	- Tensão cisalhante na ruptura
τ_p	- Tensão cisalhante de pico
τ_{pp}	- Tensão cisalhante pós-pico
v	- Volume específico: $(1+e)$
ϕ'	- Ângulo de atrito
ϕ_0	- Ângulo de atrito inicial

1 INTRODUÇÃO

O solo laterítico é bastante comum em zonas tropicais onde o clima úmido e quente favorece o processo de intemperismo com transformação de argilas filossilicatas 2:1 em 1:1 (Gidigas, 1976; Mitchel e Soga, 2005). No entanto, em regiões do centro-oeste brasileiro, onde as condições de drenagem e pluviosidade são mais evidentes as argilas caulinitas se processam juntamente com a formação dos óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (sesquióxidos). A combinação do pH ácido neste solo (menor que 6) e a baixa capacidade de trocar cátions (CTC) dos sesquióxidos revelam um agrupamento entre os minerais caulíníticos com os outros minerais restantes do processo de intemperismo, formando uma estrutura com agregações (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006 ; Zhang *et al.*, 2022).

Desde Lambe (1958), Lambe e Whitman (1969), Mitchell (1956) e Mitchel e Soga (2005) há um entendimento sobre a importância da estrutura no solo quanto a morfologia, a disposição das partículas, as ligações bem como a distribuição de poros. Os estudos mostram a necessidade de entender a estrutura de solos residuais e assim aplicá-los às pesquisas de infraestrutura e estabilidade de taludes, pois no final, os aspectos microestruturais podem ditar a maior parte do comportamento mecânico e hidráulico (Vargas, 1953; Vargas, 1973; Delage e Lefebvre, 1984; Gens e Alonso, 1992; Mahalinga-Iyer e Williams, 1994; Romero *et al.*, 1999; Otálvaro *et al.*, 2015; Cordão Neto *et al.*, 2018; Tran *et al.*, 2019; Okewale, 2020; Ng *et al.*, 2020a; Ng *et al.*, 2020b; Nunes *et al.*, 2021; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022; Ng *et al.*, 2022; Ng *et al.*, 2023).

Collins (1969) indica diferentes arranjos observados para cada dimensão estrutural nos solos em processo de intemperização. Nos microporos, os minerais de partículas do tamanho silte e areia podem constituir arranjos básicos com contatos limpos ou com a presença de pontes de argila (Li *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020). Do mesmo modo que os minerais de argila podem agrupar de distintas formas: (a) sejam dispersas com orientação aleatória; (b) forma paralela com orientação preferencial (Gao *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021); (c) e constituindo grumos que se vinculam em forma circular (Otálvaro *et al.*, 2016; Ng *et al.*, 2020a; Cai *et al.*, 2020; Kuhn *et al.*, 2021). Estas distintas formas são resultantes do aumento do processo de intemperização, sendo que os sesquióxidos juntamente com minerais neoformados presentes no solo laterítico revelam o nível de intemperização máximo (Vargas, 1973; Gidigas, 1976; Zhang *et al.*, 2022).

Para permitir a análise da estrutura, algumas pesquisas utilizam imagens SEM para identificação qualitativa e semiquantitativa de poros e partículas (Bullock e Murphy 1980; Hattab e Fleureau, 2010; Liu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021). Em contrapartida, uma das maiores dificuldades está em quantificar a estrutura de solos agregados, e entender como se comporta com o processo de compactação e reconstituição. Otálvaro *et al.*, (2015) dizem que o processo convencional em solos lateríticos para produção de amostras reconstituídas proposto por Burland (1990) não é o ideal pois há preservação de agregação sem chegar ao estado intrínseco desejado. Bullock e Murphy (1980) sugere que a quantificação do solo agregado deve ser considerada de maneira distinta de um solo não agregado onde se deve analisar as agregações e os poros constituintes e não as partículas em si já que não conseguem distingui-las.

Assim, o presente trabalho está em verificar a evolução da estrutura quanto a agregação relativa, forma, e inclinação dos poros e agregados em diferentes condições de moldagem de um solo laterítico metaestável. O enfoque é dado a microestrutura em termos de macroporosidade, microporosidade e agregação investigados a partir de ensaios de granulometria, permeabilidade, SEM e MIP. Em primeiro momento é analisado os elementos mineralógicos constituídos. Em segundo momento são definidas estruturas com aspectos que possam ser comparados como: com macroporos, somente microporos, agregações e sem cimentação. Em terceiro momento, é proposto uma forma de analisar as agregações bem como os poros. Por fim, os efeitos da evolução microestrutural são discutidos com objetivo de entender a estrutura deste solo para que as amostras sejam usadas como referência no comportamento hidromecânico.

1.1 MOTIVAÇÕES

Sabe-se que no Brasil, do ponto de vista geográfico, predominam os solos sob domínio tropical, que ocorrem na faixa que se estende desde o extremo norte do estado de Roraima até regiões de São Paulo (Embrapa, 2022). Especificamente no Distrito Federal, os latossolos, encontram-se em regiões urbanas e se estende a regiões rurais, e dessa forma sobre ele encontram-se: rodovias, tubulações, empreendimentos urbanos e taludes rodoviários.

O desempenho destas obras está condicionado a análises de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade do solo. Como são solos que se encontram em regiões superficiais (1 a 6 metros), na grande maioria apresentam-se em condições não saturadas e são muito intemperizados.

Estas condições conferem à estrutura uma elevada quantidade de macroporos, grau de agregações e características colapsíveis. A estrutura deste solo mostra-se diferente de solos pouco intemperizados, o que reflete na escassez de estudos sobre o comportamento hidromecânico do latossolo.

Nesse sentido, um olhar sobre os aspectos microscópicos da fábrica deve ser realizado, pois os solos que compõem taludes rodoviários modificam de comportamento e rompem em virtude de variações de precipitação e aplicações de carga com mudanças na estrutura (Nunes *et al.*, 2021). Os solos podem vir a colapsar por alterações de fluido (Liu *et al.*, 2016), e as compactações rodoviárias sobre este muitas vezes divergem de aspectos relacionados à norma devido as agregações que compõem a fábrica (Guimarães, 2002).

Dessa forma, embora haja um papel significativo da estrutura no comportamento mecânico (Burland 1990; Gasparre e Coop 2008; Haeri *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016; Ng *et al.* 2016; Cordão-Neto *et al.*, 2018; Kühn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022); nas características de curva de retenção (Muñoz-Castelblanco *et al.*, 2012; Otálvaro *et al.*, 2015; Ng *et al.*, 2016; Cai *et al.*, 2020); e de resistência ao cisalhamento voltados à fábrica (Vargas, 1953; Leroueil e Vaughan, 1990; Wen e Yan, 2014; Li *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2019; Ng *et al.*, 2018; Ng *et al.*, 2019; Ng *et al.*, 2020d; Li *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021), ainda existem poucos estudos sobre solos lateríticos com atenção aos aspectos da macroestrutura, microestrutura e disposição das partículas/agregações após uma ação mecânica.

Assim, as motivações para realização desta pesquisa possuem enraizamentos no seguinte questionamento:

1. Como relacionar a estrutura do solo tropical com seu comportamento hidromecânico?

1.2 OBJETIVOS

Diante do que foi exposto (Leroueil e Vaughan, 1990; Burland, 1990; Cuccovillo e Coop 1999; Cordão Neto *et al.*, 2018; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022) esta pesquisa propõe contribuir na análise do comportamento de solos estruturados, a partir da investigação dos elementos da estrutura que afetam a hidromecânica do solo de Brasília-DF. Estes elementos podem ser responsáveis por mudanças no comportamento e podem ser definidos a partir de diferentes amostras.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Produzir e analisar amostras com diferentes estruturas que possibilitem a investigação de particularidades quanto cimentação, agregação, macroporos e microporos;
- Verificar a relação da curva característica de retenção com os elementos das estruturas existentes;
- Avaliar a influência da estrutura na compressibilidade e resistência ao cisalhamento com aspectos voltados à atuação da dilatação e cimentação;
- Avaliar o comportamento estrutural bem como a disposição das agregações e poros após etapas de carregamento;
- Relacionar a estrutura com o comportamento mecânico e hidráulico.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Para chegar aos objetivos deste trabalho, a metodologia geral divide-se em seis etapas: teórica, em campo, laboratorial, experimental, modelagem e análises. O diagrama apresentado na Figura 1.1 representa as etapas desta pesquisa. Assim, este trabalho é dividido em sete capítulos, conforme descrição a seguir:

O capítulo 1 refere-se a introdução da tese tendo em vista os aspectos relevantes do solo tropical de Brasília-DF com relação à estrutura e a influência no comportamento mecânico. Ademais, este capítulo engloba introdução, motivações bem como os objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 mostra uma revisão bibliográfica, primeiramente em nível de formação, mineralogia e microestrutura para as condições de preparo: intacta, compactada e reconstituída. Além disso, esse capítulo apresenta aspectos sobre o comportamento mecânico quanto à compressibilidade e a importância da estrutura na ação tensão deformação.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia desta tese, o qual consiste nas características geotécnicas do solo estudado, a metodologia de preparação de amostras e de avaliação microestrutural, além do desenvolvimento dos equipamentos de cisalhamento direto. Ao final do capítulo realiza-se uma avaliação da variabilidade das amostras produzidas.

O capítulo 4 traz os resultados do comportamento hidráulico das diferentes estruturas bem como as análises quantitativas e semiquantitativas de poros e agregações antes da ação mecânica a partir de ensaios MEV, MIP e SWCC. Também neste capítulo efetua-se uma discussão sobre o efeito da compactação nas agregações, cimentação e a relação volumétrica a partir das curvas de contração e ensaios de permeabilidade.

No capítulo 5 avalia-se a compressibilidade das amostras produzidas a partir de ensaios de adensamento unidimensional, além disso discute-se sobre aspectos intrínsecos do solo a partir dos resultados das amostras reconstituídas e as relacionam com a literatura.

O capítulo 6 apresenta o comportamento tensão *versus* deslocamento das amostras produzidas em relação aos ensaios de cisalhamento direto. A partir destas curvas foi possível analisar a dilatação bem como observar as envoltórias definidas para cada estrutura. Ademais, no item 6.5 as análises realizadas levam em conta a estrutura inicial das amostras e a estrutura após fases de cisalhamento a partir de ensaios MEV e MIP.

O capítulo 7 apresenta as considerações finais desta pesquisa, bem como sugestões para estudos futuros.

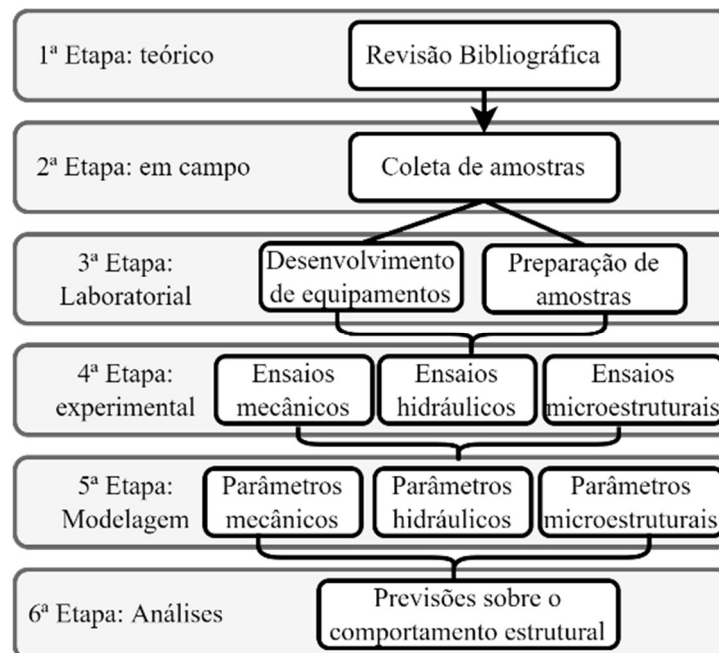


Figura 1.1 – Etapas do desenvolvimento da tese

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento hidromecânico dos solos está ligado a diversos fatores. Para melhor assimilação, inicialmente são pontuados conceitos que serão utilizados na pesquisa. Esta seção apresenta os principais aspectos sobre microestrutura e mineralogia dos solos tropicais e as relações entre o comportamento hidromecânico e a estrutura.

2.1 SOLO TROPICAL: FORMAÇÃO E MINERALOGIA

Entende-se por um solo tropical, aquele que sofreu uma sucessão de alterações, isso significa que períodos entre seca e chuva promovem evaporação e capilaridade, assim favorecem as trocas de íons que associados às variações térmicas modificaram a composição química, mineralogia e a estrutura do solo.

Nesse contexto, encontra-se a argila porosa de Brasília-DF. Este solo apresenta um elevado processo de lixiviação, com elevação de hidróxidos de ferro e alumínio para as camadas superficiais juntamente com o carreamento da sílica para as camadas profundas (Cardoso, 2002; Guimarães, 2002).

A camada superficial constituída por latossolo é formada primordialmente devido às reações de hidrólise que aceleram a decomposição de minerais presentes na rocha de origem, como os silicatos. Quando a reação culmina na remoção de 100% do potássio e 60% de sílica, forma-se a caulinita. No entanto, em condições de alta pluviosidade e drenagem as soluções de alteração permanecem diluídas e toda sílica e potássio são eliminados, formando óxidos e hidróxido de ferro e alumínio, como a Gibbsita, a Goethita e Hematita (Cardoso, 2002; Guimarães, 2002; Farias, 2012; Otálvaro *et al.*, 2016).

Este processo químico evidencia-se com o pH (4-5) dos solos superficiais do Distrito Federal, em sua maioria ácido, promove a retenção de íons H⁺ na partícula do argilomineral, facilitando a solubilização de álcalis e alcalinos terrosos e processando a mineralogia dos solos tropicais a nível evolutivo avançado (Gidigas, 1976).

Farias (2012) definiu que os períodos de seca, umidade baixa, altas temperaturas e pH baixo favorecem a formação de caulinita perante a combinação da sílica e alumina na proporção de 1:1. Por outro lado, os períodos transitórios entre seca e chuvas intensas provocam a precipitação do ferro e, conseqüente formação de depósitos que expostos a ciclos de molhagem

e secagem formam cristais, os quais geram os solos lateríticos. A Figura 2.1 exemplifica o processo de intemperismo deste solo junto com a formação dos minerais.

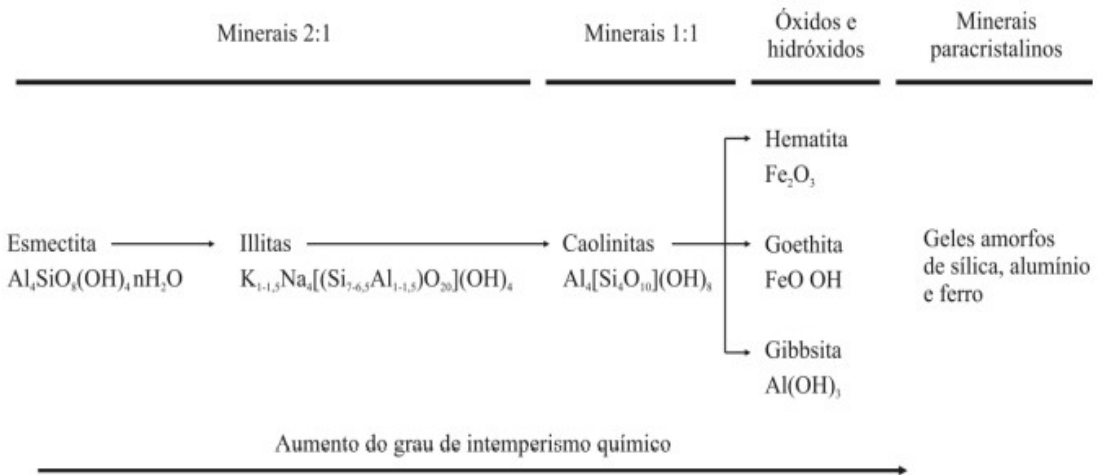


Figura 2.1 – Evolução mineralógica devido ao intemperismo químico no solo de Brasília – DF (Cardoso, 2002)

As modificações mineralógicas são observadas no perfil de solo definido por Guimarães (2002) (Figura 2.2a). Nele se percebe o aumento de Gibbsita nos estratos superficiais por consequência da transformação e diminuição da caulinita. Todo esse processo culmina em solos altamente intemperizados com altas concentrações de óxidos/hidróxidos de alumínio e ferro que remetem na diferenciada formação estrutural.

Segundo Burgos (2016), as camadas superficiais deste solo são caracterizadas pela predominância de 39% de gibbsita, 8,3% de caulinita, 32,5% de quartzo, 7% de hematita, 3,5 % de goethita, 5,9 % de anastásio e 3,8 % de rutilo.

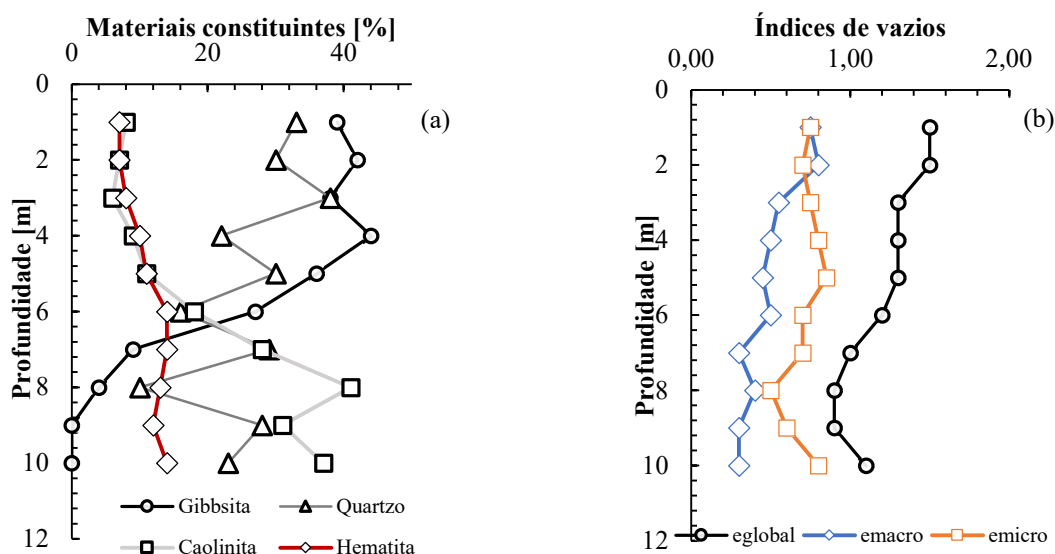


Figura 2.2 - Perfil de um solo tropical. (a) Teor de minerais em maior proporção por profundidade (b) Índices de vazios conforme profundidade a partir da SWCC (Modificado de Guimarães, 2002).

A mineralogia e aspectos externos como microclima promovem um efeito na microestrutura deste solo. Os sesquióxidos e os minerais paracristalinos proporcionam a formação de pacotes aglomerados chamados de agregações. Isto ocorre pois esses óxidos e minerais contêm cargas positivas que englobam as argilas existentes no solo, sendo que as argilas estão envoltas, em sua maior parte, por cargas negativas (Ng *et al.*, 2020c).

No entanto, os processos de lixiviação que ocorreram neste solo proporcionam um carreamento de partículas tornando um solo bastante poroso, com aumento e definição dos poros em macroporos e microporos (Figura 2.2b). A variação térmica e os ciclos de umedecimento e secagem formam cimentações, que funcionam como ligações entre os agregados e as partículas (Cardoso; 2002; Guimarães, 2002).

A argila porosa de Brasília-DF tem uma estrutura definida como bimodal, ou seja, dois tamanhos de poros dominantes (Otálvaro *et al.*, 2016). Apesar de ser constituído por frações de argila e silte, a formação de agregações faz com que em alguns aspectos o solo tenha comportamento semelhante a solos de granulometria mais grossa.

A Figura 2.3 representa imagens de ensaios MEV (microscopia eletrônica de varredura) apresentada por Borges (2015). É possível observar na figura vazios intra-agregados e interagregados. Estes dois níveis de poros definem o aspecto bimodal do solo em termos de micromorfologia.

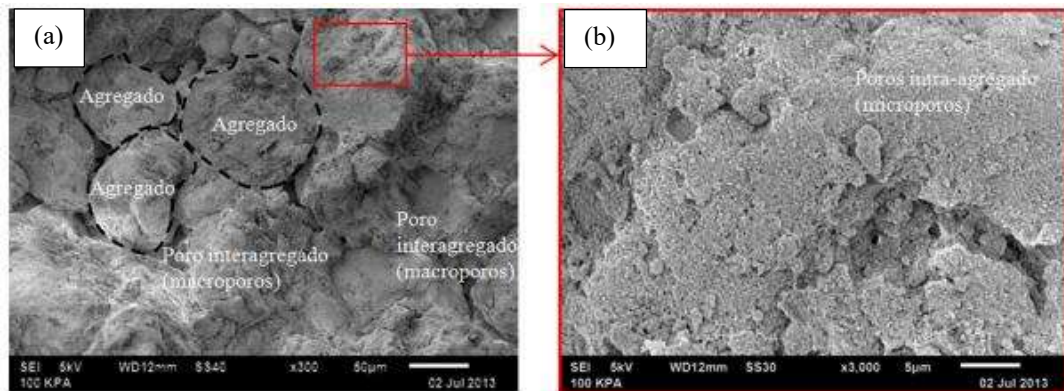


Figura 2.3 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura a) Interagregados (macroporos) b) Intra-agregados (Borges, 2015).

Quanto a classificação dos tamanhos de poros, há várias definições (Romero e Simms, 2008; IUPAC, 2017; Wang *et al.*, 2020; Kuhn *et al.*, 2021). No entanto, Wang *et al.* (2020) definem os microporos como poros com diâmetro menores que $0,03\mu\text{m}$, os mesoporos são os poros intermediários com diâmetro entre $0,03$ e $11\mu\text{m}$ e os macroporos são poros com diâmetro maiores que $11\mu\text{m}$.

A partir desses estudos (Cardoso, 2002; Guimarães, 2002; Otálvaro *et al.*, 2015; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022) possibilitaram conhecer a estrutura deste solo de Brasília-DF. A Figura 2.4(a) corresponde a uma imagem através de lupa óptica do solo de Brasília em estado natural na posição de um metro. Segundo Burgos (2016) a configuração e distribuição dos vazios são variadas, indo de vazios isolados a cadeias de vazios interagregado, alguns agregados e alguns minerais de quartzo visíveis (correspondentes aos círculos), e nos quadrados mostrados na imagem observa-se os vazios isolados, grandes e pequenos, sejam eles interconectados ou interagregado.

Kuhn *et al.*, (2021) observaram que este solo superficial resulta em alto índice de vazios (1,50 a 1,65). Na Figura 2.4(b) é possível verificar a formação granular sem orientação, oriunda da presença de cargas positivas de óxidos e hidróxidos de ferro, principalmente de alumínio. Os agregados são ligados por contatos de pontes de argila (cimentações), que estão associadas aos oxi e hidróxidos de Fe e Al, e por serem partículas extremamente finas estão sob a superfície dos minerais, favorecendo a carga elétrica das superfícies minerais e, conseqüentemente, responsável por certa resistência.

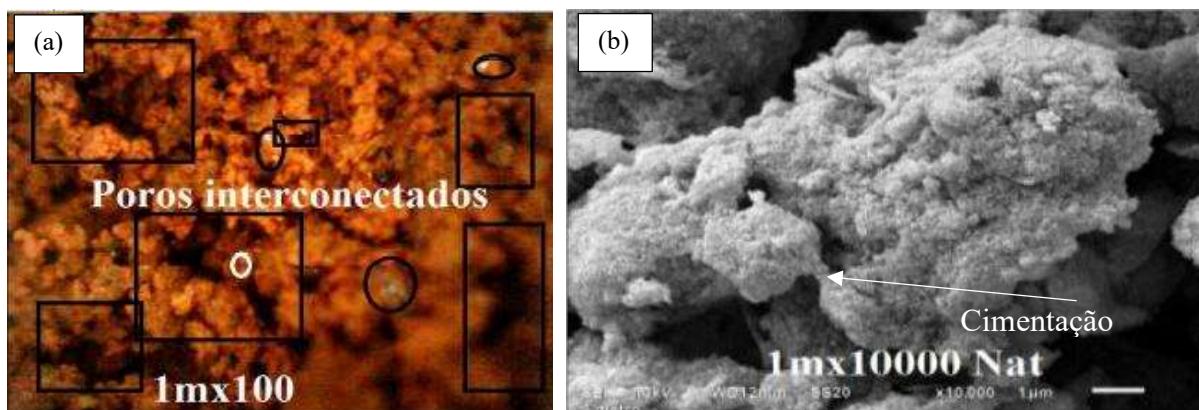


Figura 2.4 - Microestrutura do solo natural coletado a 1 m. (a) Lupa óptica 1m, x100 (b) MEV 1m, x10000 (Burgos, 2016).

Todos esses aspectos como a estrutura formada, a constituição química e mineralógica são os principais fatores que conduzem esse solo a comportarem de modo peculiar em relação aos demais. A forma agregada sob a qual a maioria dos solos tropicais intemperizados se apresenta, dificulta que se estabeleça uma relação mais direta entre granulometria e a mineralogia, ou seja, as micro e macro agregações com diâmetro superiores a $2\mu\text{m}$ são normalmente constituídas de minerais e/ou argilominerais cimentados por óxidos/hidróxidos ou por pontes de argila, e não por um único mineral.

O aspecto agregado dos solos tropicais mais intemperizados, requer que considere a estrutura destes solos de modo diferenciado do adotado para solos de região temperada. Faz-se quase sempre necessário considerar duas porções, a dos macroporos e microporos, tendo em vista que eles se encontram separados atuando de modo distinto no comportamento hidromecânico (Cordão Neto *et al.*, 2018; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022).

Além desses aspectos, esses solos encontram-se na maioria das vezes na condição não saturada, que juntamente com as condições climáticas, mineralógicas acabam favorecendo a formação de estruturas metaestáveis. Isto é, indicam na sua forma indeformada natural uma propensão a se desestabilizar bruscamente devido as tensões induzidas, a vibração ou mudança da química do fluido (Camapum de Carvalho *et al.*, 2020). Esses fatores mostram a complexidade e a necessidade de analisar a dinâmica microestrutural sob o ponto de vista hidromecânico e com a inclusão de aspectos da mecânica dos solos não saturados.

2.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO SOLO TROPICAL

Pode-se dizer que o termo estrutura e fábrica podem ser encontrados em diversas pesquisas (Lambe e Whitman, 1969; Delage e Lefebvre, 1984; Mitchel e Soga, 2005; Otálvaro *et al.*, 2015; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022). No geral, o termo fábrica refere-se ao arranjo de partículas, grupos de partículas e os espaços nos poros, ao mesmo tempo que a estrutura é o resultado dos efeitos combinados das forças atuantes entre as partículas e a fábrica.

Assim como em Borges (2014), o termo estrutura e fábrica será utilizado para todos os casos. Além disso, elementos de volume elementar representativo (*REV*) são empregados para representar a dinâmica da estrutura, pois estes (*REV*) correspondem ao volume mínimo de um material sobre o qual um dado parâmetro se torna independente (Duan *et al.*, 2018; Ng *et al.*, 2019).

De acordo com alguns autores (Mitchel, 1956; Leroueil e Vaughan, 1990; Burland, 1990), os aspectos mineralógicos e seus componentes químicos são difíceis de serem modificados pois são intrínsecos do material. Por outro lado, a estrutura intacta que é formada a partir de diversos processos ambientais existentes pode ser modificada mais facilmente.

As pesquisas semelhantes às desenvolvidas por Burland (1990) e Leroueil e Vaughan, (1990) verificaram que as propriedades intrínsecas provêm de uma estrutura de referência, enquanto estruturas impostas por diferentes fatores (densidade, histórico de tensões, formação etc.) podem afetar o comportamento do solo. Dessa maneira, os itens a seguir detalham aspectos

estruturais em diferentes condições que podem ser relacionados com dependências físicas de arranjo.

2.2.1 ESTRUTURA INDEFORMADA

A estrutura do solo natural, também conhecida como indeformada ou intacta, é aquela que possui as mesmas características, sem amolgamento de onde foi retirada. Nesta pesquisa é dado ênfase ao solo tropical bastante intemperizado encontrado nas camadas superficiais.

Collins (1985) indica diferentes arranjos observados para cada dimensão estrutural nos solos em processo de intemperização. Nos microporos, os minerais de partículas do tamanho silte e areia podem constituir arranjos básicos com contatos limpos ou com a presença de pontes de argila (Figura 2.5). Do mesmo modo que os minerais de argila podem se agrupar de distintas formas entre:

- Forma dispersa com orientação aleatória;
- Forma paralela com orientação preferencial;
- Constituindo grumos que se vinculam em forma circular.

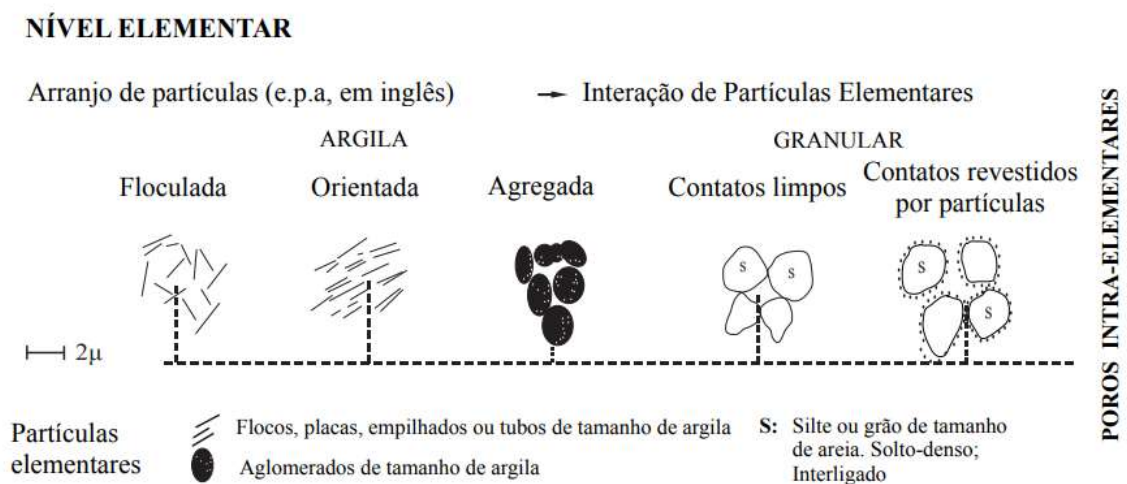


Figura 2.5 - Arranjo das partículas elementares (Modificado de Collins, 1985).

Com relação ao arranjo da macroestrutura (maiores que 10 μm), é possível segundo Collins (1985) distinguir três formas básicas (Figura 2.6):

- Arranjo tipo matriz: O arranjo elementar se faz extensivo a toda a massa de solo, formando uma matriz homogênea;

- Arranjo tipo agregação: Os arranjos elementares se agrupam em pacotes que formam um esqueleto de estrutura discreta;
- Arranjo tipo conexão: Os arranjos elementares de argilominerais atuam como pontes materializando ligações entre grãos de maior tamanho.

NÍVEL DE ARRANJO

Conjuntos de partículas individuais formados por combinações de arranjos de Partículas Elementares (e.p.a, e, inglês)

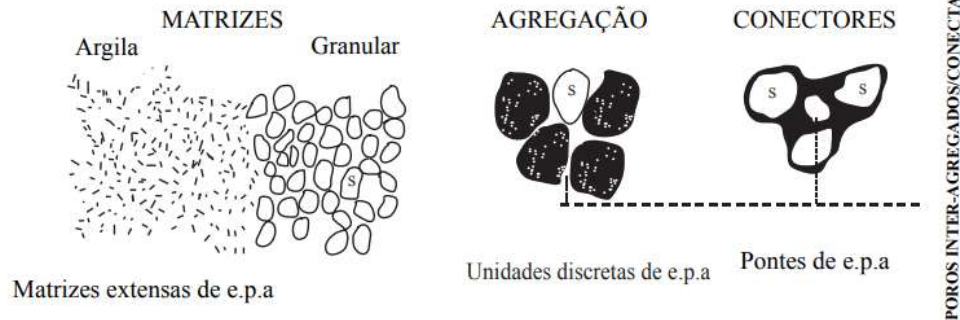


Figura 2.6 - Arranjo das partículas por combinação (Modificado de Collins, 1985).

Para o solo tropical altamente intemperizado de Brasília, sabe-se que a parte macroestrutural é composta por partículas de composição variada, formadas por grumos, e alguns elementos de quartzo presentes gerando a rede de macroporos que são ligadas por cimentação. Porém, os microporos são compostos por matrizes de partículas de tamanho silte e argila, e estão em sua maior parte formando as agregações (Figura 2.7a).

A Figura 2.7b corresponde a distribuição de poros do solo natural superficial de Brasília. Verifica-se a dupla estrutura, com evidência de macroporos com maior densidade em 55 μm de diâmetro e microporos com 0,023 μm . Além disso, é possível perceber que não há um pico de mesoporos, caracterizando assim a bimodalidade.

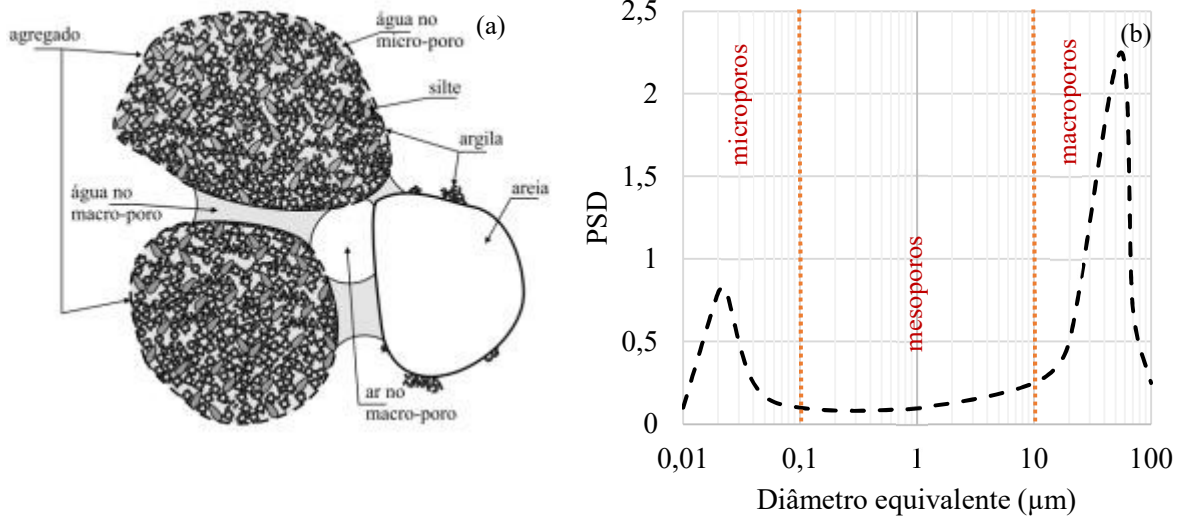


Figura 2.7 - Estrutura da Argila porosa de Brasília (a) Representação dos grãos e modos porosos (Otálvaro, 2013) (b) Distribuição do tamanho de poros (Kuhn *et al.*, 2021).

Quando a estrutura do solo é tal que dois sistemas de poros separados ocorrem concomitantemente, diz-se que a dupla porosidade está presente (Ngiean *et al.*, 2012). O conceito de dupla estrutura, ou dupla porosidade, foi inicialmente introduzido pela indústria do petróleo em estudos de Barenblatt *et al.* (1963) e Warren and Root (1963). Em seguida, algumas pesquisas começaram a utilizar esse termo na área geotécnica com o intuito de explicar as distribuições de micro e macroestrutura com analogia ao comportamento (Delage e Lefebvre, 1984; Gens e Alonso, 1992; Romero *et al.*, 1999).

2.2.2 ESTRUTURA COMPACTADA

A estrutura compactada é aquela que sofre uma readequação a partir do amolgamento do solo, e por uma ação mecânica é em seguida reestruturada. Este procedimento modifica a estrutura em relação à amostra natural, podendo caracterizar uma transformação no comportamento mecânico e hidráulico. O processo de compactação altera o índice de vazios do solo, induzindo a uma estrutura específica que é função do teor de água e da energia adotada (Lopes *et al.*, 2022).

Considerando a energia de Proctor normal ($E=578 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), Lambe (1958) define que a estrutura de um solo argiloso se modifica de floclada e aberta (no ramo seco), para dispersa ou orientada (no ramo úmido) com o aumento de umidade. As hipóteses de Lambe (1958) são elucidadas até os dias de hoje, porém, observações diretas da microestrutura do solo por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e testes de distribuição de poros com MIP

refletem em mudanças significativas nesta interpretação microestrutural inicial (Werk, 2000; Lopes *et al.*, 2022; Kodikara *et al.*, 2018).

Algumas pesquisas observaram que solos argilosos tendem a formar estruturas agregadas que se comportam como partículas maiores, especialmente quando compactado em ramo seco. Logo, foi aceito que a água fica retida dentro de agregações da argila, com água somente nos microporos. Essas ideias foram amplamente confirmadas por estudos subsequentes (Delage *et al.*, 1996; Romero e Simms, 2008; Lee e Zhang, 2009; Monroy *et al.*, 2010).

Alonso *et al.* (2013) definiram a variável microestrutural de estado (VME), ξ_m , que corresponde a relação entre o índice de vazios nos microporos pelo índice de vazios total em um solo. Dessa forma, Cheng *et al.* (2020) descreveram quantitativamente a microestrutura utilizando essa variável (Figura 2.8a). Neste solo, percebe-se que o aumento da VME (Figura 2.8b) corresponde a uma estrutura menos agregada de partículas com o aumento de umidade. De acordo com Delage *et al.* (1996), o aumento da umidade de compactação evidencia o surgimento de microporos consequentemente diminuindo os macroporos devido a redução da agregação.

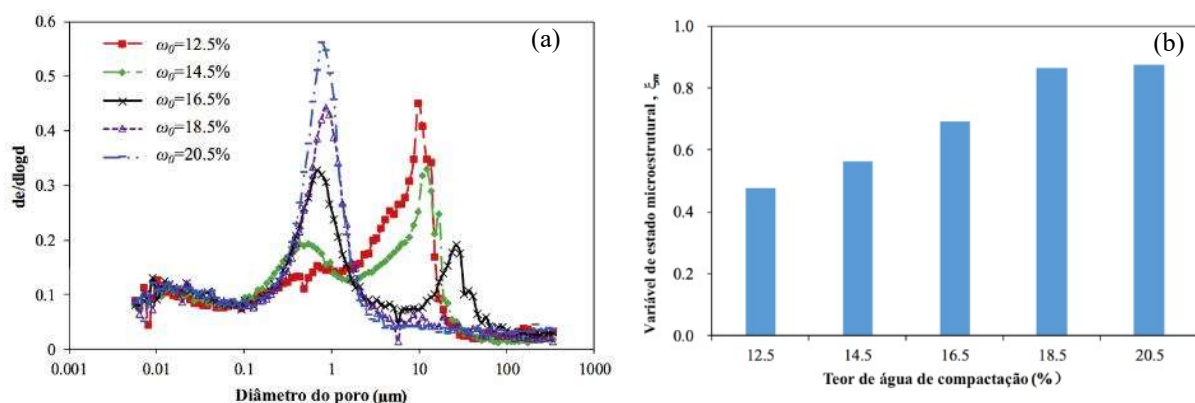


Figura 2.8 - Variação microestrutural de um solo sedimentar compactado em diferentes umidades (a) PSD em diferentes umidades (b) Variação da VME (Modificado de Cheng *et al.*, 2020).

A estrutura de solos finos sedimentares e saprolíticos pode se adaptar a teoria de Lambe (1958) pois nesses solos o nível de anisotropia depende das condições de compactação. Diferentemente, nos solos tropicais muito intemperizados, em que a grande maioria das partículas de argilas se encontram compondo agregados, e acabam por não ocorrer a orientação evidente de partículas, nessa razão, tem-se poros interagregados e intra-agregados (Romero *et al.*, 2011; Otálvaro *et al.* 2015; Lopes *et al.*, 2022).

Com relação às mudanças estruturais nos solos lateríticos, a compactação correlaciona-se com a macro e microestrutura desses solos. O estudo de Ng *et al.* (2020a) mostra que quando

o solo é compactado na energia Proctor Normal no ramo seco há uma redução do tamanho das agregações, tornando a formação agregada com diâmetros menores e mais homogêneos em relação a amostra intacta. Outro fato importante é a quebra de uma proporção das cimentações que correspondem as pontes de argila e os hidróxidos de Fe e Al.

Para argila porosa de Brasília-DF, o estudo Otálvaro *et al.* (2015) mostra a variação da microestrutura na forma compactada em duas energias, Não Proctor (NP-240kN-m/m³) e Proctor Normal (PN-578 kN-m/m³). As Figuras Figura 2.9(a) e (b) correspondem a resultados de ensaios MIP por Otálvaro *et al.* (2015). Fixaram-se valores de umidade (20%, 24% e 28%) e de peso específico seco com o intuito de diminuir as variáveis. Percebe-se a diminuição de macroporos nas amostras PN28 (ramo úmido) em relação a PN20 (ramo seco), aparecendo, no entanto, uma resistência de macroporos e um aumento de microporos pouco significativo. A amostra PN24 (umidade ótima) apresentou uma distribuição unimodal com eliminação dos macroporos e constância dos microporos.

A pouca variação dos microporos com a compactação é explicada por Kuhn *et al.*, (2021) e Lopes *et al.*, (2022), pela resistência desses ao nível de esforço aplicado, o que pode estar associado à própria escala de poros menores que 0,1 μm.

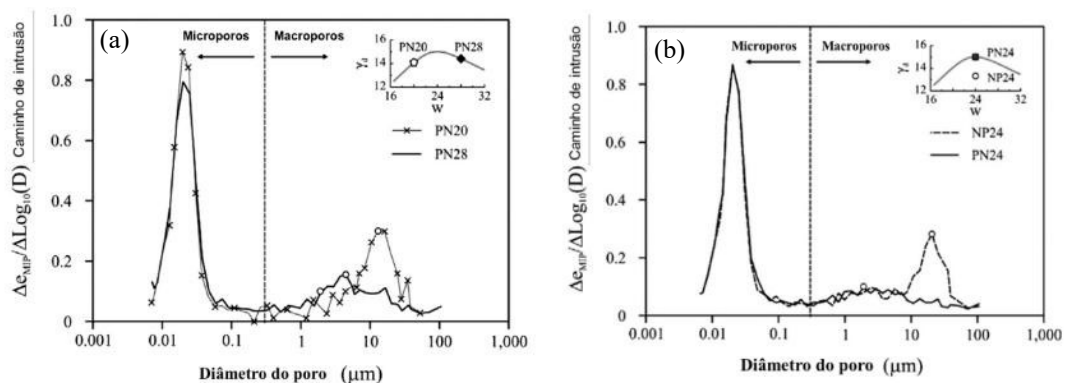


Figura 2.9 - Distribuição tamanho de poros de um solo do Distrito Federal. (Otálvaro *et al.*, 2015).

De uma forma geral, os diferentes estágios de compactação podem resultar em diferentes microestruturas que afetam o comportamento do solo compactado. Em termos do efeito microestrutural com a adição de água, a maior conclusão foi que a estrutura agregada é bem desenvolvida em uma amostra de solo compactada no ramo seco até próximo do ponto ótimo. Para a amostra no ramo úmido as partículas formam uma matriz que envolve os grãos de silte e preenchem os vazios intergranulares. Em termos de densidade seca, uma densidade seca maior pode referir-se à compressão dos poros interagregados, enquanto os poros intra-

agregados quase permanecem inalterados (Yu *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2020; Lopes *et al.*, 2022).

2.2.3 ESTRUTURAS RECONSTITUÍDAS

De acordo com Burland (1990) a essência da amostra reconstituída corresponde ao desprovemento de agregação e eliminação da possibilidade de ligações, cimentações as quais existe na maioria das amostras intactas. Assim, amostras reconstituídas apresentam características de compressibilidade e cisalhamento que podem ser utilizadas como parâmetro de referência, no sentido de que seriam desprovidas de estruturação. Dessa forma, as propriedades das argilas naturais diferem de suas propriedades intrínsecas por sofrerem influência da fábrica do solo.

A amostra intrínseca, que corresponde as propriedades independentes ao solo natural, ou composicionais, segundo Burland (1990) é reproduzida através da amostra natural amolgada, misturada com a quantidade de água com química semelhante a do fluido do poro, que corresponda a umidade entre 1,0 e 1,5 do limite de liquidez. Esta mistura é homogeneizada até alcançar uma consistência de lama, e é então consolidada em uma direção.

A partir desse material é possível realizar uma análise quantitativa do efeito da estrutura. Isso é realizado comparando os resultados das amostras intactas com a Linha de Compressão Virgem da amostra reconstituída. (Amorosi e Rampello, 2007; Hong *et al.*, 2012; Burton *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2016; Cordão-Neto *et al.* 2018; Wu *et al.* 2020; Ng *et al.*, 2020b; Ovando *et al.*, 2020; Prakash *et al.*,2021).

Considerar o solo reconstituído como referência é válido desde que se identifique os elementos perdidos da estrutura original após o processo de moldagem. Cotecchia e Chandler (1997) demonstraram que os solos reconstituídos não são desprovidos de estrutura, e sim, possuem uma estrutura induzida pelo processo de preparação semelhante ao de solos sedimentares. Eles propuseram que as distinções de comportamento entre os solos intactos e reconstituídos devem-se principalmente à natureza, a estabilidade e resistência dessas diferentes estruturas. Entre as argilas reconstituídas, os autores sugeriram que a ligação pode ser de qualquer natureza eletrostática ou eletromagnética sendo estável, enquanto com argilas naturais essas ligações são metaestáveis.

O objetivo do processo de reconstituição tem sido desagregar o solo em suas partículas constituintes, e uma variedade de técnicas deve ser desenvolvida para cada tipo de solo por conta do aspecto único de cada (Fearon e Coop, 2000). Para solos lateríticos, Ng *et al.* (2020b)

e Kuhn *et al.* (2021) utilizaram a técnica de Burland (2000), no entanto os ensaios de MIP detectaram presença de macroporos em amostras de lama e insignificante aumento de microporos não havendo a destruição total da agregação. A alta concentração de sesquióxidos (óxidos de ferro e alumínio) encontrada neste solo foi relacionada a não destruição total dos macroporos, por consequência do poder agregador desses constituintes do solo. Outros estudos como Ng *et al.* (2020b; 2020c) e Ng *et al.* (2019) fazem alusão ao caráter agregador dos hidróxidos e confirmam aspectos dessa hipótese.

Para o solo de Brasília, o qual em suas camadas superficiais apresentam grande quantidade de hidróxidos, Lopes (2016), Cordão-Neto *et al.* (2018); Kuhn *et al.* (2021) fizeram estudos em amostras reconstituídas. A Figura 2.10 corresponde a distribuição do tamanho de poros e a densidade de poros na condição Natural (N), Compactada (C) e reconstituída (S), percebe-se a diminuição dos macroporos, mas não em sua totalidade e preservação da microestrutura.

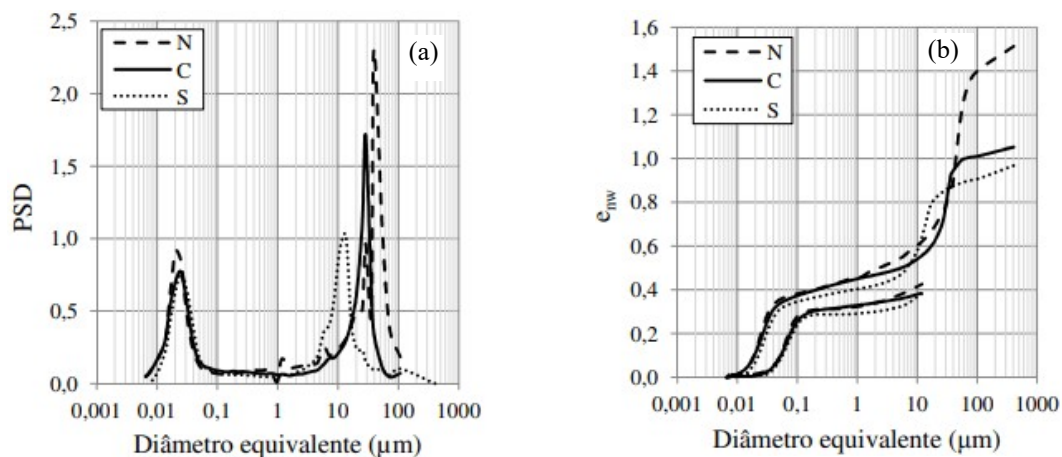


Figura 2.10 - Argila porosa de Brasília em condição de campo (N), compactada (C) e reconstituída (S): (a) Distribuição de poros (b) Densidade de poros (Borges, 2014).

Farias *et al.* (2001) e Cardoso (2002) através de tratamento químico, extraíram oxihidróxidos de ferro de solos lateríticos do Distrito Federal com o intuito de analisar o efeito da desagregação. Este processo ocorreu a partir da mistura de 1 litro de solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (0,3M), 0,175M de citrato de sódio e 0,025M de ácido cítrico em 300 gramas de solo, após a mistura houve a lavagem da substância. Esta técnica resultou em um solo com G_s próximos ao do solo natural, sem apresentar perda substancial de massa, havendo uma redução significativa de agregação, apresentando comportamento e característica de uma amostra reconstituída.

Outras propostas como o de Otálvaro *et al.* (2015) fizeram o uso de hexametáfosfato de sódio em amostras de um solo tropical do Distrito Federal com 65% de agregação no solo. O

estudo resultou na preparação de duas amostras com a intenção de avaliar o efeito da agregação. Produziram-se amostras na condição lama a partir do teor de umidade próximo ao limite de liquidez com dois fluidos diferentes: água sem defloculante e água com defloculante na proporção de 42g/l de hexametáfosfato de sódio.

Os resultados de Otálvaro *et al.* (2015) permitiram concluir que a lama preparada sem defloculante preserva a microestrutura de modo que os resultados se aproximam daqueles de um solo compactado no ramo úmido, o que permite concluir que houve a preservação de parte das agregações. Por outro lado, as curvas de compressibilidade das amostras realizadas com defloculante estavam mais próximas da possível resposta intrínseca do solo, devido ao deslocamento da curva de compressibilidade.

É importante observar que estas conclusões dependem do método de preparação da pasta (Fearon e Coop, 2000; Otálvaro *et al.*, 2015). Mitchell (1976) afirma que o comportamento após remoldagem depende da força das unidades de fábrica pré-existentes e dos esforços aplicados durante a preparação da amostra. Esses esforços podem estar relacionados ao teor de água em que o solo é misturado, pois a energia necessária para remodelar o solo está relacionada à resistência não drenada do solo.

A fim de avaliar a influência da estrutura, amostras reconstituídas e compactas são úteis para que se compare o comportamento com o de um solo intacto correspondente, pois estas diferentes fábricas apresentam constituintes faltantes em relação à amostra natural as quais podem indicar aspectos de resistência e permeabilidade voltados aos elementos da estrutura.

Nesse sentido, estudos surgiram a partir da imposição de diferentes fábricas ao mesmo solo com o intuito de responder como a estrutura afeta à compressibilidade e resistência ao cisalhamento (Burland, 1990; Delage *et al.*, 1996; Koliji *et al.*, 2010; Hong *et al.*, 2012; Wen e Yan, 2014; Burton *et al.*, 2015; Borges, 2014; Gao *et al.*, 2016; Ng *et al.*, 2017; Cordão Neto *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; Ng *et al.*, 2020a, 2020b; Blaker *et al.*, 2020; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022).

Estes estudos evidenciam a necessidade de tratar a estrutura de maneira acoplada com aspectos hidráulicos envolvendo a sucção, no sentido de acelerar a destruição ou não das partículas. Além disso, adicionar os aspectos mecânicos ligados a compressibilidade e resistência ao cisalhamento, os quais serão abordados nos próximos capítulos, são essenciais para o entendimento da evolução da fábrica.

2.3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL: COMPRESSIBILIDADE

De uma maneira geral, a estrutura na condição intacta confere ao material, resistência e rigidez quando este é comparado ao mesmo material no estado reconstituído. Além disso, a estrutura modifica a relação entre tensões efetivas médias e volume de vazios, permitindo o equilíbrio para estados volumétricos difíceis de serem sustentados caso não houvesse a presença de estrutura (Prietto, 2004).

A ação da fábrica foi definida por Vaughan e Leroueil, (1990), e é ilustrada na Figura 2.11 para o comportamento na compressão isotrópica ou unidimensional. O processo de consolidação normal em argilas moles (Figura 2.11a) acontece inicialmente com a deposição natural do solo, favorecendo um aumento da tensão efetiva (σ'_{VI}) com conseqüente diminuição do índice de vazios (e_1) no qual se permanece na linha de compressão normal (α - α). Desse modo, a partir de uma compressão secundária, e se a tensão efetiva permanecer constante, o índice de vazios diminui (e_0) fornecendo um aumento aparente na tensão de pré consolidação de σ'_{VI} até σ'_{VB} .

Por outro lado, as ações causadas ao solo pela tixotropia associada ao rearranjo de partículas, às reações químicas e cimentações provocadas pela deposição de carbonatos, matéria orgânica e sesquióxidos nos contatos das partículas fornecem um crescimento da tensão de pré consolidação que aumentam do ponto B para o ponto P (Figura 2.11a).

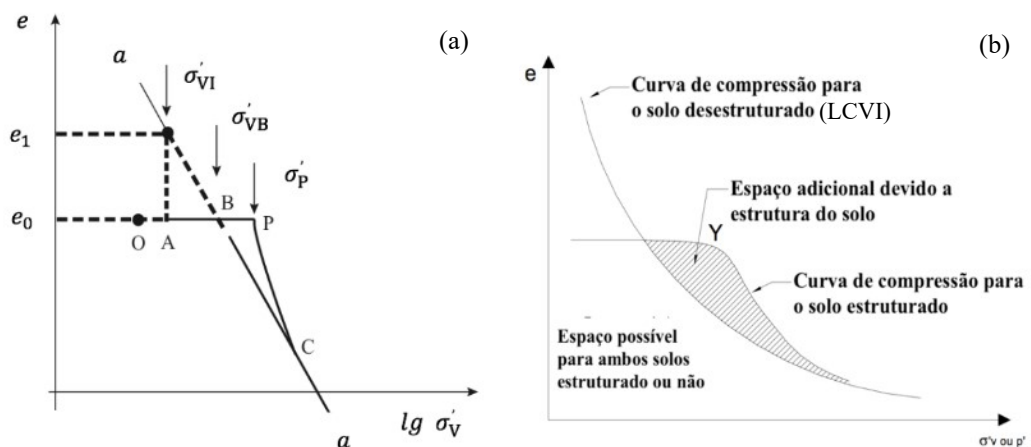


Figura 2.11 - Arranjo das partículas por combinação (Modificado de Leroueil e Vaughan, 1990).

De acordo com o modelo conceitual proposto por Vaughan *et al.*, (1989) apresentado na Figura 2.11b, formam-se duas regiões distintas no espaço tensão-volume de vazios: uma limitada pela linha de compressão virgem intrínseca do solo (LCVI) no seu estado destruído, e outra na qual o solo pode existir devido à existência da estrutura que é a curva

de compressão do solo estruturado.

No espaço permitido a todos os estados estruturais, segundo Vaughan *et al.*, (1989) as deformações são puramente elásticas, independentemente da tensão de plastificação do solo estruturado; quando atinge o ponto de plastificação (ponto Y, na Figura 2.11b), com aumento contínuo das tensões, se inicia a quebra progressiva da estrutura (degradação) com a consequente perda de rigidez e convergindo para o estado desestruturado.

Diante disto, outros modelos foram propostos indicando aspectos sobre a estrutura no comportamento mecânico de diversos solos. As LCVI, por exemplo, permitiram estabelecer critérios para a classificação de solos entre fracamente ou fortemente cimentados, bem como definir novos modelos de parâmetros de resistência do solo em relação à estrutura. (Burland, 1990; Cuccovillo e Coop, 1999; Kavvasdas e Anagnostopoulos, 1998; Nagaraj *et al.*, 2000; Gasparre e Coop, 2008).

Entre as formas de análises, o modelo proposto por Burland (1990) foi baseado em diferentes argilas indeformadas; a partir do cálculo da taxa de vazios normalizada (I_v) definiu-se que quanto mais próximo da linha intrínseca de compressão (ICL) menor é o efeito da estrutura. Os estudos de Ng *et al.* (2020b) utilizaram a proposta de Burland em amostras lateríticas em ensaios edométricos (Figura 2.12a) e verificaram a convergência com a ICL nas amostras compactadas (CL) e reconstituídas (RL) diferentemente das intactas (IL) (Figura 2.12b).

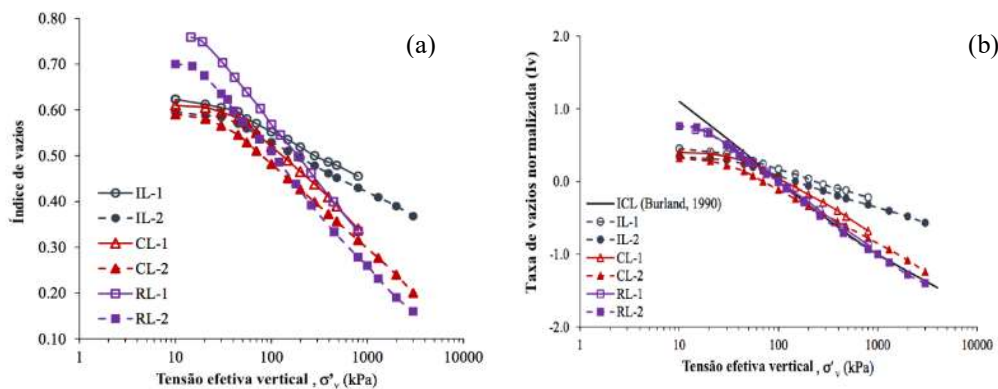


Figura 2.12 - Comportamento compressível de amostras lateríticas. (a) Ensaios edométricos (b) Variação de I_v em amostras intactas (IL), compactadas (CL) e reconstituídas (RL). (Modificado de Ng *et al.*, 2020b).

A não convergência dos resultados das amostras intactas (IL) para a ICL (Figura 2.12b) mostram que a desestruturação não foi iniciada. Os autores basearam essa resposta com a forte presença de agentes cimentantes, tais como hidróxidos de ferro e alumínio. Esse comportamento se contrapõe aos das amostras compactadas e reconstituídas pois essas ligações

foram destruídas devido ao processo de preparação das amostras.

Outros autores relacionam o comportamento compressível dos solos com a distribuição de poros, na maioria verifica-se a relação entre a estrutura e os parâmetros de compressibilidade (Lambe e Whitman, 1969; Delage *et al.*, 1996; Mascarenhas, 2008; Hong *et al.*, 2012; Shipton e Coop, 2012; Liu *et al.*, 2016; Zeng *et al.*, 2017; Ng *et al.*, 2018; Cordão-Neto *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; Ng *et al.*, 2019; Yuan *et al.* 2019; Mu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Blanker *et al.* 2020; Rui *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Praskash *et al.*, 2021; Kuhn *et al.*, 2021).

Nos solos tropicais, devido a existência da dupla porosidade, a compressibilidade pode afetar os macroporos e os microporos da fábrica. Os estudos de Kuhn *et al.*, (2021) possibilitaram traçar uma relação clara com a compressibilidade de um latossolo e a microestrutura a partir da análise separada na distribuição de poros. A discretização observada entre macro e microporos dominantes fez-se concluir que não há variação significativa nos microporos com o aumento de tensão e sucção aplicada.

A Figura 2.13 apresenta carregamentos unidimensionais aplicados na condição: intacta (a), compactada (b) e reconstituída (c) de um solo tropical. Os valores dos índices de compressão dos macroporos ($C_{c\text{macro}}$) e microporos ($C_{c\text{micro}}$) possibilitam verificar uma maior resistência dos microporos em relação aos macroporos na compressibilidade.

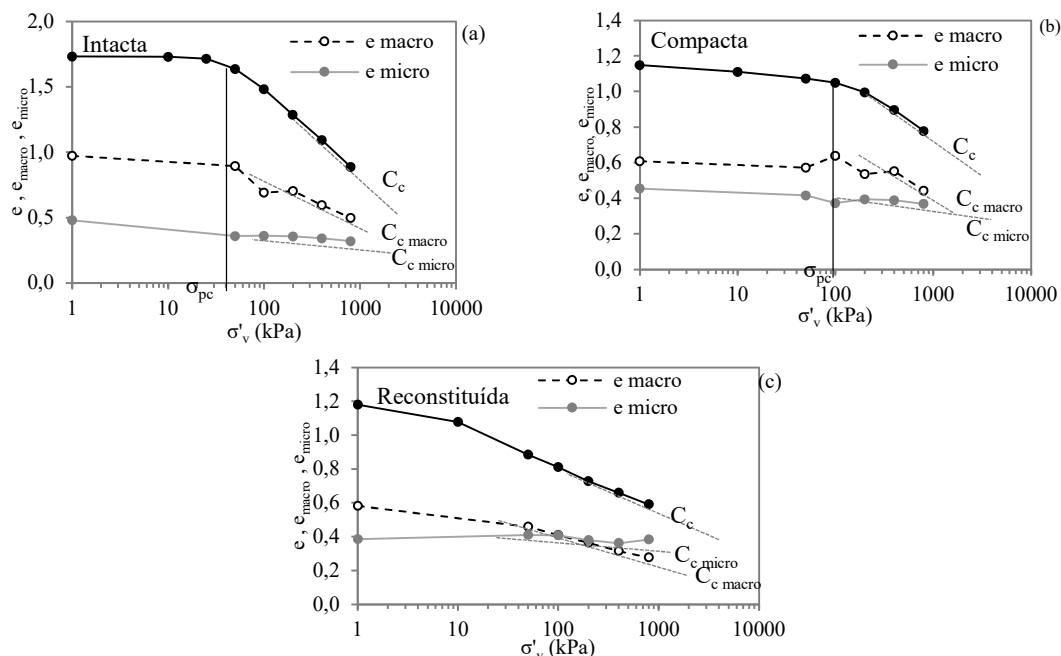


Figura 2.13 - Curvas de compressão (a) amostra intacta (b) amostra Compactada e (c) Reconstituída. (Kuhn *et al.*, 2021).

Os estudos de Kuhn *et al.*, (2021) mostraram que a desestruturação dos macroporos ocorre de forma mais efetiva na amostra intacta e em menor proporção na amostra compactada

devido às ligações sensíveis na condição natural. No entanto, as ligações mais rígidas dos arranjos formados pela amostra compactada são fixadas pelo posicionamento dos grãos e auxílio dos componentes óxidos, por outro lado, apresentando comportamento diferente dos solos lateríticos estudados por Ng *et al.*, (2020b).

2.4 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL: TENSÃO DEFORMAÇÃO

A influência na resistência ao cisalhamento do solo refere-se às ações de movimentação de um plano paralelo. Estas movimentações afetam a estrutura com a modificação da distribuição de poros, arranjo das partículas, formato e quebra das partículas (Burland *et al.*, 1996; Coop *et al.*, 1995; Braida *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Ng *et al.*, 2020a; Ng *et al.*, 2020d; Gao *et al.*, 2016; Gao *et al.* 2019; Gao *et al.*, 2021).

Leroueil e Vaughan, (1990) afirmam que os componentes de resistência e rigidez não podem apenas ser explicados pela porosidade e nível de tensões aplicados, e independentemente da formação do solo, alguns materiais apresentam comportamentos diferenciados da mecânica clássica devido à estrutura presente.

Os solos estudados por Leroueil e Vaughan, (1990) mostraram que a estrutura decorrente de diferentes formações geológicas fornece comportamento semelhante em diferentes materiais, e pode ser descrita usando o conceito de plastificação também utilizado para descrever o efeito da consolidação em argilas moles (Figura 2.11a).

O resultado no comportamento tensão-deformação mostra-se na Figura 2.14 para duas formações: argila (b) e rocha branda de calcário (c). De uma forma geral, o comportamento tensão-deformação de materiais estruturados durante o cisalhamento pode ser descrito como inicialmente rígido, aparentemente linear, até um ponto de plastificação bem definido a partir do qual o solo experimenta deformações plásticas crescentes até a ruptura (Figura 2.14b-c). No entanto, o efeito da estrutura pode ser observado pois ultrapassam a linha de desestruturação ou estado crítico intrínseco (Figura 2.14a).

Assim, segundo Leroueil e Vaughan, (1990), a variação do comportamento tensão-deformação em diferentes tensões confinantes foi estabelecida e dividida em:

- Tensões confinantes baixa (trecho 1): O pico de resistência deve-se a estrutura, a plastificação é abrupta e coincide com a falha de cisalhamento e a formação de superfícies cisalhantes. Os materiais apresentam comportamento frágil e dilatam fortemente após atingir a resistência de pico. Em deformações maiores, os materiais tendem ultrapassar a linha de desestruturação com cisalhamento com volume constante;

- Tensões confinantes intermediárias (trecho 2): A plastificação ocorre quando o pico é definido com valores de tensões cisalhantes constante;
- Tensões confinantes altas (trecho 3): Apresenta-se comportamento rígido até plastificação ser atingida.

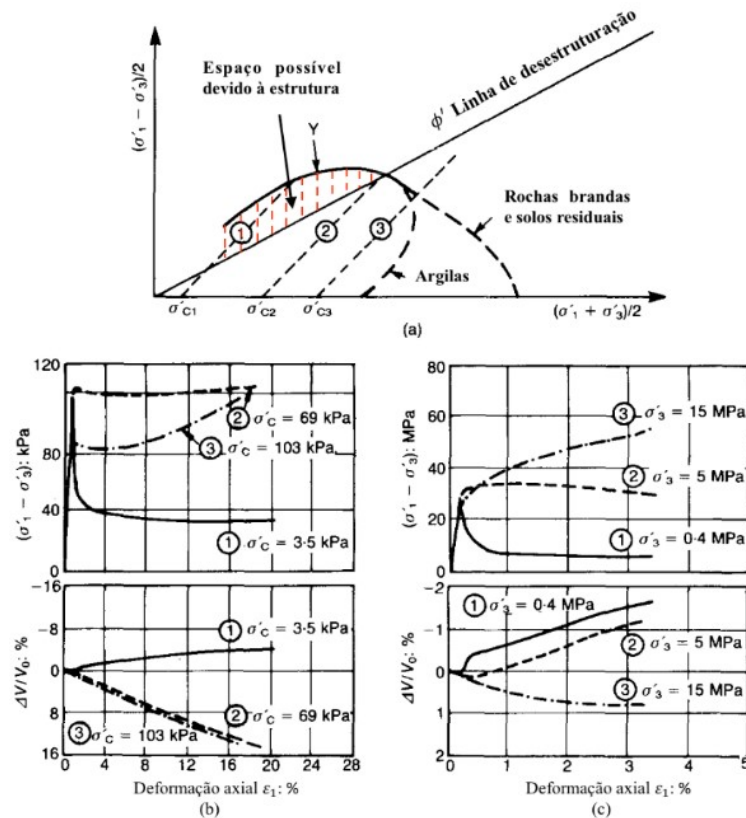


Figura 2.14 - Resultados de ensaios triaxiais isotrópicos. (a) Trajetórias de tensões (b) Curvas de tensão-deformação de uma argila. (c) Curvas de tensão-deformação de uma rocha branda de calcário. (Modificado de Leroueil e Vaughan, 1990).

Essas análises permitiram observar que a resposta tensão-deformação de materiais geotécnicos estruturados depende fundamentalmente do estado inicial do material em relação à curva de plastificação e à linha de estado crítico no estado reconstituído. A partir disso, modelos foram propostos adicionando o efeito da estrutura como cimentação, posicionamento de partículas e formas de poros. (Nova e Lagioia, 1995; Cuccovillo e Coop 1999; Cui e Delage, 1996; Cotecchia e Chandler, 2000; Alonso *et al.*, 2010; Hattab e Fleureau, 2010; Burton *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Musso *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021).

O efeito da cimentação no comportamento do solo foi estabelecido em estudos de Cuccovillo e Coop (1999) que propuseram dois modelos em areias cimentadas: quando há

predominância da cimentação (Figura 2.15a) e quando a componente friccional predomina sobre o efeito da cimentação (Figura 2.15b).

O comportamento do solo quando o efeito da cimentação prevalece (Figura 2.15a) divide-se em três etapas: (1) A resistência de pico ocorre a pequenas deformações, alcançando um estado fora da região que limita o estado de tensões para o solo não cimentado; (2) A estrutura cimentante ainda se encontra intacta antes do início do cisalhamento, a plastificação e consequente desestruturação ocorre durante a fase de cisalhamento da amostra e a resistência de pico é governada pelo comportamento friccional do solo não cimentado; (3) A tensão de confinamento no cisalhamento ultrapassa a tensão isotrópica de plastificação.

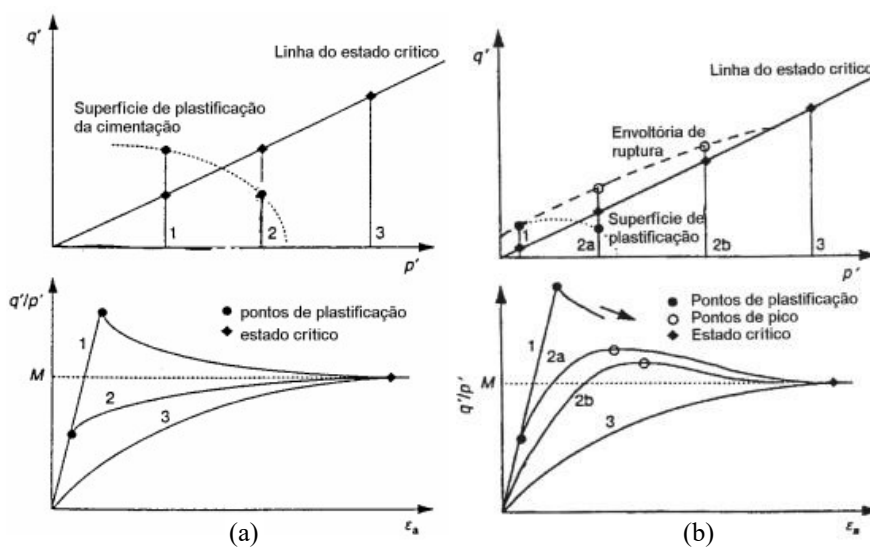


Figura 2.15 - Comportamentos de solos cimentados. (a) Efeito da cimentação prevalece sobre o friccional (b) Efeito friccional prevalece sobre a cimentação. (Modificado de Cuccovillo e Coop, 1999).

Por outro lado, quando as ligações entre as partículas são fracas o suficiente prevalece sobre o comportamento o efeito friccional, que segundo Cuccovillo e Coop (1999) é governado pela dilatância. Dessa forma, esse comportamento divide-se em (Figura 2.15b): (1) O pico de resistência linear ocorre somente em baixas tensões confinantes; (2a) Observa um comportamento linear no trecho inicial da curva tensão-deformação tornando-se não linear com a quebra de cimentação; ou (2b) comportamento não linear em todo trecho; que em ambos os casos (2a e 2b) o pico é governado pela dilatância; (3) Em altas tensões confinantes, ocorre a compressão e quebra de partículas.

Essas pesquisas fomentaram a criação de modelos que incluem parâmetros da estrutura quanto ao comportamento macroscópico mecânico do solo. Para o solo tropical de Brasília, estudos como de Mendonza e Farias (2020) exploraram um modelo baseado em estados críticos

(Figura 2.16) que possibilitaram prever o comportamento. A estrutura pré-adsensada se adaptou ao modelo ao qual indica que o intertravamento das partículas (dilatância) está presente.

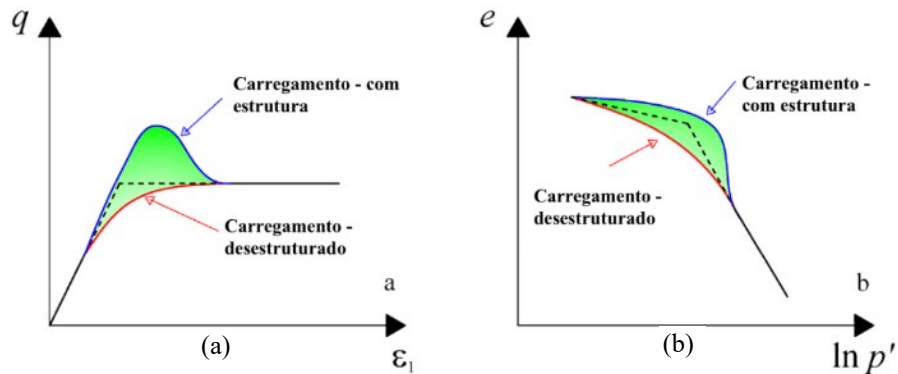


Figura 2.16 - Resposta esquemática do modelo para as condições: (a) Cisalhamento (b) Compressibilidade. (Modificado de Mendonza e Farias, 2020).

O posicionamento das partículas bem como às variações nos tamanhos e formatos de poros são aspectos da estrutura que podem refletir no domínio pseudo-elástico (Hattab e Fleureau, 2010; Li *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019). Estudos como de Hattab e Fleureau, (2010) associaram o mecanismo local de orientação de partículas com a deformação. As imagens em MEV (Figura 2.16) possibilitaram definir as orientações das partículas (b) durante o processo de tensão deformação o qual se relacionou com mecanismos de dilatância e contração (c).

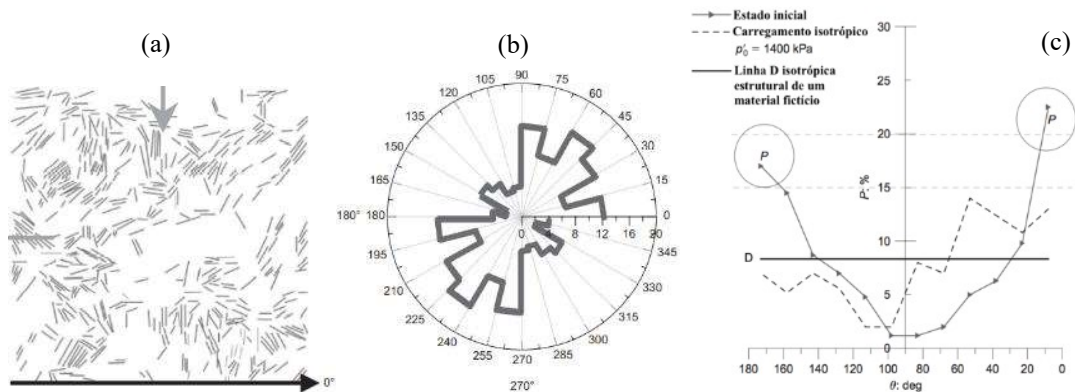


Figura 2.17 - Método de análise de imagens. (a) Detecção da Posição da partícula (b) Diagrama de rosas indicando a orientação (c) Modelo de identificação do comportamento. (Modificado de Hattab e Fleureau, 2010).

O pico “P” definido na Figura 2.17(c) corresponde ao principal modo de orientação. A linha isotrópica “D” (linha contínua), no entanto, corresponde a de um material fictício onde todas as direções são representadas por uma mesma porcentagem. Assim, a forma da curva possibilitou obter modos de orientação das partículas relacionados ao comportamento mecânico que atualmente são associadas a outros tipos de solos, aplicando outros parâmetros como:

sucção, formas/tamanho dos poros e fissuras provocadas durante a ação tensão deformação (Wei *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021).

Estudos experimentais têm explorado a estrutura tanto qualitativamente e quantitativamente após a sollicitação cisalhante. (Blatz *et al.*, 2002; Cui e Delage, 2006; Ma *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Musso *et al.*, 2020; Ng *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2021). Em sua maioria os ensaios de MIP e MEV, são utilizados para investigar a evolução microestrutural em diferentes condições (Wei e Wan, 2013; Ng *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020, Gao *et al.*, 2021). O que mostra que a estrutura deve ser considerada como um parâmetro de estado tão importante quanto o estado de tensão e densidade, sendo um fator de natureza do solo, assim como mineralogia, granulometria e forma das partículas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho divide-se em três etapas: a primeira etapa (Figura 3.1) consiste na definição das estruturas, caracterização e preparação das amostras. Em seguida, se inicia a etapa 2 com o desenvolvimento de dois equipamentos de cisalhamento direto (Figura 3.2), para por fim dar início a etapa 3 que consiste na campanha experimental de caracterização mecânica, hidráulica e microestrutural (Figura 3.3).

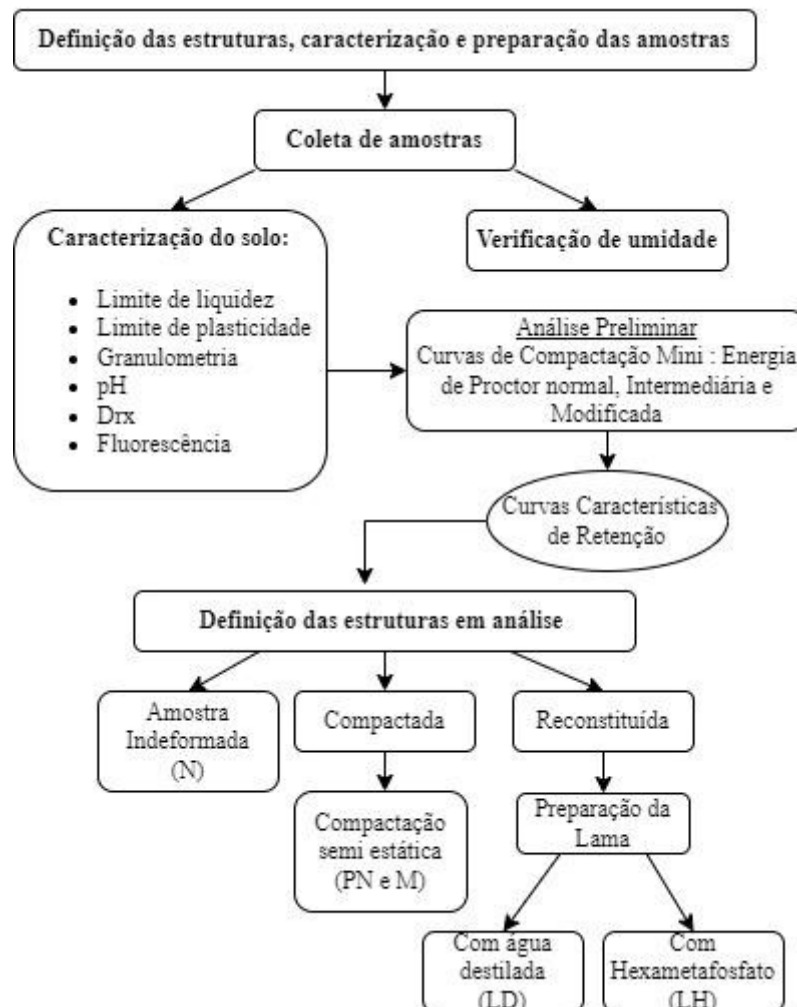


Figura 3.1 – Etapa 1: processo de definição das estruturas, caracterização e preparação das amostras

A etapa 1 é composta inicialmente pela coleta de amostra indeformada e amolgada, e em seguida caracterização física juntamente com verificação de umidade do solo no local da coleta. Após este processo realizou-se uma análise preliminar a partir do levantamento de

curvas de compactação e curvas características de retenção para por fim definir as diferentes amostras desta pesquisa que são mostradas nesta metodologia.

A Figura 3.2 corresponde ao processo de desenvolvimento e adaptação do equipamento de cisalhamento direto desde o torneamento, montagem do sistema de aquisição e calibração dos instrumentos. A Figura 3.3 apresenta a campanha experimental realizada a partir de ensaios hidráulicos (curvas características, curvas de contração e ensaios de permeabilidade), adensamento (oedométrico) e cisalhamento direto. Para finalizar, os ensaios microestruturais são a complementação para verificar o comportamento da estrutura (ensaios MIP e MEV) através das análises semiquantitativas, quantitativas e qualitativas.

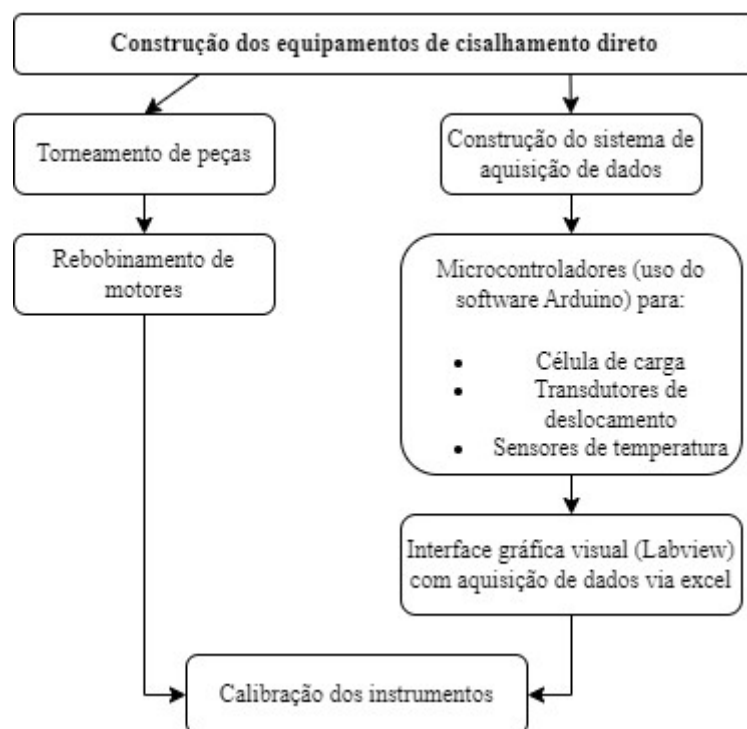


Figura 3.2 – Etapa 2: Construção dos equipamentos de cisalhamento direto

De uma forma geral, as etapas possibilitam entender como os elementos constituintes da estrutura afetam o comportamento mecânico. A proposta está em obter diferentes amostras com diferentes estruturas que podem indicar um rearranjo das agregações, perda de cimentação, atuação da macroporosidade e microporosidade além de correlacionar com aspectos mecânicos.

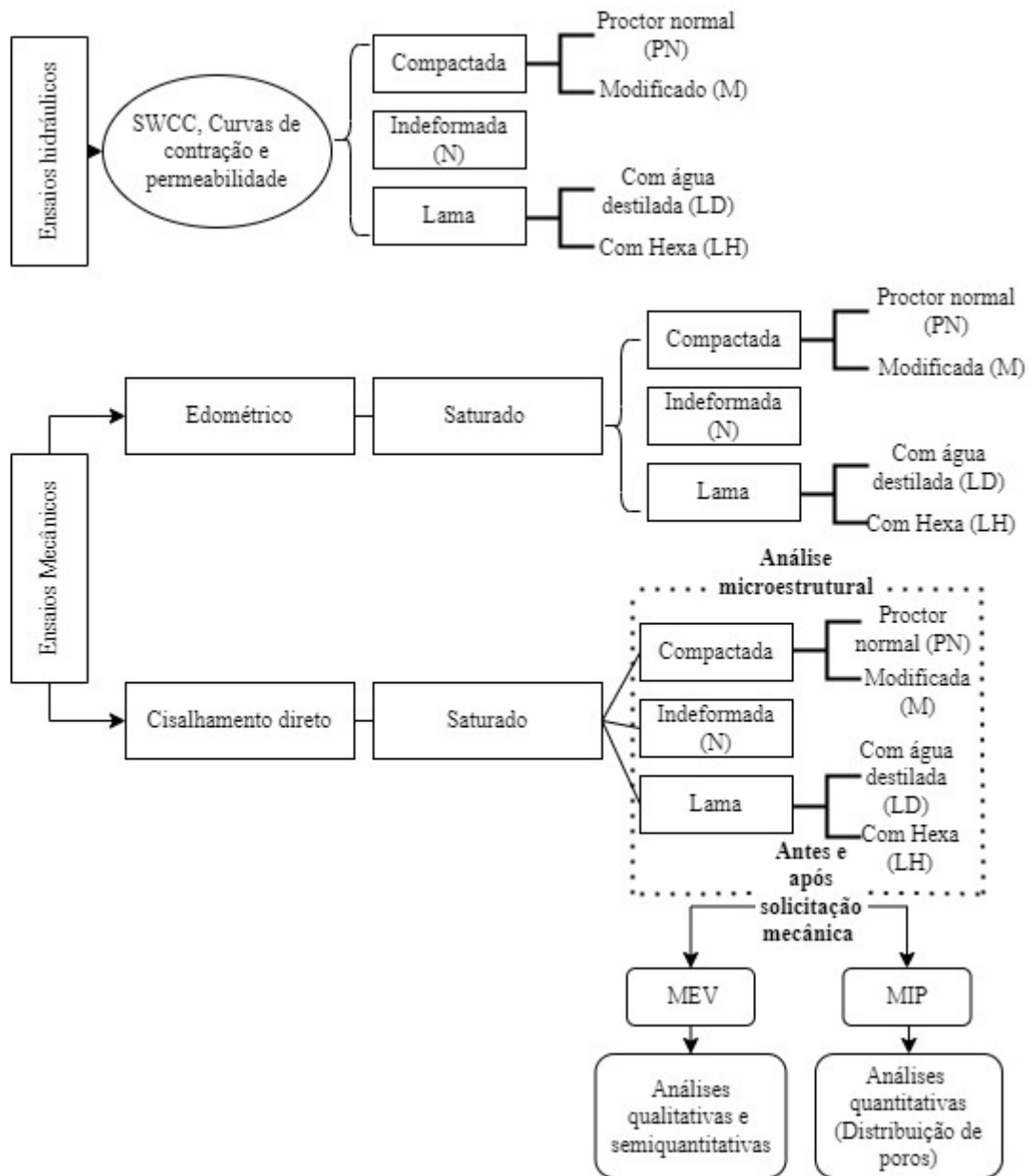


Figura 3.3 – Etapa 3: Programa experimental ensaios mecânicos, hidráulicos e microestruturais

3.1 ÁREA DE ESTUDO: COLETA DE AMOSTRAS

O solo estudado nesta pesquisa é denominado argila porosa de Brasília, e apresenta no horizonte superficial um alto grau de intemperização, indicando ser um solo laterítico (Camapum de Carvalho e Mortari, 1994). Localiza-se no antigo Campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. Coletou-se na profundidade de 1,5 metros (Figura 3.4) e vem sendo estudado há vários anos (Silva, 2009; Borges, 2014; Queiroz, 2015; Burgos 2016; Cordão Neto *et al.*, 2018; Kuhn *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2022).

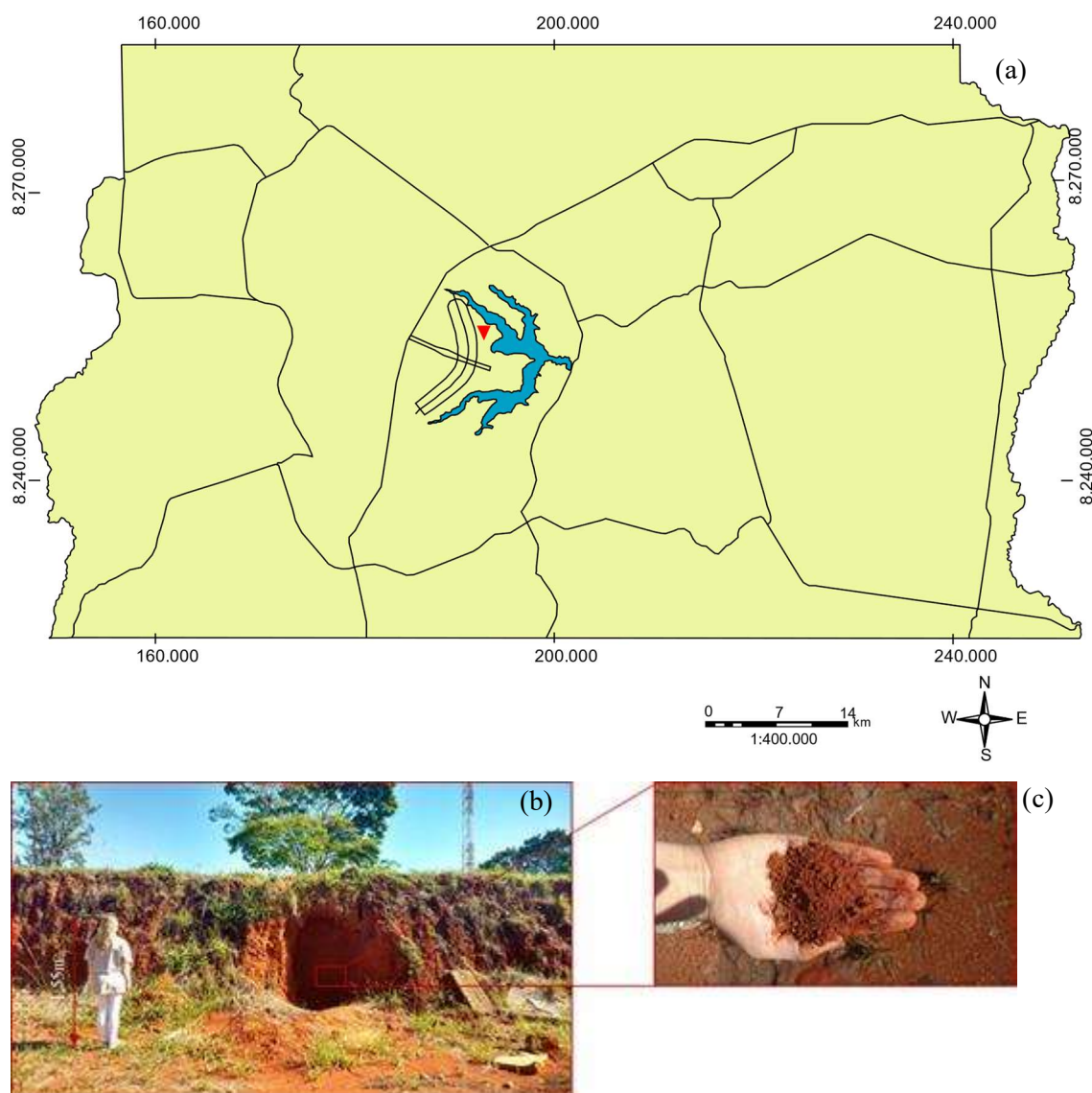


Figura 3.4 – Localização cartográfica da área de estudo: 15°45'57,6''S e 47°52'22,3''W (a) local da coleta de amostra (b) amostra do solo laterítico.

Para este estudo foram coletadas amostras indeformadas e amolgadas. Desta forma, retiraram-se do campo blocos indeformados 30x30x30cm, e amostras amolgadas no mesmo local e na mesma profundidade do bloco. Iniciou-se o estudo com a caracterização física do material e posterior preparação das amostras em diferentes estruturas. Os ensaios de caracterização física determinados neste trabalho apresentam-se na Tabela 3.1 conforme normas estabelecidas.

Tabela 3.1 – Normas utilizadas para os ensaios de caracterização física

Ensaio	Norma/Pesquisa	Formas de preparação
Peso específico real dos grãos	NBR 6458(ABNT, 2018a)	Com secagem prévia ao ar (CSPA), amostra passada na #10
Limite de Liquidez	NBR6459(ABNT, 2018b)	Amostra com secagem prévia ao ar
Limite de Plasticidade	NBR7180(ABNT, 2018c)	Com secagem prévia ao ar
Granulometria	NBR7181(ABNT, 2018c)	Com e sem defloculante, com secagem prévia ao ar
Curvas de Compactação	NBR7182 (ABNT, 2018e) e Compactação Mini (Nogami e Villibor, 2009)	Proctor Normal, Energia Intermediária e Modificada, sem reuso e sem secagem prévia ao ar

A estrutura mineralógica destes solos pode sofrer mudanças e alterações por variações cíclicas de teor de água. Alguns solos que contém haloisita hidratada, por exemplo ao perderem água de sua estrutura cristalina, não conseguem reaver o conteúdo de água novamente (Hernandez, 2016; Li *et al.*, 2016). Dessa forma, o modo de preparo do solo em laboratório realizou-se de maneira que correspondesse às condições reais de implantação, no caso para os solos tropicais a conservação da agregação do solo e umidade natural foram consideradas.

As amostras foram coletadas no período de junho de 2019 e junho de 2021, datas que indicam o fim da época de chuva e início da seca na região. As temperaturas médias de 19°C e precipitações médias de 5 mm segundo o INMET (2019). As umidades do solo no momento da coleta correspondiam a valores de 19-20%. Para que houvesse o mínimo de modificações, as amostras intactas foram condicionadas em câmara úmida. As amostras amolgadas foram passadas em peneiras de 2mm, e não houve secagem prévia nem destorroamento para preservar as agregações e não ocasionar eventual perda de água (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Preparação para os ensaios (a) Peneiramento úmido (b) Amostra do solo laterítico após peneiramento (c) Amostra indeformada (d) Armazenamento

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA

A Figura 3.6 apresenta as curvas granulométricas do latossolo obtidas pelas técnicas de peneiramento e difração de raios a laser, com diferentes processos de desagregação, usando para isso desagregação mecânica (Ultrassom-US) e desagregação química (Hexametáfosfato de sódio). Percebe-se que há variação em relação ao procedimento com defloculante e sem defloculante o que caracteriza solos que possuem agregação.

A quantificação da agregação relativa (AR) foi definida a partir da análise das curvas granulométricas de distribuição acumuladas com defloculante e sem defloculante, por meio da Equação (3.1) conforme Otálvaro *et al.*, (2015).

$$AR = \frac{\sum \%Ret_{semdispers} - \sum \%Ret_{comdispers}}{\sum \%Ret_{comdispers}} \quad (3.1)$$

onde: $\sum_{x_0}^{x_f} \%Ret_{semdispersante}$ é a porcentagem acumulada na curva sem dispersante; $\sum_{x_0}^{x_f} Ret_{comdispersante}$ é a porcentagem acumulada na curva com dispersante; x_f e x_0 corresponde ao diâmetro máximo e mínimo da curva de distribuição acumulada respectivamente. A Tabela 3.2 apresenta a agregação relativa obtida para estes solos em diferentes métodos. Os resultados mostraram que o solo estudado contém 64% de agregação que é semelhante a estrutura agregada próximo aos 65% definida por Otálvaro *et al.* (2015). A diferença de granulometria indica a característica do solo em unir grãos de argila e silte, formando as agregações com tamanhos de partículas de areia. A presença de agregações é um indicativo de uma distribuição de poros bimodal.

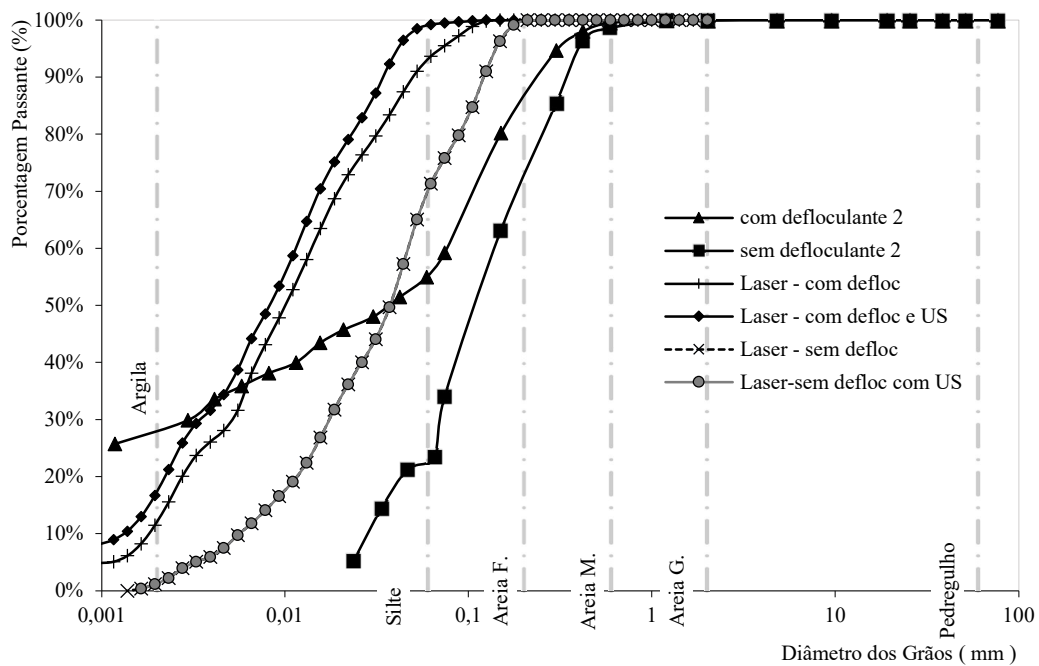


Figura 3.6 - Curvas granulométricas do solo em estudo. *defloc= defloculante

Tabela 3.2 - Nível de agregação do solo estudado

Método	Agregação Relativa (%)
Granulometria Laser sem ultrassom	64%
Granulometria Laser com ultrassom	74%
Granulometria NBR7181 (2018)	64%

Os resultados das características geotécnicas do solo são apresentados na Tabela 3.3. Para os ensaios convencionais de consistência, densidade relativa dos sólidos e pH, foram realizadas pelo menos cinco determinações com o objetivo de identificar a variabilidade. Estas características implicam em um solo classificado como ML no sistema unificado de classificação de solos (USCS), indicação de finos não plásticos (siltes inorgânicos), com baixa

atividade, que pode ser causado pela presença de minerais que apresentam baixa expansão mineralógica.

Por outro lado, nesta mesma tabela mostram-se os resultados das características geotécnicas com o uso do defloculante (hexametáfosfato) na mesma proporção definida pela norma NBR7181 (ABNT, 2018c). Percebe-se que com o uso desta solução o solo se mantém como ML no sistema unificado de classificação dos solos.

Tabela 3.3 - Resumo dos parâmetros geotécnicos do solo e estudo dos grãos

Característica	N	Valor médio	CV (%)
Teor de umidade	5	19,20%	0,5
Limite de liquidez	5	37,00	1,2
Limite de plasticidade	5	28,38	5
Índice de plasticidade	6	9,07	--
Limite de liquidez com hexametáfosfato	1	29,00	--
Limite de plasticidade com hexametáfosfato	1	25,94	--
Índice de plasticidade com hexametáfosfato	1	3,06	--
Densidade relativa dos grãos [Gs]	5	2,74	1,1
pH em água	6	6,00	2,4
pH em KCl	5	5,80	2,4

*CV, coeficiente de variação amostral

A identificação dos minerais existentes pelo método de difração de raios X (DRX) indicaram a presença de: Quartzo, Caulinita, Rutilo, Anastásio, Gibbsita e Hematita (Figura 3.7). O DRX do mesmo solo com adição de defloculante mostrou que os componentes de quartzo, hematita, caulinita e Gibbsita se apresentaram na amostra constatando a não alteração mineralógica.

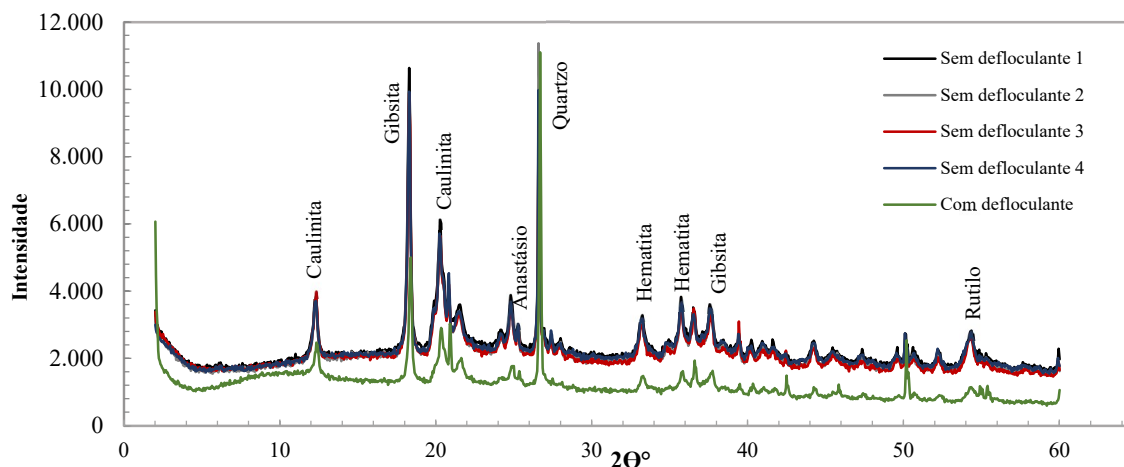


Figura 3.7 – Difração de raios X do latossolo sem e com uso de hexametáfosfato

A composição determinada pelo ensaio de fluorescência de raios X (XRF) sobre uma amostra análoga à utilizada no DRX estão apresentadas na Tabela 3.4. Neste item verifica-se o alto teor de Fe e Al com relação ao Si que fazem ligação aos minerais que são dominantes neste solo. Pode-se considerar que o solo é altamente intemperizado, e tem características lateríticas. Além disso, percebe-se que não houve alteração nos componentes principais com o uso de hexametáfosfato.

Tabela 3.4 - Ensaio de Fluorescência

Com defloculante				Sem defloculante			
Elemento	%	Linha	Int, (cps/ μ A)	Elemento	%	Linha	Int, (cps/ μ A)
Al	38,47%	AlKa	5,56	Al	44,00%	FeKa	203,35
Fe	30,77%	FeKa	356,78	Fe	36,40%	AlKa	2,86
Si	24,37%	SiKa	63,72	Si	13,83%	SiKa	1,91
P	3,19%	PKa	11,78	Ti	4,25%	TiKa	10,28
Ti	2,887%	TiKa	148,68	Zr	0,39%	ZrKa	5,15
Zr	0,274%	ZrKa	109,52	K	0,26%	Kka	0,08
Cr	0,082%	CrKa	0,75	Ca	0,12%	CaKa	0,05
Mn	0,060%	MnKa	0,57	Cr	0,10%	CrKa	0,41
Cu	0,041%	CuKa	0,50	Mn	0,10%	MnKa	0,37
Ga	0,028%	GaKa	0,48	S	0,06%	Ska	0,03

3.2 DEFINIÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após determinação das características físicas e químicas deste solo sucedeu a investigar e definir as condições das amostras. Este processo foi realizado de modo que as amostras apresentem estruturas divergentes, permitindo traçar comparativos devido as alterações estruturais de interesse.

Em um primeiro momento, optou-se por investigar amostras compactadas em diferentes energias (Proctor normal, intermediária e modificada) exploradas por estudos na área definida. A Figura 3.8a corresponde aos resultados de compactação dinâmica tipo Proctor normal (PN-578kN/m²), intermediário (IN-1655kN/m²) e modificado (M-2648kN/m²) encontrados na literatura. Verifica-se uma umidade ótima de 23% para a energia de Proctor normal, 20% para energia intermediária e 19% para modificada. Percebe-se para os valores com umidades menores que a ótima há uma maior dispersão, no entanto conforme há o aumento do conteúdo de água esse fator tende a diminuir resultado da formação de agregação em primeiro momento, e possível rearranjo no segundo momento (Otálvaro *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2022).

Após este processo obteve-se curvas de compactação pelo método proposto por Villibor e Nogami (2009) o qual é conhecido como mini compactação apresentado na Figura 3.8b. As curvas características de retenção do solo (SWCC) para as três energias de Proctor mini (normal, intermediária, modificada) no ramo seco, umidade ótima e ramo úmido, são apresentadas nas Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11.

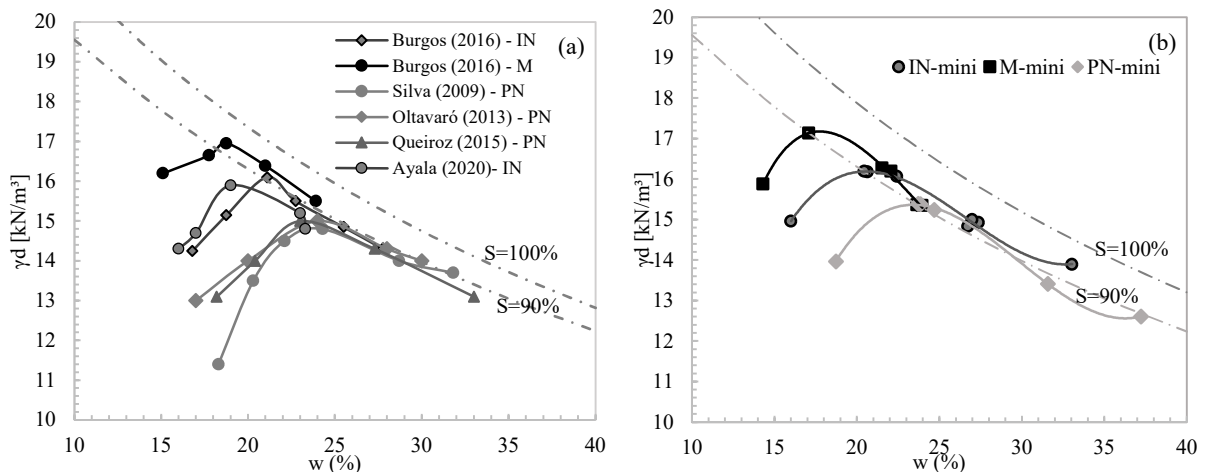


Figura 3.8 – Compactação Proctor em diferentes energias da área em análise. (a) Pesquisas em solos próximos da área de estudo (b) Curva de compactação mini

De uma forma geral, as diferentes energias aplicadas fornecem um entendimento breve sobre a estrutura deste solo laterítico (Marinho e Stuermer, 2000; Lopes *et al.*, 2022; Otálvaro *et al.*, 2015). Percebe-se na compactação Proctor normal (Figura 3.9) que a energia aplicada mostra a pouca variação em relação aos índices de vazios, porém as SWCC indicam caráter bimodal (Figura 3.9d) o que caracteriza solos com distribuição de poros definida com macroporos e microporos. Observa-se para essa energia a presença de macroporos com valores de entrada de ar (VEA_{macro}) próximos de 10 kPa. Por outro lado, para sucções próximas a 1000 kPa percebe-se que as diferentes amostras apresentam comportamento semelhante o que indica que a água está atuando em poros de tamanho/forma semelhante, referente portanto, aos microporos (VEA_{micro}). Estas características podem indicar que a energia não foi suficiente para eliminar os macroporos, e as agregações podem ser ainda evidentes.

As estruturas definidas na energia Proctor Intermediária (Figura 3.10) indicam a diminuição do índice de vazios (Figura 3.10b). Nota-se o aumento da saturação para sucções maiores que 1000 kPa no ramo seco o que pode representar a modificação na distribuição de poros.

Diferentemente das outras energias, as amostras compactadas com energia modificada apresentam uma tendência de aumento do índice de vazios com aumento da quantidade de água

(Figura 3.11a). No entanto, os valores de saturação em relação à sucção permitem assumir que há um comportamento unimodal (Figura 3.11d) cujo macroporos foram eliminados, as agregações podem ter sofrido rearranjo e sendo assim a distribuição de poros passaria a ser unimodal com atuação somente dos microporos.

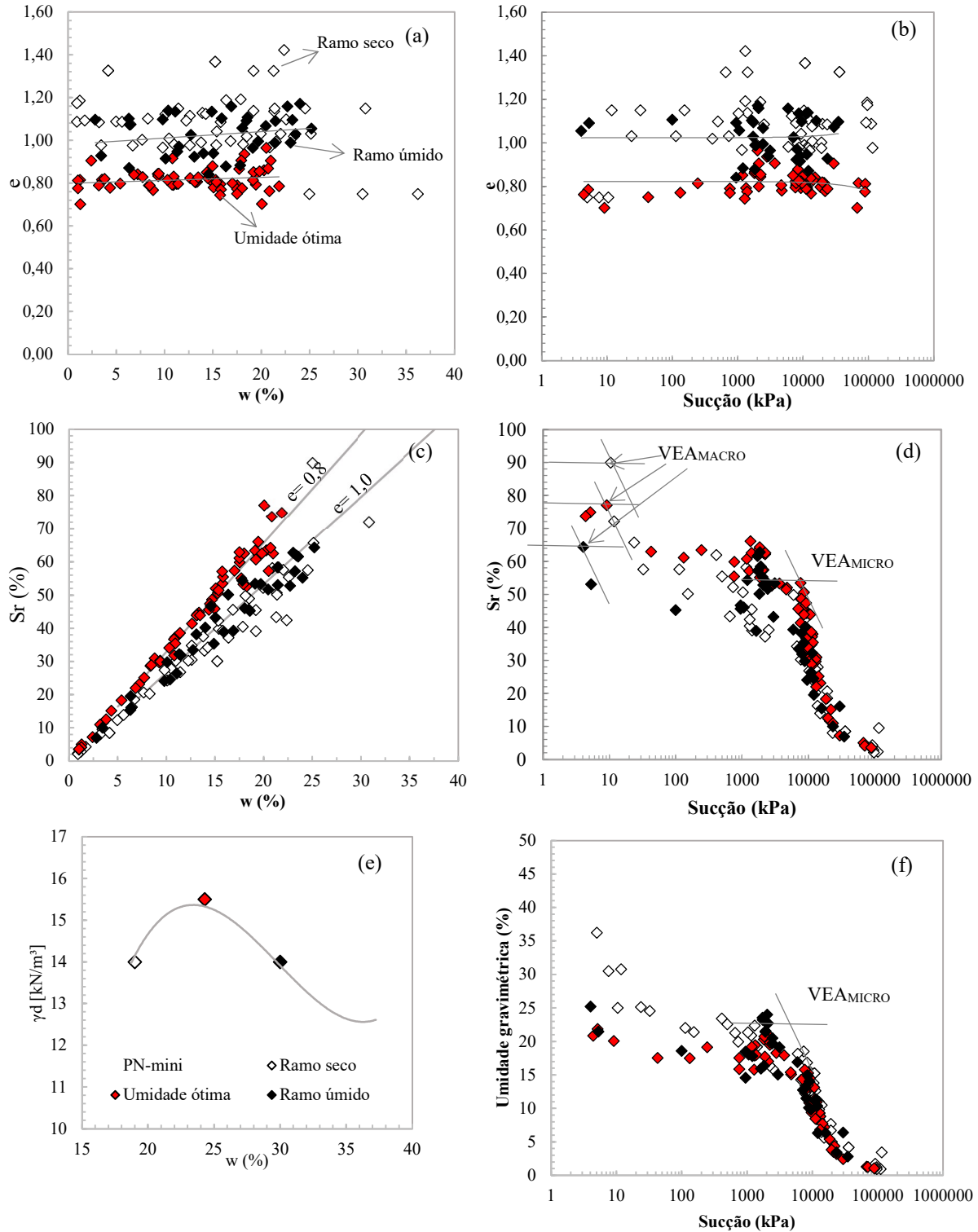


Figura 3.9 – Compactação Proctor normal em diferentes umidades de compactação: (a) e *versus* w ; (b) e *versus* sucção; (c) S_r *versus* w ; (d) S_r *versus* sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w *versus* sucção.

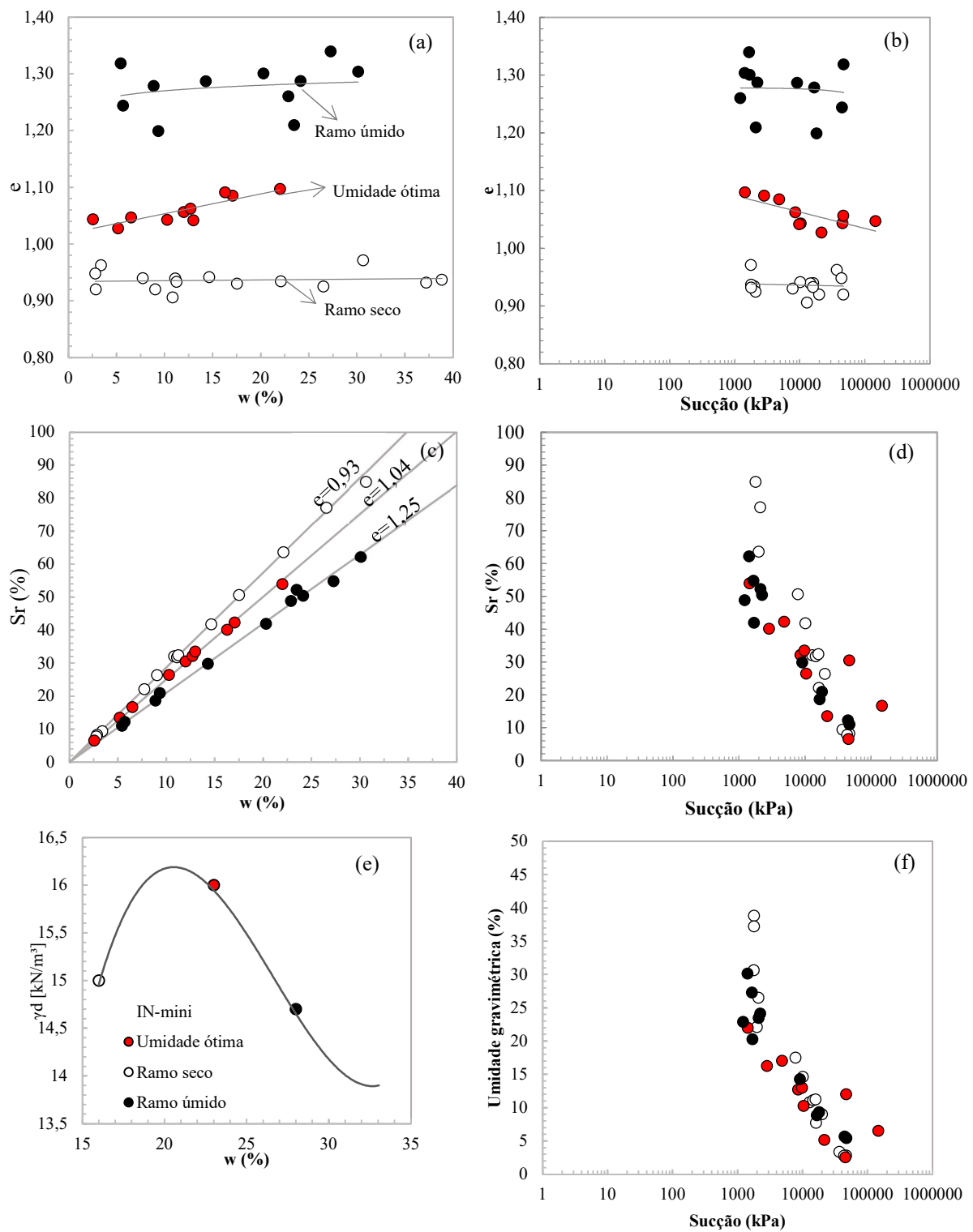


Figura 3.10 – Compactação Proctor intermediário em diferentes umidades de compactação da área em análise. (a) e *versus* w ; (b) e *versus* sucção; (c) S_r *versus* w ; (d) S_r *versus* sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w *versus* sucção.

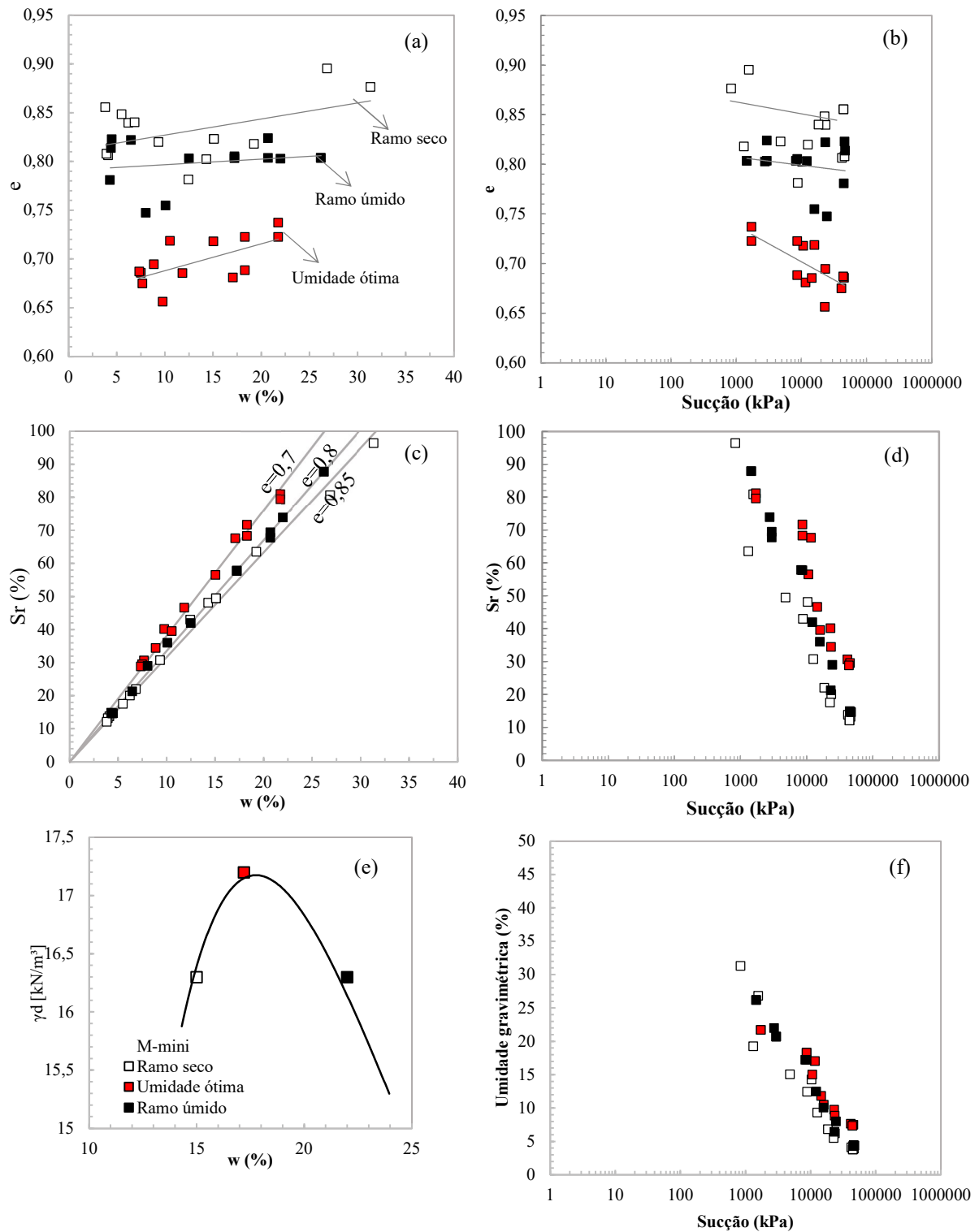


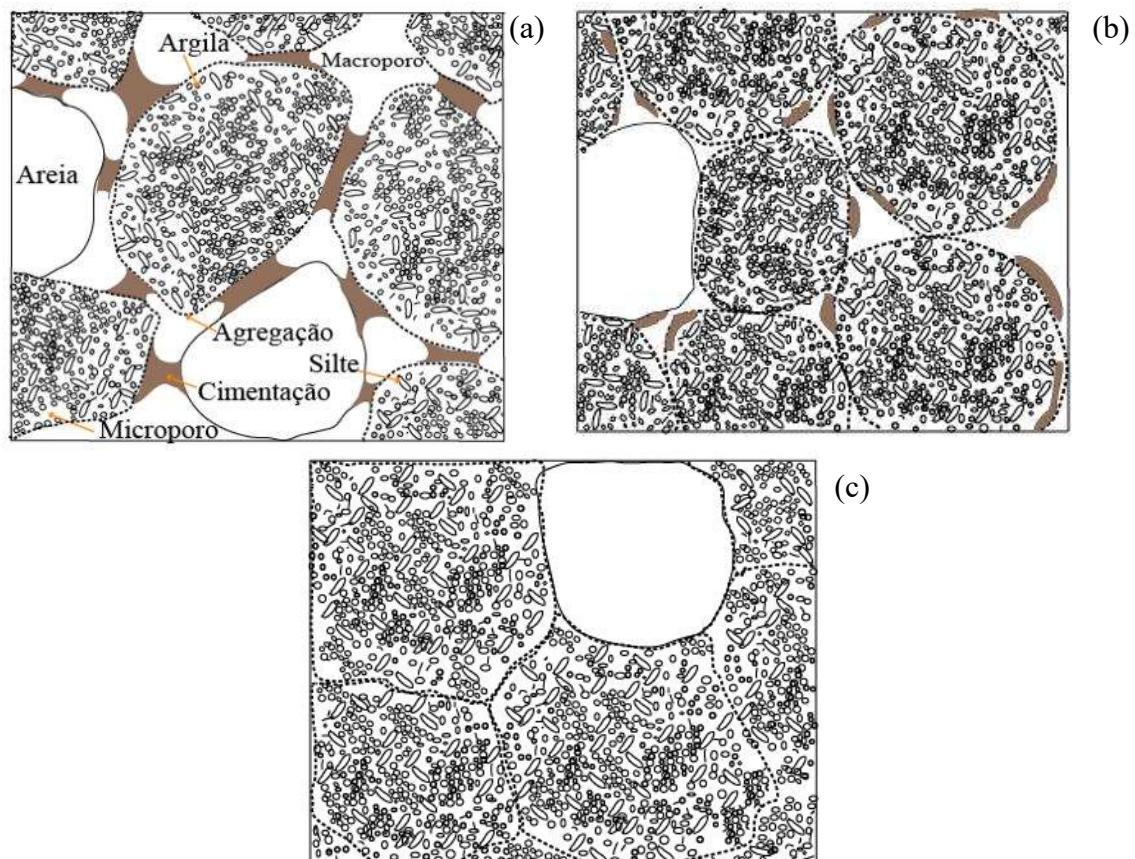
Figura 3.11 – Compactação Proctor modificada em diferentes umidades de compactação. (a) e *versus* w ; (b) e *versus* sucção; (c) S_r *versus* w ; (d) S_r *versus* sucção; (e) curva de compactação mini proctor; (f) w *versus* sucção.

A partir desta análise preliminar realizada (Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11) definiram-se cinco condições estruturais para estudo: Intacta (N), compactada (energia Proctor normal-PN e modificada-M) e lama (com água destilada-LD e hexametáfosfato-LH). A

condição intacta (Figura 3.12a) representa todos os componentes de estruturação (cimentação, agregação, porosidade) e refere-se ao objeto do estudo.

A condição compactada na energia de Proctor normal (Figura 3.12b) indica a quebra da cimentação, além de uniformização e modificação das agregações (Ng *et al.*, 2020a). No entanto, a energia modificada (Figura 3.12c) aplicada ao solo produz um rearranjo da estrutura a qual diminui a maioria dos macroporos, restando apenas microporos.

Todas as amostras podem ser relacionadas com a desestruturação do solo a partir das amostras reconstituídas. Nesta pesquisa, utilizaram dois fluidos para a formulação da amostra lama: água destilada (Figura 3.12d) e hexametáfosfato de sódio (Figura 3.12e). A condição lama com água destilada não possui a contribuição de maior parte da agregação e não apresenta o efeito da cimentação além de um rearranjo da estrutura. Por outro lado, as amostras com hexametáfosfato são utilizadas na tentativa de eliminar mais agregações provocadas pelos sesquióxidos.



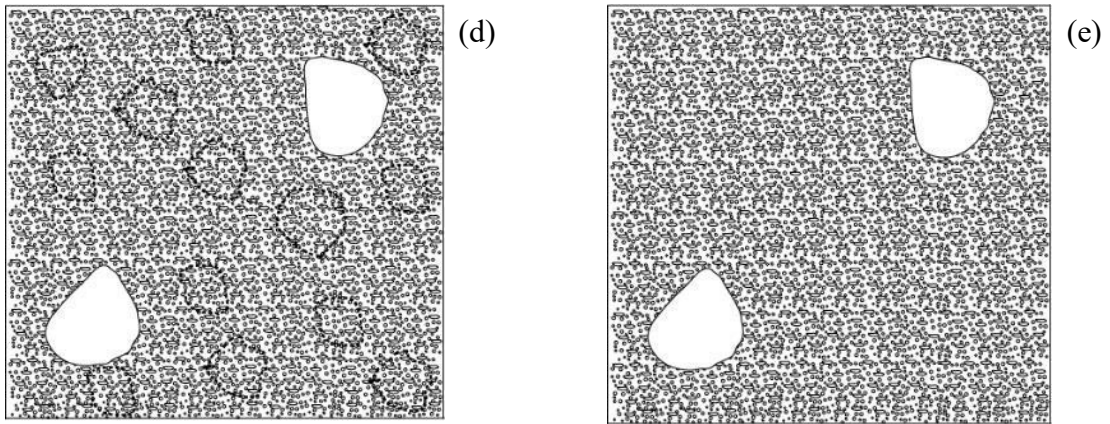


Figura 3.12 – (a) Amostra indeformada (N); (b) Amostra compactada (PN); (c) Amostra compactada com energia modificada (M); (d) Reconstituída com água destilada (LD); (e) Reconstituída com uso de hexametáfosfato de sódio (LH)

A Figura 3.13 corresponde as curvas de compactação convencional (NBR7182 - ABNT, 2018e) obtidas nas energias Proctor Normal ($E=578\text{kN/m}^2$) e modificada ($E=2648\text{kN/m}^2$), bem como a faixa de estudo para condições em lama (LD e LH) e indeformada (N). Assim, se obteve valores próximos a umidade da amostra indeformada ou que correspondiam a similar peso específico seco, porém com estruturas divergentes. A Tabela 3.5 corresponde aos dados correspondentes aos índices físicos das amostras neste estudo. Cabe destacar que a curva de saturação foi calculada numa condição diferente das condições de preparação das lamas, isso explica o porquê de estas estarem acima da curva de saturação.

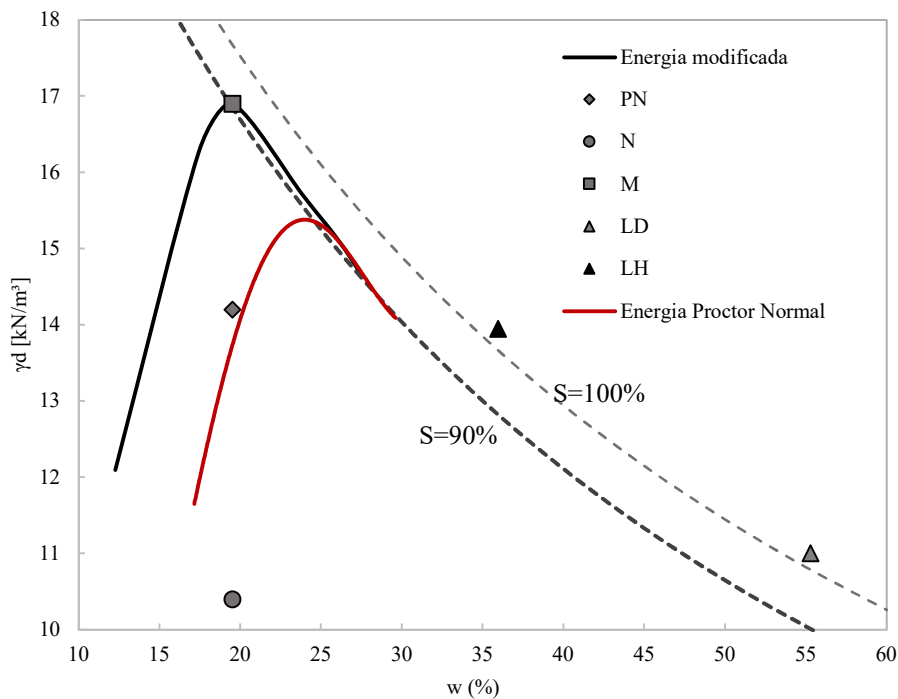


Figura 3.13 – Curvas de compactação com as energias e pontos de moldagem.

As amostras naturais, intactas ou indeformadas (N) foram moldadas para não possuir modificação na sua estrutura, portanto, somente se obteve a umidade natural de cada amostra junto dos índices físicos e assim foram destinadas para ensaio. Os pesos específicos seco e índice de vazios das amostras naturais variam entre 10-11 kN/m³, e 1,7-1,5 respectivamente.

Tabela 3.5 - Dados das amostras constituintes

Amostras	γ_d [kN/m ³]	e	w [%]	w _{ótima} [%]	S [%]
PN	14,20	0,92	19,50	25	58,53
N	10,40	1,63	19,50	-	32,68
M	16,90	0,62	19,50	20	87,54
LD	11	1,53	55	-	100
LH	13,95	0,96	35,95	-	100

As amostras compactadas, escolhidas na condição Proctor normal (PN), possuem peso específico seco definidos em 13,9 kN/m³ e índice de vazios 0,92. As amostras para o estudo na condição Proctor Modificada (M) apresentaram peso específico seco e índice de vazios de 16,9 kN/m³ e 0,6 respectivamente.

O método de compactação das amostras considerado foi o semiestático e se deve à necessidade de evitar quebra de grão, além de proporcionar uma melhor repetibilidade das propriedades dos solos (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987). Esse procedimento foi realizado previamente por diversos autores (Oliveira, 2004; Silva, 2009; Borges, 2014; Queiroz, 2015). Nesta pesquisa se utilizaram moldes metálicos cilíndricos para a obtenção de amostras com 50 mm de diâmetro e amostradores quadrados com 60 mm x 60 mm para ensaios de cisalhamento direto (Figura 3.14).

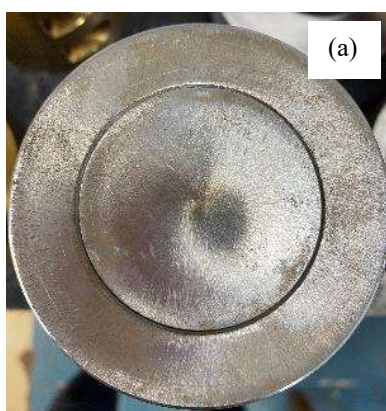




Figura 3.14 – Moldes para compactação semiestática (a) Base cilíndrica (b) molde e prensa (c) Molde quadrado (d) detalhe lateral molde quadrado

Após a compactação semiestática, algumas amostras foram condicionadas em ensaios de granulometria para verificar se houve quebra de partículas e modificação das agregações. Para tanto, utilizou o granulômetro a laser marca *Microtrac s3500* (Figura 3.15).



Figura 3.15 – (a) Granulômetro a laser (b) Amostra para ensaio de granulometria

3.2.1 ESTABELECIMENTO DAS AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS

O procedimento utilizado para obter o estado reconstituído iniciou com a amostra amolgada, passada na peneira de 2 mm com umidade inicial entre 19% e 21%. Após esse processo adicionou-se água ao solo até atingir um valor acima ao teor de umidade alvo (1,1-1,7w_L), resultando em uma concentração definida pela equação 3.2.

$$C = \frac{Ms}{Mt} \times 100 \quad (3.2)$$

onde: C é a concentração de sólidos; Ms é a massa de sólidos; Mt é a massa total com água adicionada.

A metodologia de Borges (2014) pede para que a amostra seja homogeneizada, por 15 (quinze) minutos, e deixada em repouso. No entanto, neste trabalho optou-se por homogeneizar

em dois intervalos de 15 minutos para garantir a incorporação da água nas agregações. Após esse processo, as amostras foram colocadas em moldes e assim verificaram-se seus índices físicos (Figura 3.16).

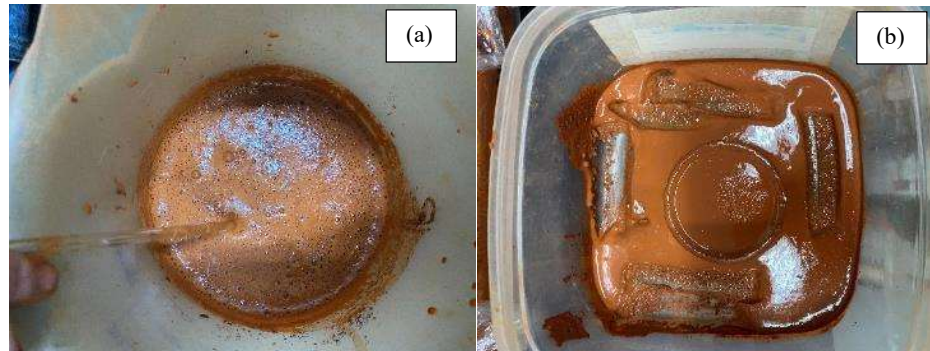


Figura 3.16 – Produção de amostras reconstituídas. (a) Mistura (b) Sedimentação.

Seguindo a metodologia de Otálvaro (2013), as amostras com hexametáfosfato foram produzidas com a mesma concentração que são realizadas as granulometrias com defloculante (43g de hexa para 100g de água - *SHexa*) cuja norma é NBR7181 (ABNT, 2018). As amostras, após a adição do fluido, foram misturadas em dois intervalos de 15 minutos. Após a homogeneização, foram depositadas nos moldes, seguindo o mesmo procedimento da lama com água destilada desta pesquisa.

Para definir as concentrações de sólidos (C) com a solução de hexametáfosfato realizou o ensaio de limite de liquidez (w_L) com adição da solução (*SHexa*), e seus resultados são mostrados na Figura 3.17a. Os resultados indicam um limite de liquidez de 37% para solução com água destilada e 29% com o uso da concentração com hexametáfosfato de sódio (*SHexa*). A partir dessa relação foram obtidos a concentração de mililitros de *SHexa* (solução de 43g de hexametáfosfato para 100g de água destilada) por 100 gramas de solo úmido a 20,5% de umidade (Figura 3.17b).

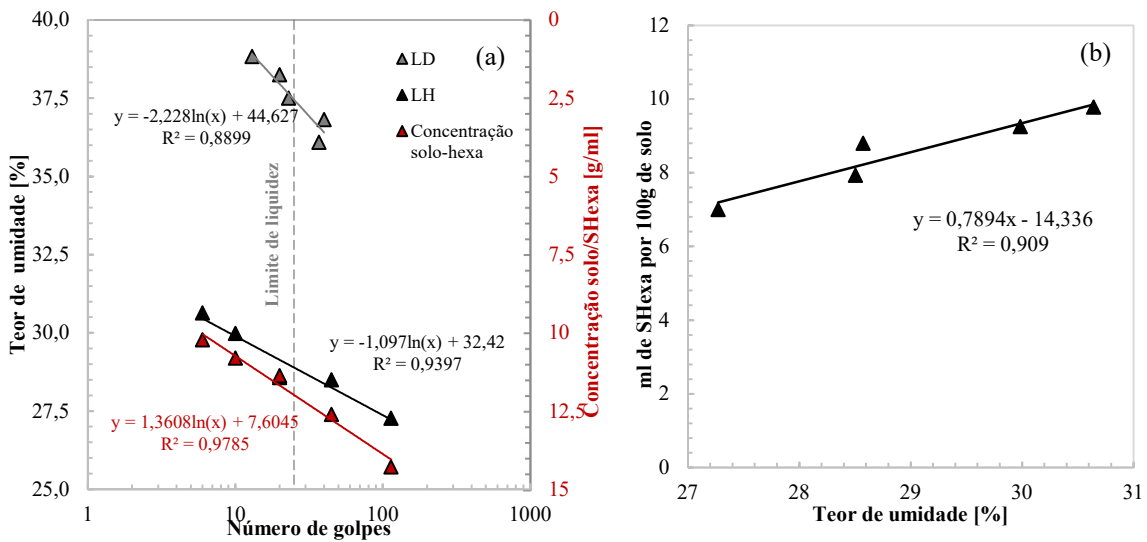
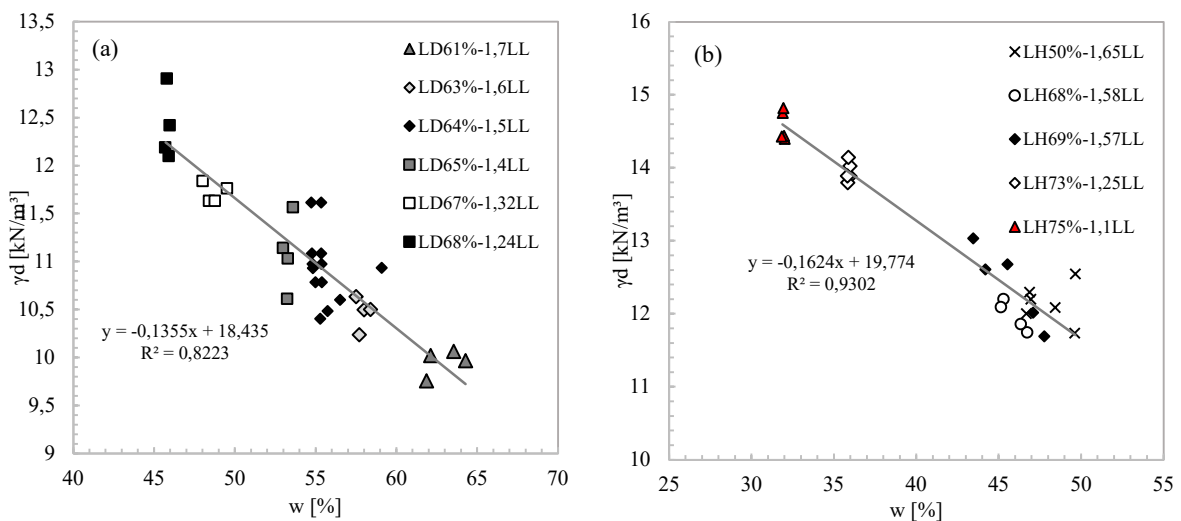


Figura 3.17 – Ensaio de Atterberg com água destilada e hexametafosfato. (a) Limites de liquidez (b) Concentração de hexametafosfato para 100 gramas de argila porosa a 20,5 %.

SHexa*=solução de 43g de Hexametafosfato para 100g de água destilada

Com o intuito de identificar quais concentrações a utilizar nesta pesquisa produziram-se amostras reconstituídas que variavam entre 1,1 e 1,7 w_L . A Figura 3.18 mostra a relação entre o peso específico seco com a variação de umidade em diferentes concentrações. Para essas lammas percebe-se que com o aumento de umidade há a diminuição do peso específico seco da amostra e consequentemente aumento do índice de vazios (Apêndice A). No entanto, as amostras com apenas água destilada (Figura 3.18a) apresentam índices de vazios maiores que as amostras com hexametafosfato o que evidencia diminuição da macroporosidade nas amostras LH (Figura 3.18b). De uma forma geral, as duas estruturas produzidas apresentam um comportamento linear ao analisar conjuntamente (Figura 3.18c).



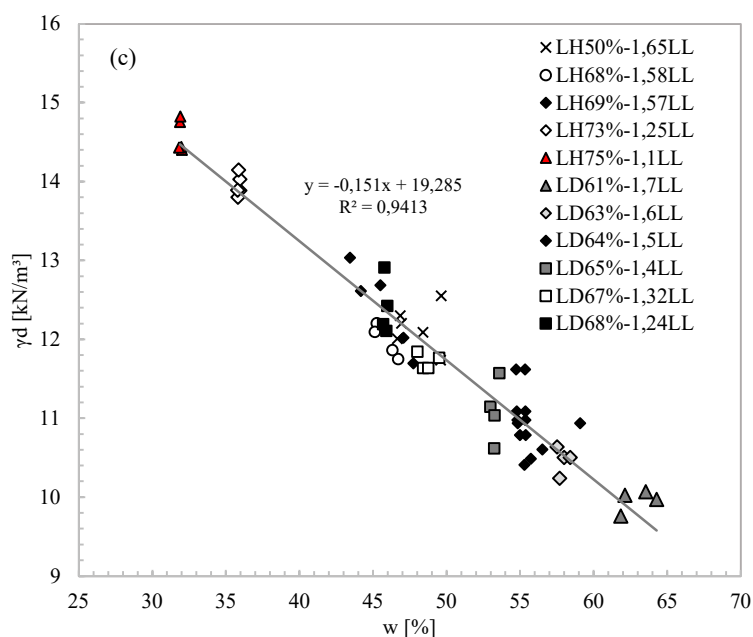


Figura 3.18 – Peso específico seco com a variação de umidade em diferentes concentrações. (a) Água destilada (b) Concentração de hexametáfosfato (c) Com todas as amostras reconstituídas

Para verificar a existência de agregações antes e depois da preparação das amostras foram realizados ensaios de granulometria à laser em algumas amostras com diferentes proporções de solução. As Figuras 3.17 e 3.18 representam as granulometrias nas amostras com água destilada e com hexametáfosfato respectivamente, com e sem uso de ultrassom (US). Esses gráficos permitem verificar que há preservação de certa agregação, porém com considerável redução nas amostras preparadas com hexametáfosfato.

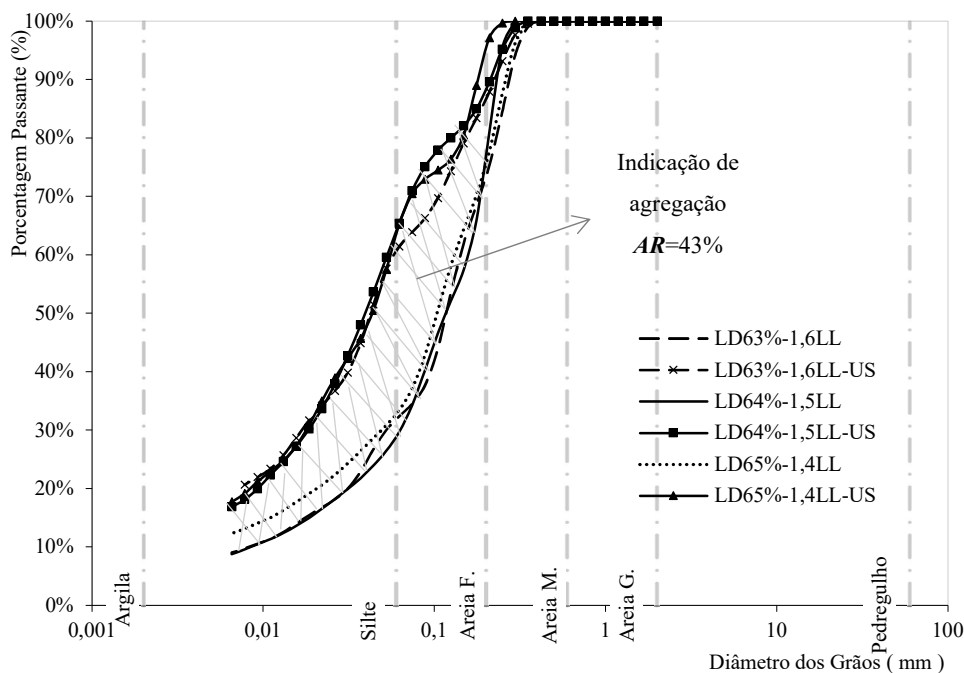


Figura 3.19 – Granulometria de amostras reconstituídas com uso de água destilada.

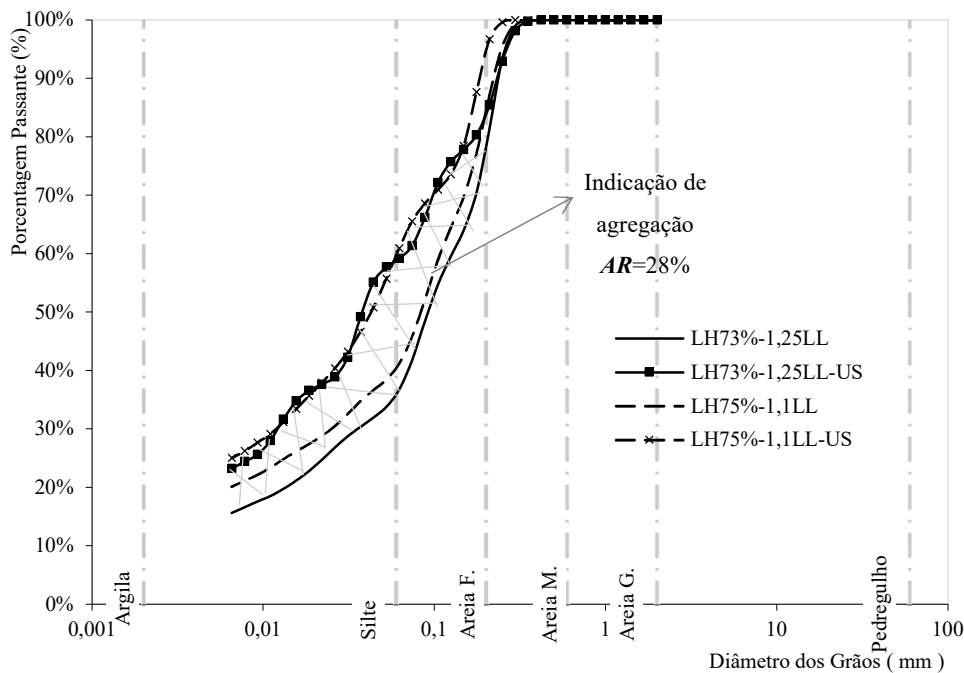


Figura 3.20 – Granulometria de amostras reconstituídas com hexametáfosfato.

Nesse sentido, para a campanha experimental foram escolhidas lamas que permitissem o manuseio e que garantisse a não oclusão de bolhas, além disso que fornecessem peso específico seco e índice de vazios próximos das amostras intactas (N) e compactadas (PN). Assim, neste trabalho utilizou a amostra reconstituída com água destilada com 1,5 do limite de liquidez com concentração de 64% e AR de 43%, por outro lado, para as amostras com solução de hexametáfosfato adotou-se 1,25 do limite de liquidez com concentração de 73% com agregação relativa de 28% (71,3 gramas de S_{Hexa} em 500 gramas de argila porosa na umidade 20,5%).

3.3 EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

Neste trabalho foi construído e adaptado dois equipamentos de cisalhamento direto convencionais. O equipamento da marca *Wykeham Farrance* foi totalmente restaurado e uma série de adaptações e correções foram feitas ao existente como: torneamento, rebobinamento de motor, montagem e adaptação de células e peças, instrumentação, sistema elétrico e construção do sistema de aquisição de dados com interface gráfica visual. Na Figura 3.21 pode-se observar de forma geral parte das adaptações realizadas.

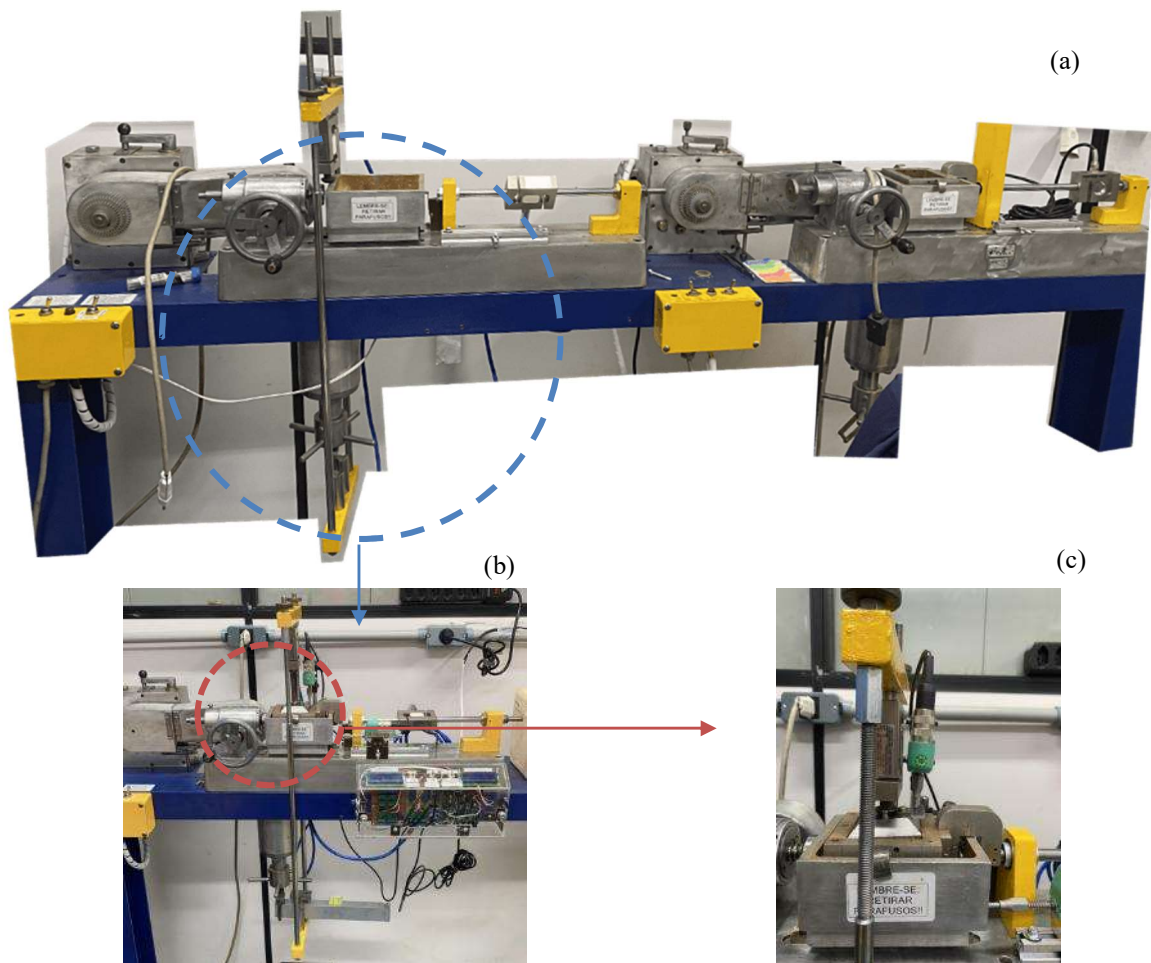


Figura 3.21 – Equipamento de cisalhamento direto. a) Vista geral do equipamento de cisalhamento direto, b) detalhado com o sistema de aquisição e c) detalhamento da caixa de cisalhamento.

O equipamento cisalhamento convencional foi baseado na norma D3080:04 (ASTM, 2008). Para a instrumentação foram utilizadas células de cargas para registrar as tensões cisalhantes, e a tensão normal efetiva no topo da amostra. Para a medição de deslocamento vertical e horizontal instalaram-se transdutores lineares resistivos da marca *GEFRAN* modelo PY2, com erro de não linearidade e histerese fornecido pelo fabricante de 0,3% do curso útil. As velocidades de cisalhamento encontradas as quais o equipamento pode impor são: 0,16; 0,08; 0,04; 0,007 e 0,0008 mm/min, respectivamente.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido para o equipamento se fez pelo uso da plataforma *open source* Arduino (Figura 3.22a) e do *software* LabVIEW (Figura 3.22b). A programação foi realizada e incorporada ao microcontrolador Arduino Mega 2560, adicionados a *sketches* que possibilitam o acondicionamento do sinal e convertem o valor analógico para o digital (ADC). Os dados são armazenados via cartão *SD* e são levados via rede para o

computador. Para a interface visual utilizou-se o *software* LabVIEW, em que possibilitou visualizar e acompanhar as medições no momento do ensaio, além de armazenar os dados diretamente em planilhas e controlar o tempo para aquisição de dados.

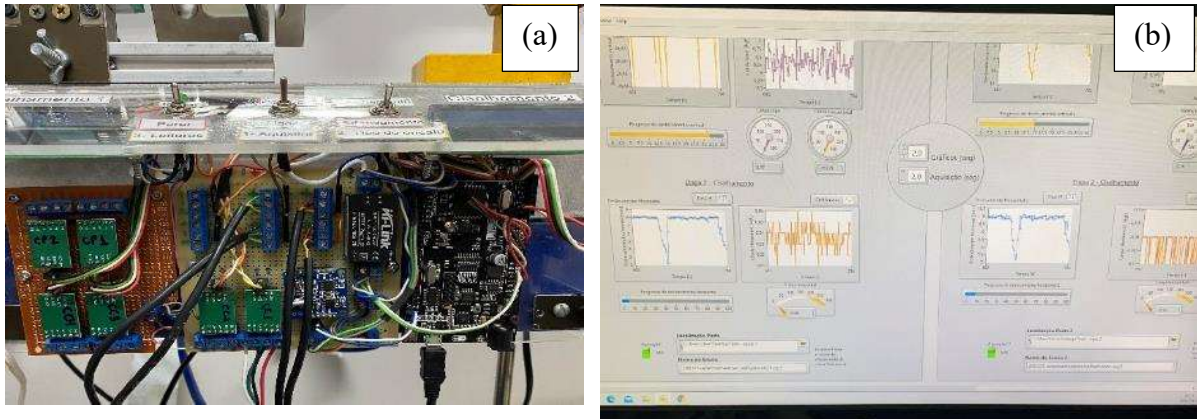


Figura 3.22 - Sistema de aquisição de dados (a) Sistema montado do Arduino (b) Interface visual por Labview.

Para a realização do sistema de aquisição a partir do Arduino foi necessário utilizar: sensores de temperatura (Figura 3.23a), módulo display LCD com interface I2C (Figura 3.23b), módulo conversor/amplificador HX711 para as células de carga (Figura 3.23c), fonte de alimentação conversora 220 para 5 volts (Figura 3.23d), módulo ads1115 16bits para amplificar a conversão analógico digital (Figura 3.23e) , os quais são conectados no Arduino Mega 2560 *wifi* (Figura 3.23f).

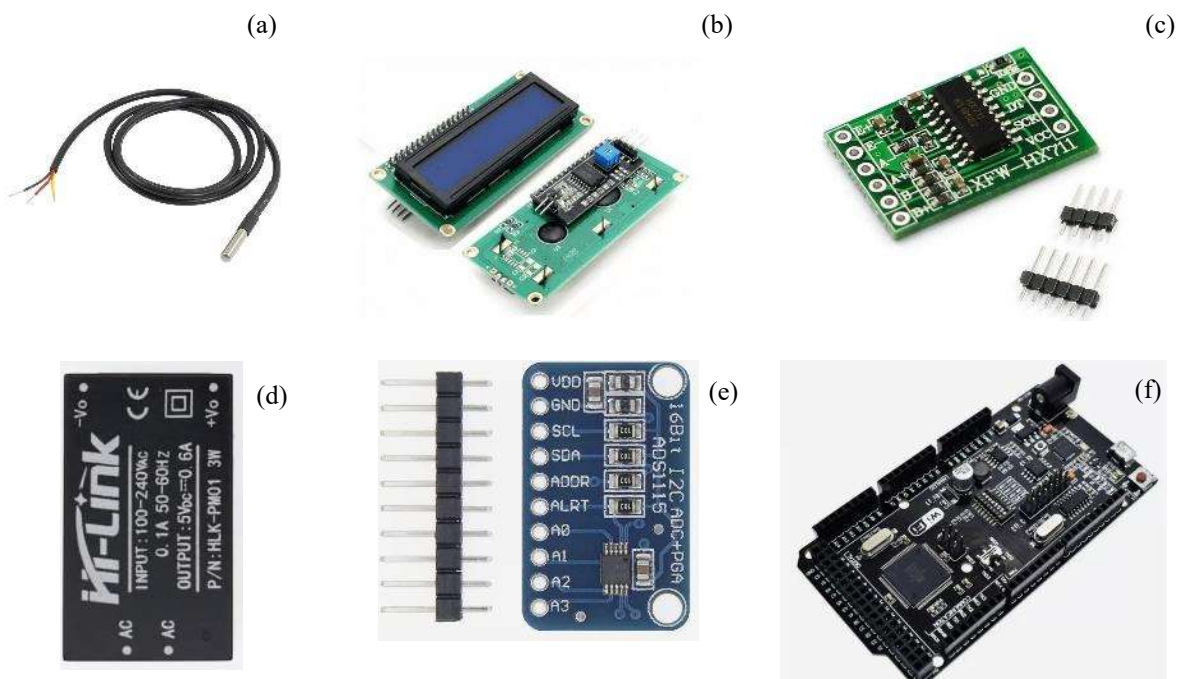


Figura 3.23 – Módulos do sistema de aquisição Arduino (a) Sensor de temperatura (b) LCD visual (c) Conversor para célula de carga (d) Fonte de alimentação (e) ADS 16bits (f) Arduino

utilizado no sistema.

A partir da saída dos dados via rede (usb) do Arduino, este foi conectado com a interface gráfica através da linguagem gráfica de programação LabVIEW. Para tanto, foi necessário adicionar o driver NI-VISA para possibilitar a leitura serial dos dados vindos do microcontrolador. Além disso, instalou-se a extensão TDM Excel para possibilitar que os dados finais sejam carregados no Microsoft Excel.

Para a realização da programação gráfica os principais blocos de função na linguagem utilizados foram (Figura 3.24): *visa serial port*, *visa read*, *spreadsheet string*, *array to cluster*, *cluster*, *unbundle*, *bundle*, *concatenate string*, *build path*, *TDMS open*, *property mode*, *get date*, *time string*, *build array*, *TDMS write*, *array to matrix*, *cluster to array*. O display e código desenvolvido encontra-se no Apêndice B.

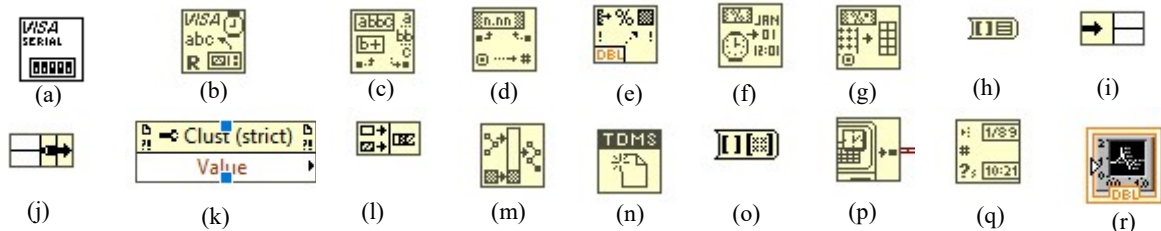


Figura 3.24 – Blocos de função do LabVIEW (a) *visa serial port* (b) *visa read* (c) *match parttern* (d) *fract string to number* (e) *format into string* (f) *format date to string* (g) *spreadsheet string to array* (h) *Array to cluster* (i) *unbundle* (j) *bundle* (k) *property node* (l) *concatenate string* (m) *build path* (n) *TDMS open* (o) *Array to matrix* (p) *get date* (q) *time string* (r) *waveform charts*.

A calibração dos transdutores lineares foi realizada com o uso de micrômetro, e para as células de carga fez-se uso de equipamento de compressão com aplicação de força de 50 a 1500kN. Os gráficos obtidos juntamente com as funções estão dispostos na Figura 3.25.

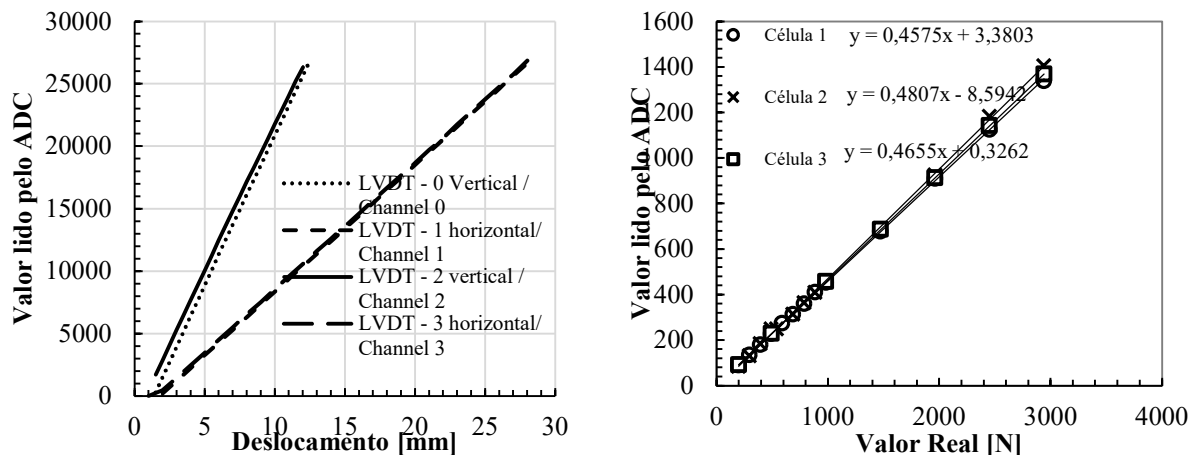


Figura 3.25 - Gráficos de calibração dos equipamentos que compõe o cisalhamento direto.

(a) Gráfico de calibração de transdutores (b) Gráfico calibração célula de carga.

3.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental divide-se em caracterização mecânica, hidráulica e microestrutural. A seguir um detalhamento dos ensaios realizados são mostrados nos próximos itens.

3.4.1 ENSAIOS HIDRÁULICOS

Os estudos mostram que as curvas de retenção solo-água (SWRC) nos solos superficiais do Distrito Federal possuem caráter bimodal (Otálvaro, 2013; Borges, 2014; Mascarenhas, 2008; Silva, 2009; Queiroz, 2015; Otálvaro *et al.*, 2016; Kuhn *et al.*, 2020). Este fato, mostra que a melhor técnica para obter a variação da sucção pelos seus índices físicos são as fornecidas pelas combinações de dois métodos laboratoriais: translação de eixos e psicrômetros (WP4C). Neste trabalho foi utilizada a técnica translação de eixos com o equipamento CGTS, modelo SWC-150 para as sucções entre 4 e 1500 kPa; com este aparelho foi possível traçar curvas de retenção, com medições de 3 kPa até 1500kPa (dependendo do valor de entrada de ar da cerâmica utilizada na base da amostra). Os valores acima de 2000 kPa foram definidos a partir do psicrômetro (WP4C – *Dewpoint Potencia Meter*) que realiza medidas de sucção total. Embora a técnica de translação de eixos impõe sucções matriciais e o WP4C mede sucções totais, ambas as medidas mostram uma concordância (Otálvaro 2013; Borges, 2014; Queiroz, 2015; Lopes, 2016; Kuhn, 2019) que permite determinar uma SWRC em termos de sucção matricial, da mesma forma realizada por Tarantino e Col. (2008).

Posteriormente, para analisar o índice de vazios *versus* umidade das amostras nas cinco condições, obteve-se curvas de contração. O processo de obtenção ocorreu através da saturação das amostras, e pelo processo de secagem fez-se a medição dos corpos de prova com paquímetro e pesagem em balança analítica (Figura 3.26a). O teor de umidade obtido foi relacionado com a sucção das amostras a partir da função obtida pelas curvas características de cada amostra. Também realizou o processo de umedecimento a partir da secagem das estruturas em análise.

Os ensaios de permeabilidade foram utilizados para complementar as análises e relacionar curvas de permeabilidade com a microestrutura e sucção através de modelos propostos na literatura. Para tal, utilizou o mini permeâmetro em carga variável desenvolvido por Koide (1990) (Figura 3.26c).

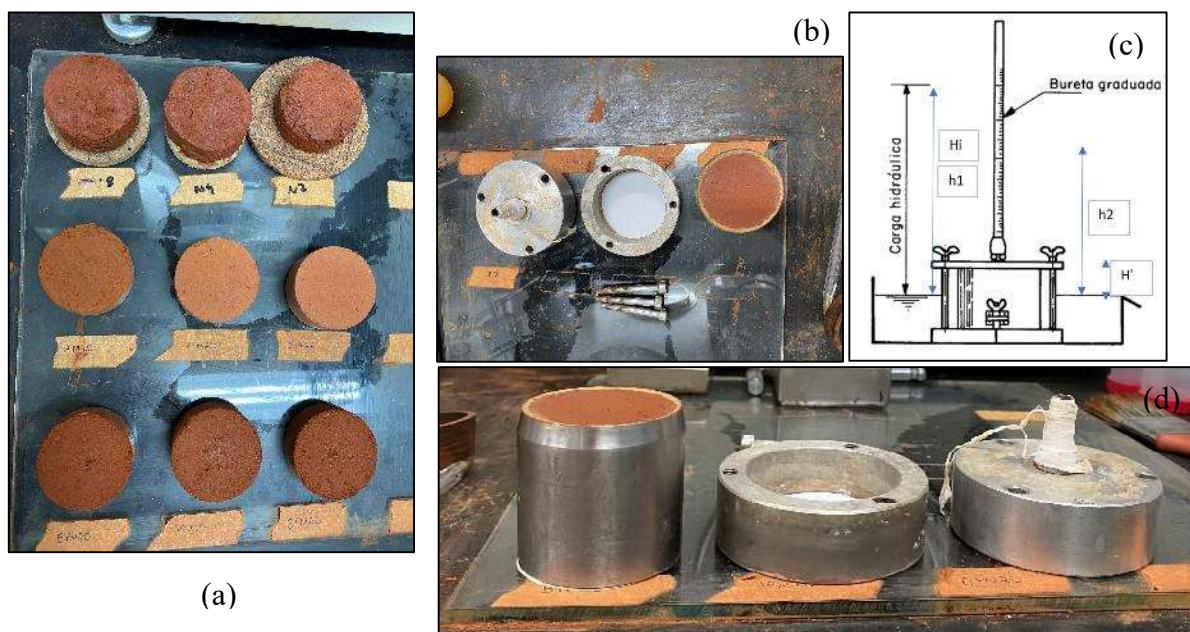


Figura 3.26 – (a) Amostras para curvas de contração (b) Vista das peças do permeâmetro de cima (c) Vista lateral do permeâmetro (d) Desenho esquemático do permeâmetro

3.4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO OEDOMÉTRICA

Os ensaios de compressão oedométricos foram produzidos nas amostras obtidas na etapa de preparação conforme metodologia proposta. O ensaio é realizado em anel de 50 mm de diâmetro por 20 mm de altura, dimensões estas que coincidem com as dos moldes utilizados na fase de preparação das amostras. O método de ensaio segue a norma D2435 ASTM (1996).

Os ensaios foram produzidos em condição inundada, empregando as tensões de 2, 6, 12, 24, 50, 100, 200, 400, 800, 1500 kPa, seguido de descarregamento em 3 etapas.

3.4.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento são realizados nas amostras com o intuito de avaliar propriedades de resistência ao cisalhamento (ϕ' e c'), bem como o comportamento quanto a dilatância. Além disso, as fases de consolidação do ensaio permitem a análise de forma conjunta com o adensamento unidimensional.

As tensões aplicadas ao solo utilizando o equipamento de cisalhamento direto foram: 12,5, 30, 70, 100, 170, 300, 500 e 1000 kPa para as estruturas indeformada e compactada na condição saturada. Ademais, nas amostras reconstituídas utilizaram-se tensões entre 12,5 e 500kPa. Os ensaios foram realizados na condição drenada conforme norma D3080 (ASTM,

2011), e velocidade de ruptura verificada a partir das curvas de adensamento embasados em estudos de Pitanga (2002) e Head (2011). Dessa forma, destinou-se a velocidade de 0,04 mm/min para as amostras intactas, modificadas e proctor normal. No entanto as amostras reconstituídas foram cisalhadas com velocidade de 0,007 mm/min para garantir a drenagem, além disso o processo de carregamento nas amostras em lama foi realizado de forma similar ao ensaio de adensamento, em etapas, para que não houvesse excesso de poropressão que viesse comprometer o ensaio.

Para determinados níveis de tensão (0, 70kPa e 300kPa) do ensaio produziram-se corpos de prova para realização de ensaios microestruturais de MIP e MEV com o objetivo de verificar as modificações na estrutura.

3.4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitam uma leitura microscópica da evolução da orientação dos macroporos, microporos e agregações durante solicitações (Hattab e Fleureau, 2010). No entanto, os ensaios de MIP proporcionam uma taxa da variação de índices de vazios em relação aos macroporos e microporos (Li *et al.*, 2020; Kuhn *et al.*, 2021).

Neste trabalho se utilizaram dados de ensaios MIP (porosimetria por intrusão de mercúrio) para todas as condições estruturais e, para complementar e analisar de forma qualitativa e semiquantitativa, fez uso das imagens de microscópio de varredura a laser (MEV).

A técnica de intrusão de mercúrio (MIP) foi realizada com o equipamento AutoPore IV 9500 Micromeritics Instrument Corporation, disponível na Universidade de São Paulo e o MEV da Universidade Federal de Goiás. O procedimento é baseado na relação entre a pressão de injeção do mercúrio e o diâmetro do poro (Romero e Simms, 2008) o qual é possível obter a distância média entre as partículas através da equação (3.2):

$$p = - \frac{4\sigma_{nw} \cos(\theta_{nw})}{D} \quad (3.2)$$

onde, p é a pressão absoluta do líquido não molhante; σ_{nw} é a tensão superficial do líquido não molhante (0,484 N/m para o mercúrio); θ_{nw} é o ângulo de contato entre o material poroso e o líquido não molhante (140°); D é o diâmetro do poro.

A Figura 3.27 corresponde a posição de extração das amostras tanto para os ensaios de MEV quanto MIP. A parte hachurada em vermelho significa a posição de imagem realizada pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram moldadas antes e após

a solicitação de cisalhamento, e após a extração submetem-se ao processo de liofilização (Delage, 1996) para que as amostras não sofressem variação volumétrica e assim não afetando a distribuição de poros.



Figura 3.27 - Posição para extração das amostras. (a) Vista lateral antes do carregamento (b) Após cisalhamento. Para MEV: #1, #3. Para MIP: #2, #4.

A quantificação da estrutura agregada por imagens difere de estruturas típicas de solos pouco intemperizados, onde a partícula e a orientação são facilmente identificadas. Nesse sentido, a quantificação foi realizada em relação as características da agregação e poros interagregados (tamanho, forma e arranjo), grau de agregação e padrão de microporos o qual são definidos nos estudos de Bullock e Murphy (1980) (Figura 3.28).

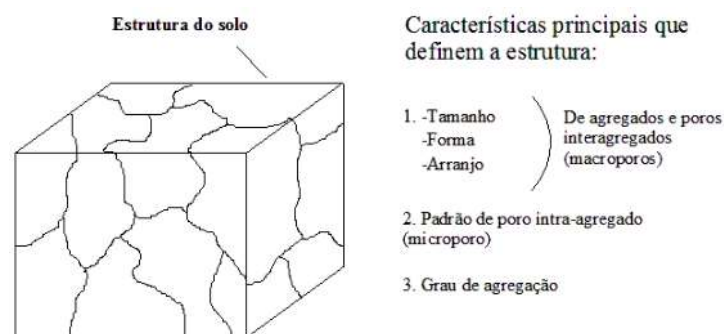


Figura 3.28 - Representação para quantificação da estrutura agregada. (Modificado de Bullock e Murphy, 1980).

Para tal, os parâmetros definidos a partir de imagens por MEV são divididos em: orientação, aspecto da forma para agregados e poros que são baseados nas propostas de Gao *et al.*, (2019), Wang *et al.*, (2020) e Gao *et al.*, (2020).

A partir de uma agregação (Figura 3.29), o ângulo de orientação (θ) é o responsável para derivar outros parâmetros, como a frequência direcional que relaciona o número de partículas em um determinado ângulo (m_i) com o número de partículas estudadas (M). O aspecto da forma (A_r) corresponde a variação quanto a forma do agregado e partícula (0-1).

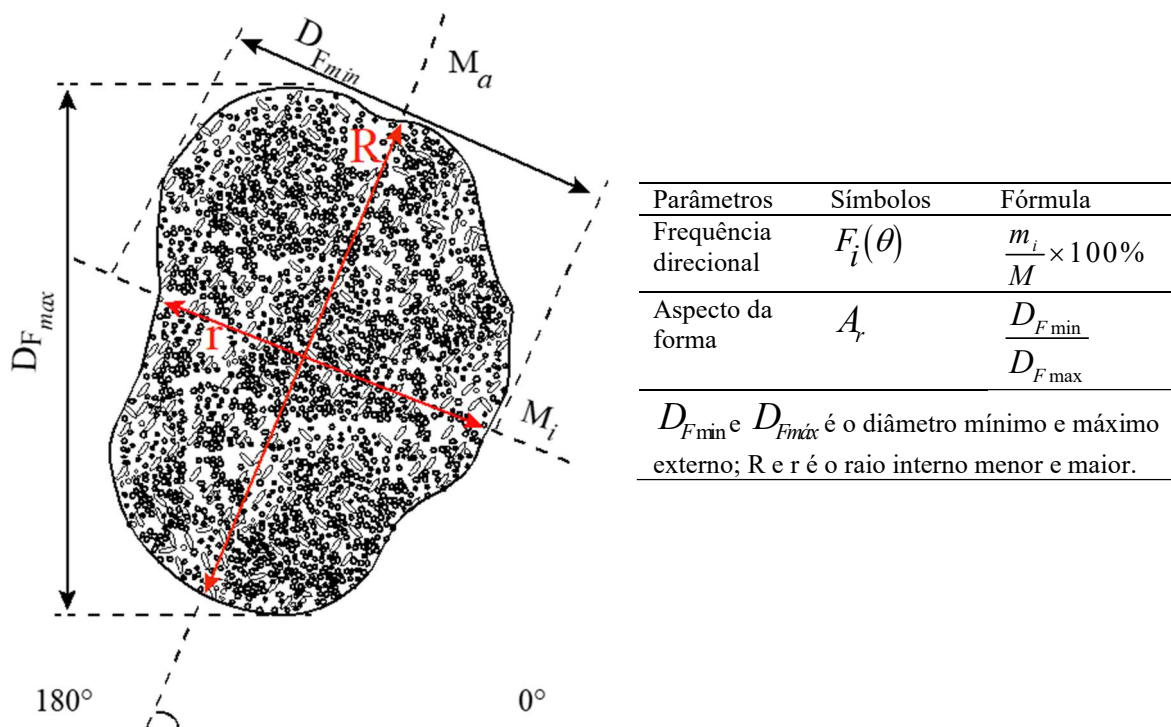


Figura 3.29 - Ilustração e parâmetros para análise de ensaios MEV. (a) Ilustração esquemática quanto a agregação (b) Parâmetros para qualificar as características dos poros ou agregações. (Modificado de Wang *et al.*, 2020).

Para obter dados semiquantitativos das imagens, técnicas digitais foram adotadas para extrair as informações das agregações e dos poros através do uso do *software* ImageJ (Gao *et al.*, 2019). A escala de cinza ao qual a imagem possui (Figura 3.30a) permite definir a localização dos poros e das agregações a partir da segmentação da imagem por binarização (Figura 3.30b), o qual transforma a imagem em dois valores (equação 3.3) definidos como preto (0) ou branco (255).

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < T \\ 255, & f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (3.3)$$

onde: T corresponde ao valor de linearização da imagem (*thresholding*). Neste caso, analisou o histograma de pixel da imagem e foi definido o valor de cinza que inicia a identificação dos poros.

A partir da identificação dos poros pode-se relacionar a área de poros (A_p) e a área total da imagem (A_t), sendo possível estimar a relação da porosidade (A_p/A_t) e índice de vazios por meio dessas análises semiquantitativas e confirmar a avaliação qualitativa das imagens (Bullock e Murphy, 1980; Burgos, 2016; Silva *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2020).

Os limites das agregações e dos poros com o auxílio do *software* ImageJ foram contornados e desenhados nas imagens após o processo de binarização (Figura 3.30c e d). Isto

possibilitou definir as propriedades geométricas para cada elemento (dimensões, ângulo, perímetro, área) e conseqüentemente resultando nos dados estatísticos, como a orientação a partir do diagrama das rosas, frequência de agregações e poros.

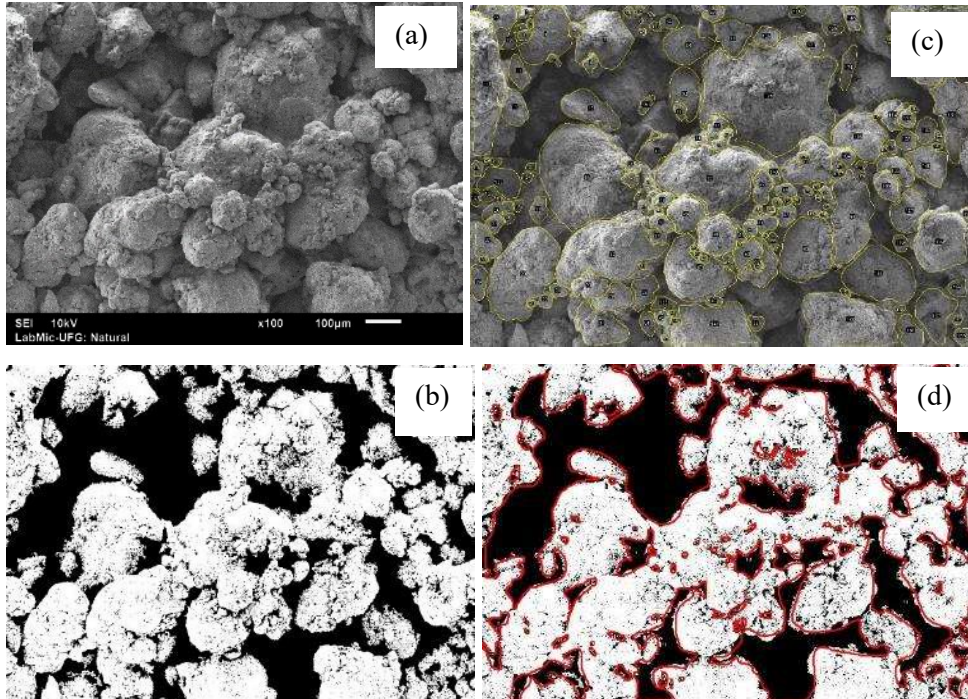


Figura 3.30 - Método de análise para a definição de parâmetros a partir dos ensaios MEV. a) Imagens em escala de cinza. b) binarização da imagem c) Seleção das agregações d) Seleção dos poros.

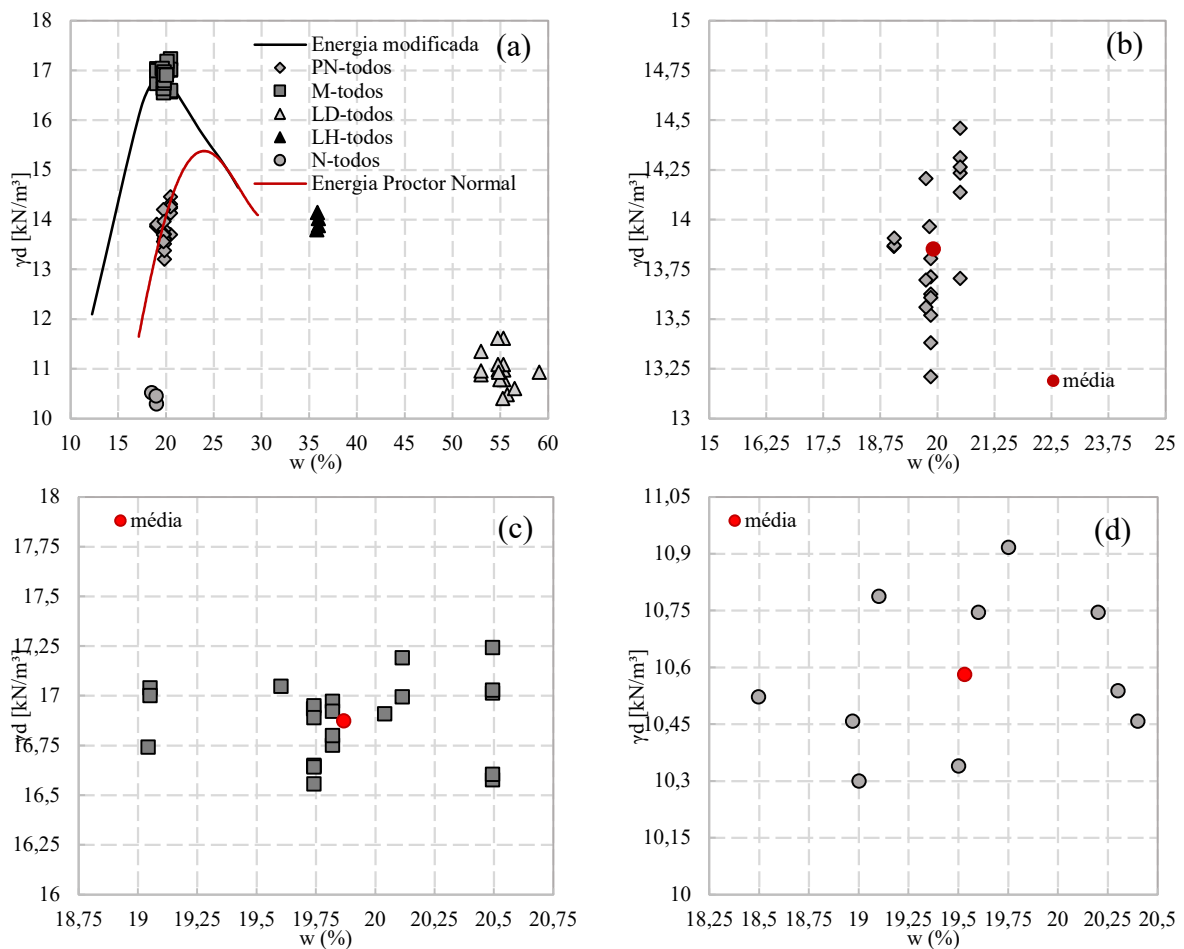
Gao *et al.* (2019) sugerem 400 a 500 dados por amostra são suficientes para se tornar representativo, assim neste trabalho foi utilizado a partir de 400 dados. Para complementar a análise, a partir do diagrama de rosas foi possível utilizar a metodologia de Hattab e Fleureau (2000) para identificação de comportamentos quanto às disposições das agregações e poros e na ação tensão deformação nas diferentes estruturas.

3.5 VARIABILIDADE DAS AMOSTRAS

Os resultados experimentais podem ser influenciados pela condição de compactação bem como a variabilidade do processo de compactação (Kuhn, 2019). Nesse sentido, foi realizado uma análise da variabilidade em algumas amostras compactadas, reconstituídas e intactas. A princípio foram analisadas 68 amostras, sendo: 10 na condição intacta, 20 Proctor normal, 21 modificado, 13 na condição lama com água destilada e quatro corpos de prova na forma lama com hexametáfosfato. Estes valores apresentam-se em: média, desvio padrão,

variância, valor máximo e mínimo das amostras, bem como erro padrão (As tabelas 3.6, 3.7 e 3.8).

A Figura 3.31 mostra os dados de umidade das amostras em relação ao peso específico seco dos corpos de provas produzidos nas diferentes condições nas dimensões 50 x 20mm, 50 x 50mm (moldes cilíndricos) e 60 x 60 x 20mm (moldes quadrados). De uma forma geral, percebe-se a umidade das amostras intactas é a que mais apresenta variação devido a facilidade de perda de água com o tempo. Ademais apresentaram índices de peso específico seco de 10,3 a 10,9, e índice de vazios correspondentes a 1,51 e 1,66 (Tabela 3.6), no entanto alguns estudos no mesmo local (Borges, 2014; Burgos, 2016) mostram que estes valores podem variar de 1,50 a 1,7 o que indica que por ser uma amostra natural apresenta certa variabilidade.



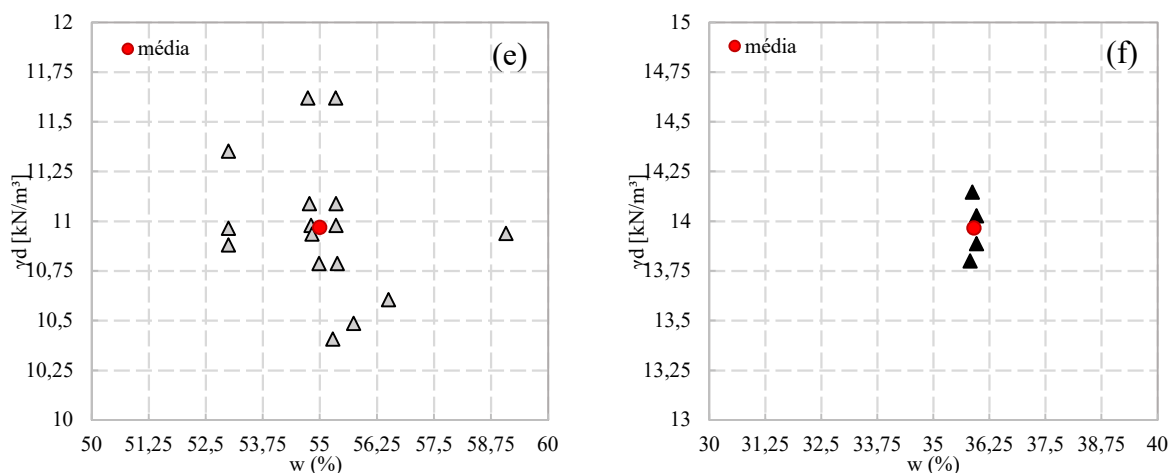


Figura 3.31 – Condições das amostras (a) Representação de todas as amostras (b) PN (c) M (d) Intacta (N) (e) LD (f) LH

As amostras compactadas por sua vez (Tabela 3.7) apresentam variância de 0,002 e 0,0004 para o índice de vazios na forma proctor normal e modificado respectivamente. Essas informações ao comparar com estudos de variabilidade de Kuhn (2019) e Oliveira (2004) mostram que valores até 0,04 de índice de vazios podem ser considerados desprezíveis.

Tabela 3.6 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras intactas

Condição	Intactas			
	Números de CPs	10		
Medidas	w	γ_d	γ_n	e
	[%]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	ad.
Alvo	19,75	15,5	12	1,55
Média	19,53	10,58	12,66	1,59
Desvio padrão	0,64	0,21	0,25	0,05
Variância da amostra	0,41	0,04	0,06	0,003
Valor máximo	20,4	10,92	13,07	1,66
Valor mínimo	18,50	10,30	12,36	1,51
Erro padrão	0,201	0,065	0,078	0,016

De uma forma geral, as amostras compactadas apresentam menores desvios entre a média e alvo, o que já foi constatado por estudos de Queiroz (2015) e Kühn (2019), o que evidencia o melhor controle do índice de vazios em tensões maiores e sendo assim quanto menor as tensões aplicadas, maior a variabilidade dos resultados.

Tabela 3.7 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras compactadas

Condição	Proctor normal				Modificado			
	20				23			
Medidas	w	γ_d	γ_n	e	w	γ_d	γ_n	e
	[%]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	ad.	[%]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	ad.

Alvo	19,75	14	16,9	0,89	19,75	16,9	20,2	0,6
Média	19,91	13,85	16,61	0,95	19,87	16,87	20,23	0,62403
Desvio padrão	0,48	0,33	0,43	0,05	0,44	0,196	0,25	0,0189
Variância da amostra	0,23	0,11	0,19	0,002	0,196	0,038	0,063	0,00036
Valor máximo	20,49	14,46	17,42	1,04	20,49	17,24	20,78	0,65501
Valor mínimo	19,04	13,21	15,83	0,86	19,04	16,56	19,82	0,58914
Erro padrão	0,108	0,075	0,097	0,011	0,092	0,041	0,052	0,004

Por outro lado, as amostras reconstituídas (Tabela 8) mostraram ser as mais propensas à variabilidade, principalmente quanto a valores de umidade, visto que o processo de obtenção depende da quantidade de água e/ou defloculante e do processo de mistura. Nesse sentido, o erro padrão entre as amostras desse estudo ficou de 0,08 para as reconstituídas com água destilada, e de 0,21 para lamas produzidas com hexametáfosfato.

Tabela 3.8 - Dados de variabilidade estatísticas para as amostras reconstituídas

Condição	Amostra reconstituída LD				Lama com hexa LH			
Números de CPs	13				4			
Medidas	w	γ_d	γ_n	e	w	γ_d	γ_n	e
	[%]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	ad.	[%]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	ad.
Alvo	55	11	16,5	1,5	35	13,9	19	0,95
Média	54,20	10,97	16,94	1,50	35,90	13,97	18,98	0,96
Desvio padrão	3,10	0,34	0,55	0,08	0,07	0,15	0,21	0,21
Variância da amostra	9,62	0,12	0,30	0,01	0,00	0,02	0,04	0,00
Valor máximo	59,08	11,62	18,05	1,63	35,96	14,15	19,22	0,99
Valor mínimo	47,98	10,41	16,16	1,36	35,81	13,80	18,74	0,94
Erro padrão	0,775	0,086	0,137	0,021	0,035	0,077	0,105	0,011

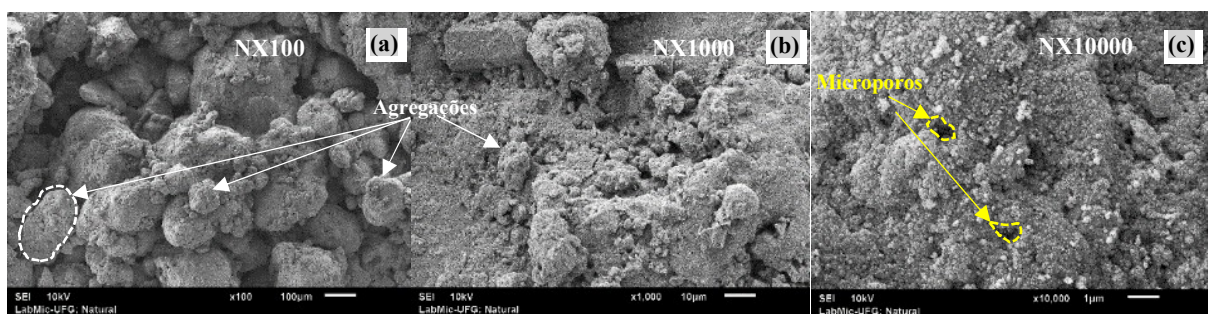
Sendo assim, a variação dos índices de vazios obtidos no processo de compactação estática das amostras empregadas na pesquisa não é de uma magnitude que possa influenciar na estrutura das amostras.

4 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E VOLUMÉTRICO DA MICROESTRUTURA DO SOLO LATERÍTICO

Sabe-se que a estrutura do solo laterítico é composta por agregações, cimentações fracas e apesar do comportamento indicar característica de solos arenosos a sua composição mineralógica principal (caulinita, quartzo, hematita, gibbsita e goethita) mostra-se um solo argiloso muito intemperizado o que evidencia a complexibilidade quanto ao comportamento. Alguns questionamentos estão voltados à variação volumétrica e hidráulica deste solo. Assim, este capítulo tem como objetivo identificar a causa deste comportamento e relacioná-los com aspectos estruturais. Em primeiro momento é estudado aspectos quanto a microestrutura como: distribuição de poros, formas, disposição das agregações e de poros. Em segundo momento é relacionado com o comportamento hidráulico a partir das curvas características de retenção, curvas de contração e permeabilidade.

4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL A PARTIR DE ENSAIOS MEV, MIP E GRANULOMETRIA

A Figura 4.1 corresponde as imagens de microscopia eletrônica de varredura nas cinco condições estudadas neste trabalho: Indeformada (N), Proctor normal (PN), Energia Modificada (M), lama com água destilada (LD) e lama com hexametáfosfato (LH). Percebe-se a variação estrutural e os arranjos formados nas ampliações x100, x1000 e x10000.



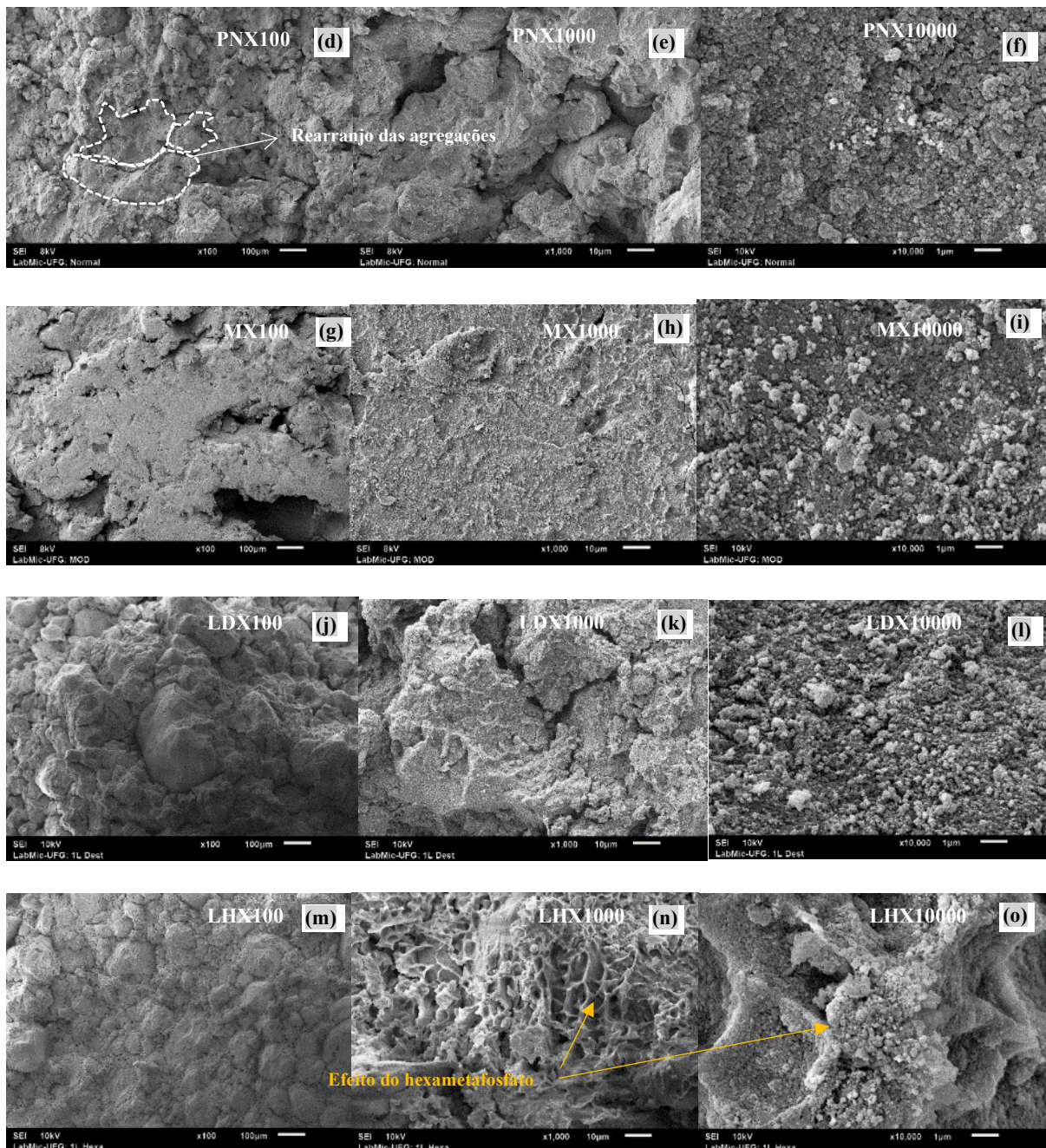


Figura 4.1 - Imagens microestruturais por MEV. a) Amostra indeformada x100 b) Amostra indeformada x1000 c) Amostra indeformada x10000 d) Proctor normal x100 e) Proctor normal x10000 f) Proctor normal x10000 g) Energia Modificada x100 h) Energia Modificada x1000 i) Energia Modificada x10000 j) Lama x100 k) Lama x1000 l) Lama x10000 m) Lama com hexametáfosfato x100 n) LH x1000 o) LH x10000.

Nota-se na amostra intacta (Figura 4.1a) a presença de agregações com bordas circulares bem como macroporos em dimensões maiores que 100 μm . Por outro lado, nas amostras compactadas (PN e M) há uma diminuição da macroporosidade (Figura 4.1d) até sua aparente eliminação (Figura 4.1g). Nas amostras reconstituídas o preenchimento dos vazios evidencia o rearranjo dos poros pelas agregações. Ademais, nas amostras reconstituídas o preenchimento

dos vazios é evidenciado por agregações que não foram destruídas no processo de preparo da amostra (Figura 4.1j) e um rearranjo nos microporos causado pelo efeito do hexametáfosfato nas amostras LH (Figura 4.1m). De uma forma geral, as micro agregações permaneceram com mesmas características nas condições indeformada (N), Proctor normal (PN), modificada (M) e lama com água destilada (LD), se alterando apenas nas amostras LH.

A análise semiquantitativa da relação de poros através da binarização das imagens é representada na Figura 4.2. As amostras caracterizadas nas ampliações de x100 e x1000 representam valores relacionados aos macroporos, visto que é a faixa de escala ao qual percebe-se essas dimensões de poros nas imagens. Por outro lado, os valores de x10000 indicam presença apenas de microporos. A partir da relação na distribuição de poros da Figura 4.2a foi possível obter os índices de vazios estimados $e = n/(1 - n)$ ao qual são apresentados na Figura 4.2b.

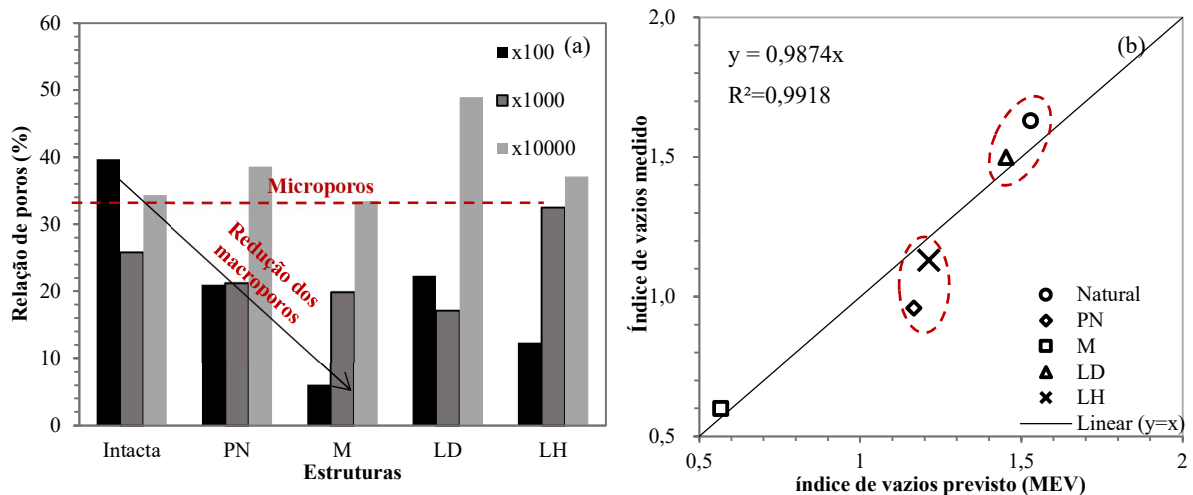


Figura 4.2 – Relação de poros do solo em estudo por MEV. a) Porosidade b) Índice de vazios estimado

Estes valores mostram-se representativos dos índices de vazios medidos em comparação com os estimados (Figura 4.2b). Percebe-se que há uma redução dos macroporos e uma manutenção dos microporos conforme há a diminuição do índice de vazios para as amostras Intacta (N), Proctor normal e Modificada. Por outro lado, as amostras reconstituídas com água destilada e defloculante apresentam índices de vazios próximos as condições N e PN respectivamente.

Esse comportamento da estrutura também é perceptível através das distribuições de poros (PSD) obtidas a partir de ensaios MIP (Figura 4.3). A PSD mostrada na Figura 4.3a evidencia os picos de macroporos e microporos com diâmetros de 92 μm e 0,025 μm para a estrutura intacta a qual é típica de solos lateríticos indeformados. Por outro lado, o processo de

reconstituição das amostras em lama (LD e LH) mostram uma diminuição nos diâmetros dos macroporos (10 e 3,8 μm). No entanto, as amostras compactadas (PN e M) exibem diâmetros de macroporos apenas para a estrutura PN (18 μm) não havendo macroporos na estrutura com energia modificada.

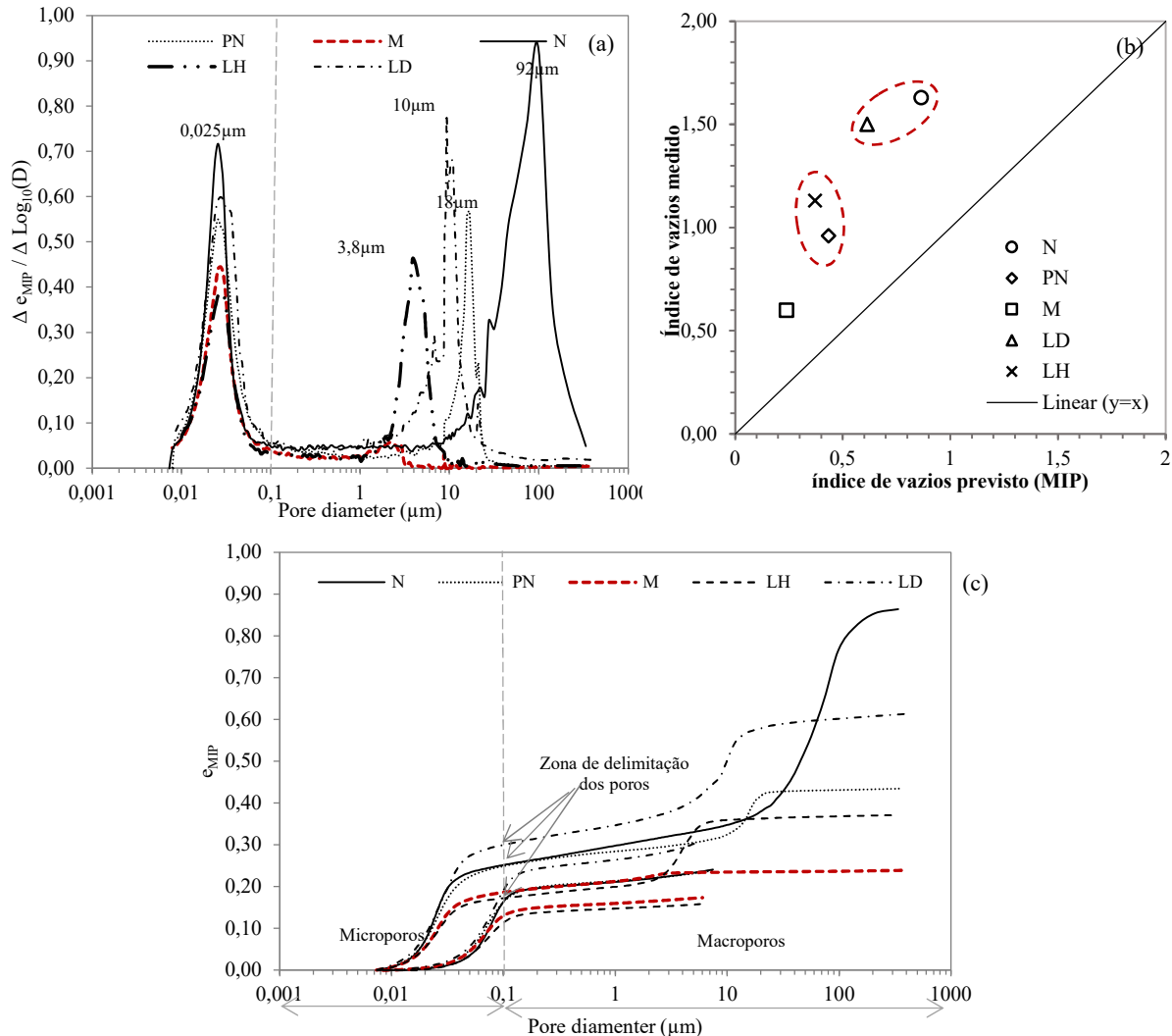


Figura 4.3 – Relação de poros do solo em estudo por MIP. a) PSD b) Índice de vazios estimado pelo medido c) Curvas de intrusão de mercúrio nos poros das amostras

A correlação dos valores medidos (massa por volume) em relação aos previstos por ensaios MIP apresenta-se na Figura 4.3b. Percebe-se que os índices encontrados se mostram subestimados devido ao próprio processo de intrusão do mercúrio na amostra que não penetram em determinados poros por causa da limitação do equipamento (Romero e Simms, 2008).

Os índices de vazios podem ser estimados pelas curvas de intrusão (Figura 4.3c) a partir da zona de delimitação (Ng *et al.*, 2016) definida como a separação entre o diâmetro relacionado ao início da entrada do mercúrio aos microporos (neste caso todos com 0,1 μm), dessa forma adota-se: e , e_{MIP} , e_{macro} , e_{micro} e e_{nd} que correspondem: (1) e , índice de vazios obtido pela

relação massa-volume; (2) e_{MIP} corresponde ao índice de vazios de intrusão cumulativo que podem ser separados em macro e micro ($e_{MIP} = e_{macro} + e_{micro}$); (3) e_{macro} índice de vazios da zona relacionada aos macroporos; (4) e_{micro} índice de vazios em relação a microporosidade; (5) por fim, e_{nd} , que equivale aos poros não detectados, assim, $e_{nd} = e - (e_{macro} + e_{micro})$. Essas relações são mostradas na Tabela 4.1 obtidas tanto para os ensaios de MIP quanto MEV.

Tabela 4.1 – Índices de vazios em relação aos ensaios de MIP e MEV

	MIP				MEV		
	e_{MIP}	e_{micro}	e_{Macro}	e_{nd}	e_{MEV}	e_{Micro}	e_{Macro}
N	0,86	0,25	0,61	0,77	1,53	0,52	1,01
LD	0,61	0,29	0,32	0,89	1,45	0,96	0,49
LH	0,37	0,17	0,20	0,76	1,21	0,59	0,62
PN	0,43	0,24	0,19	0,53	1,17	0,63	0,54
M	0,24	0,19	0,05	0,36	0,57	0,50	0,06
N (Borges, 2015)	1,40	0,4	1,00	-	-	-	-
LD (Borges, 2015)	0,90	0,4	0,50	-	-	-	-

De forma geral, verifica-se que a estrutura modificada não possui macroporos o que indica que estes foram eliminados com a energia aplicada (2648kN/m²) no processo de compactação. Por outro lado, as amostras reconstituídas apresentam uma quantidade de macroporos significativos que podem ser devido as interações químicas da argila com a água (Cotecchia and Chandler, 1997; Morais *et al.*, 2022) com índice de vazios próximo à amostra intacta (Fearon and Coop, 2000).

Com relação aos microporos, percebe-se que há uma diminuição, porém não é tão evidente quanto aos dos macroporos. Este comportamento é semelhante aos estudados por Kuhn *et al.*, (2020), Cai *et al.*, (2020) e Lopes *et al.*, (2022) porém divergem dos resultados apresentados por Delage *et al.* (1996) e Ng *et al.*, (2020a). Uma das hipóteses é que há um rearranjo das agregações, sendo estas resistentes até certo nível de carga. A partir desse limite, haveria a quebra de partículas.

Para identificar se houve certa preservação de agregação a Figura 4.4 corresponde a curvas granulométricas obtidas a partir de granulômetro a laser juntamente com o cálculo da agregação proposto por Otálvaro *et al.*, (2015). Os ensaios foram realizados com e sem uso do ultrassom a qual utilizou como referência a amostra natural (Figura 4.4a) passante na peneira de 2mm à umidade de 20% a mesma utilizada na obtenção das outras amostras. Percebe-se que a agregação relativa da amostra indeformada (41,4%) é próxima ao valor obtido da amostra reconstituída com água destilada (Figura 4.4b) o que indica que não houve desagregação total, ou seja, o processo de reconstituição com água destilada não foi suficiente para eliminar as

agregações, diferentemente da estrutura obtida por lama com hexametáfosfato que mostra uma certa redução com agregação relativa de 28,4% (Figura 4.4c).

Nas amostras compactadas percebe-se que a agregação relativa da estrutura PN (Figura 4.4d) está próxima ao valor obtido pela amostra reconstituída com hexametáfosfato, indicando que a energia aplicada no processo de compactação não destruiu as agregações. No entanto, as granulometrias obtidas através da amostra compactada na energia modificada (M) definem que não houve preservação de agregações (Figura 4.4e) e que na verdade está sendo atribuída ao comportamento das partículas em si, pois as curvas granulométricas ficaram próximas.

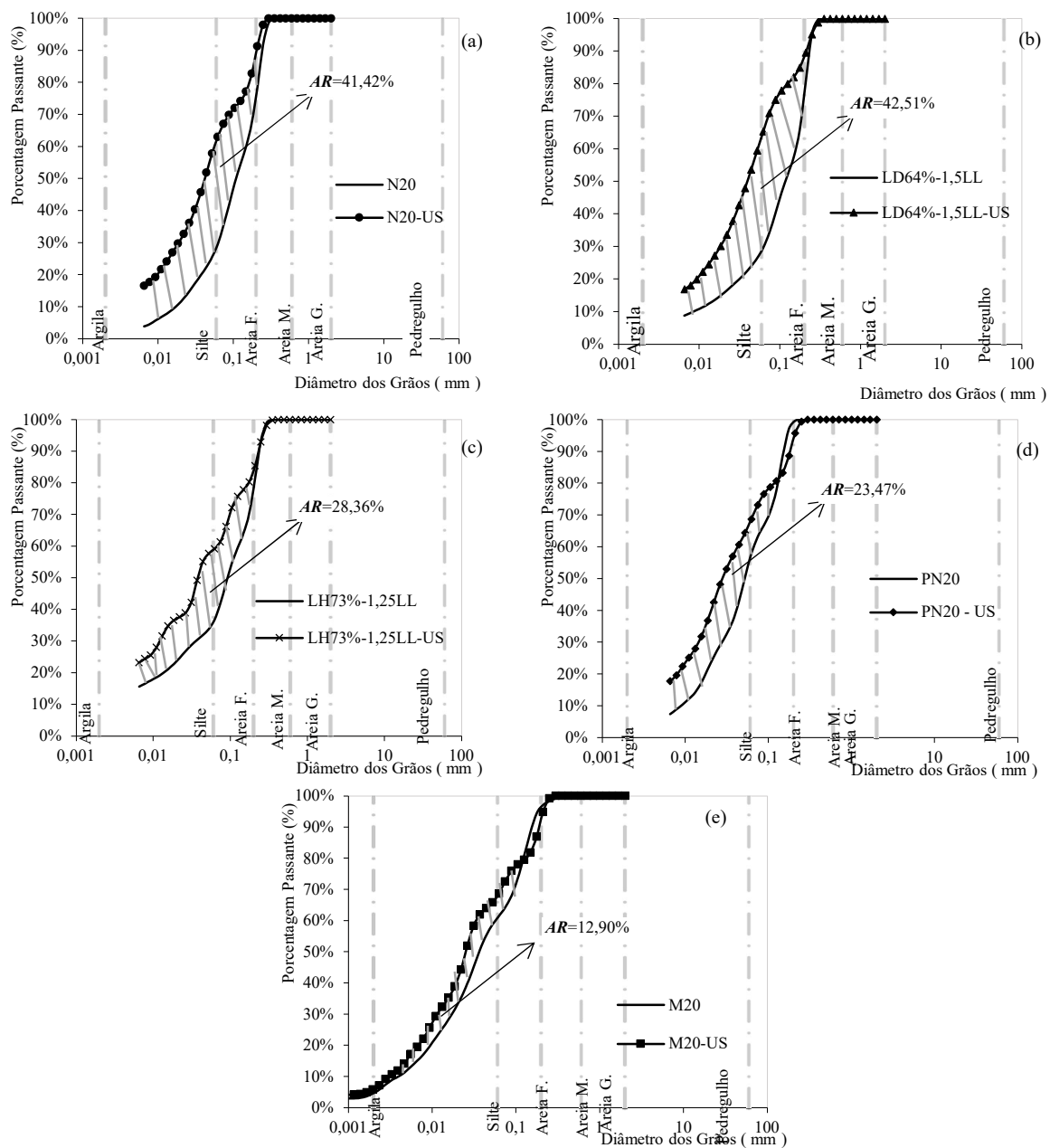


Figura 4.4 – Granulometria com ultrassom e sem ultrassom. (a) Amostra intacta passada na peneira de 2mm a 20% de umidade (b) LD (c) LH (d) PN (e) M

A Figura 4.5 corresponde aos gráficos semiquantitativos em razão da área e forma do agregado (Figura 4.5a, b), e dos poros (Figura 4.5c, d). Com relação a área dos poros e agregados verifica-se um comportamento bimodal com exceção na amostra modificada. No entanto, os resultados quanto a forma dos agregados (Figura 4.5b) indicam mais próximos das circulares com diminuição dessa proporção para as amostras que diferem da intacta. Em contrapartida, as formas dos poros caracterizam-se por menos esféricas e mais achatadas pois são observados nas maiores proporções entre 0,4 e 0,7.

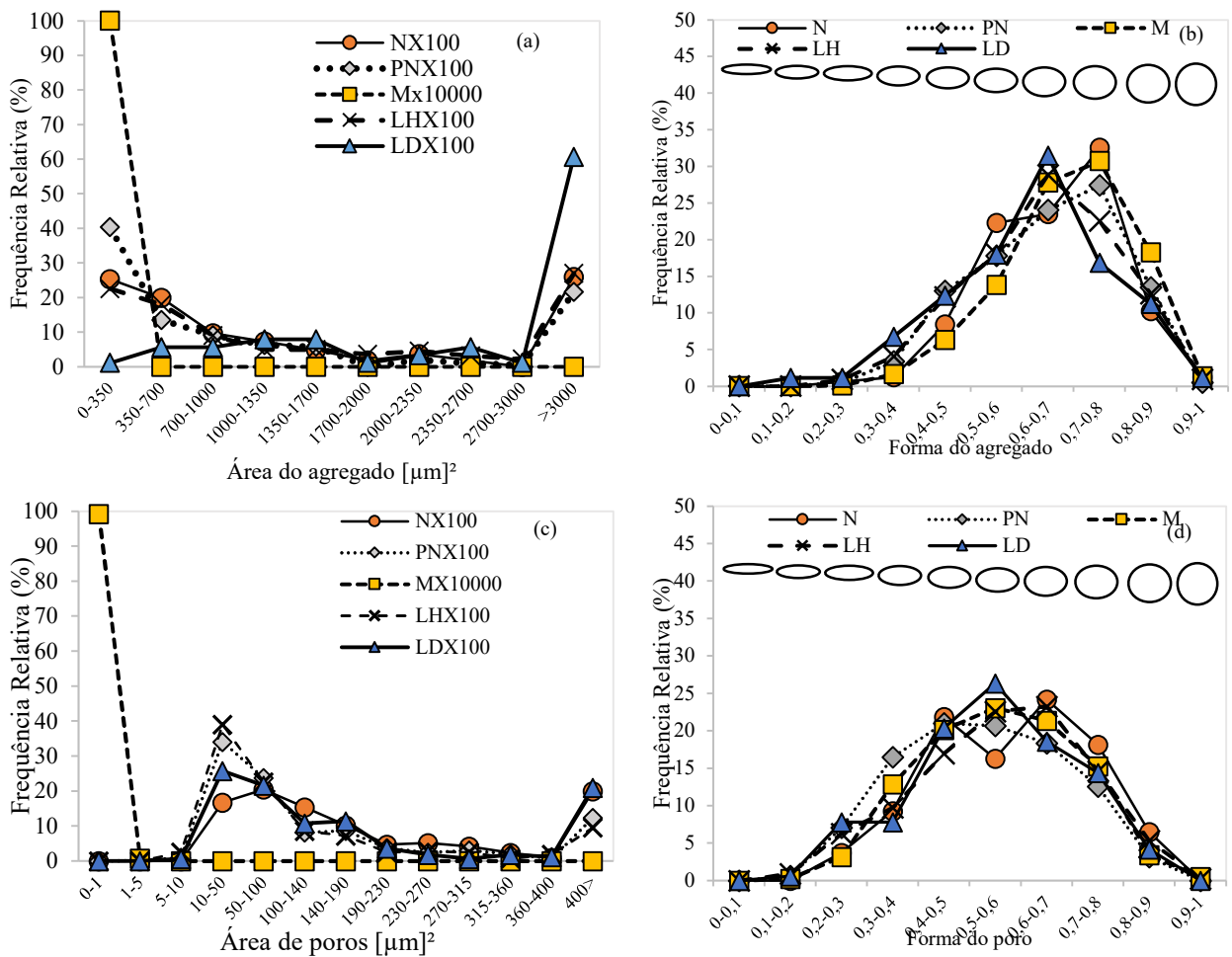


Figura 4.5 – Gráficos semiquantitativos (a) Área dos agregados (b) Forma dos agregados (c) Área dos poros (d) Forma dos poros

As Figura 4.6 e Figura 4.7 correspondem aos diagramas circulares em relação a orientação das amostras antes do carregamento quanto à agregação e poros respectivamente. Verifica-se um posicionamento das agregações (Figura 4.6a) em relação à horizontal (0° e/ou 180°) para LD e PN, que por outro lado, indica mudança de orientação ao comparar com a amostra intacta (N). Paralelamente, as amostras N e LH não possuem uma orientação preferencial.

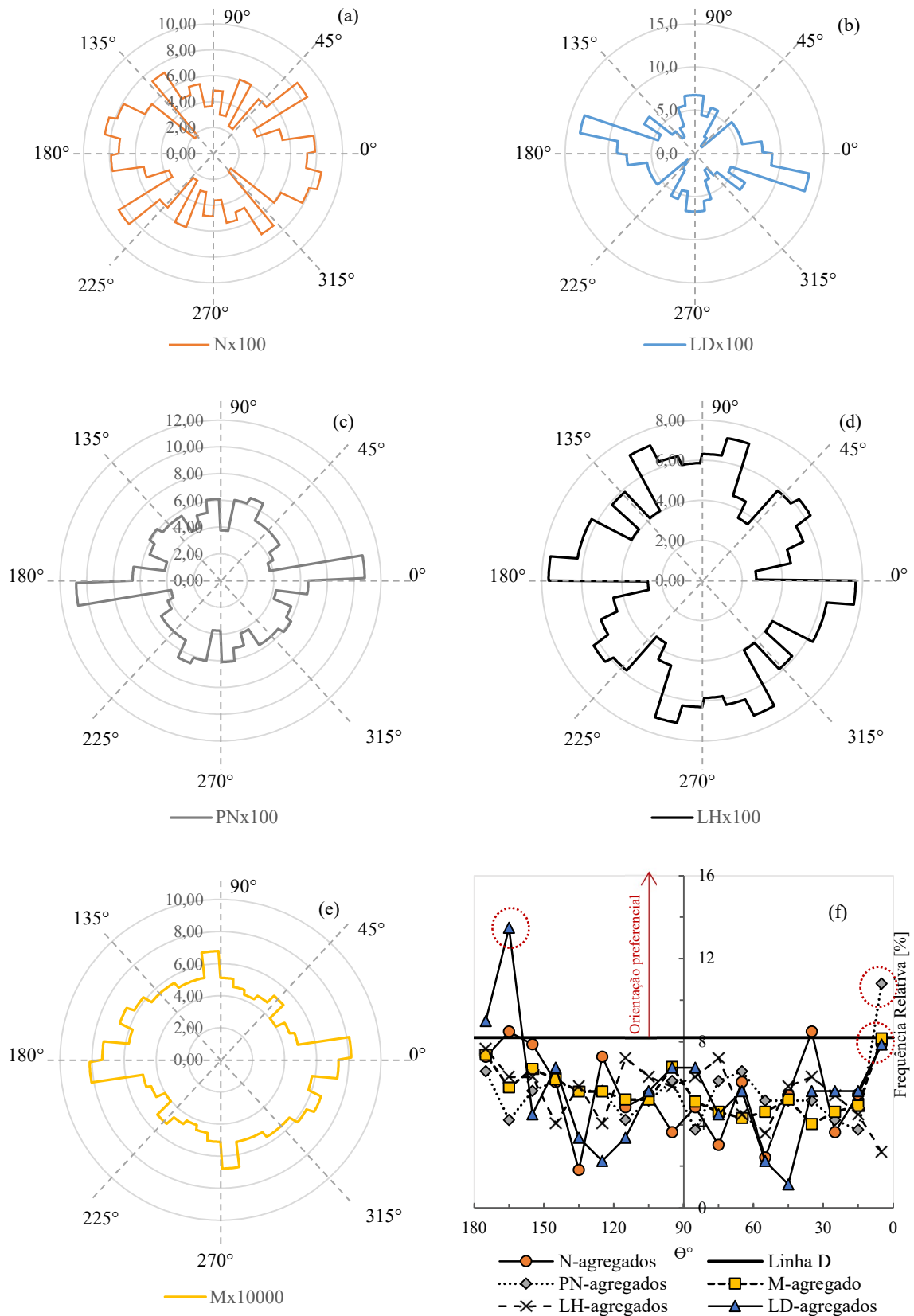


Figura 4.6 – Gráficos semiquantitativos da orientação dos agregados a) Intacta b) Reconstituída com água destilada c) Energia proctor normal d) Reconstituída com hexametáfosfato e) Energia modificada f) Frequência relativa *versus* orientação de todas as estruturas

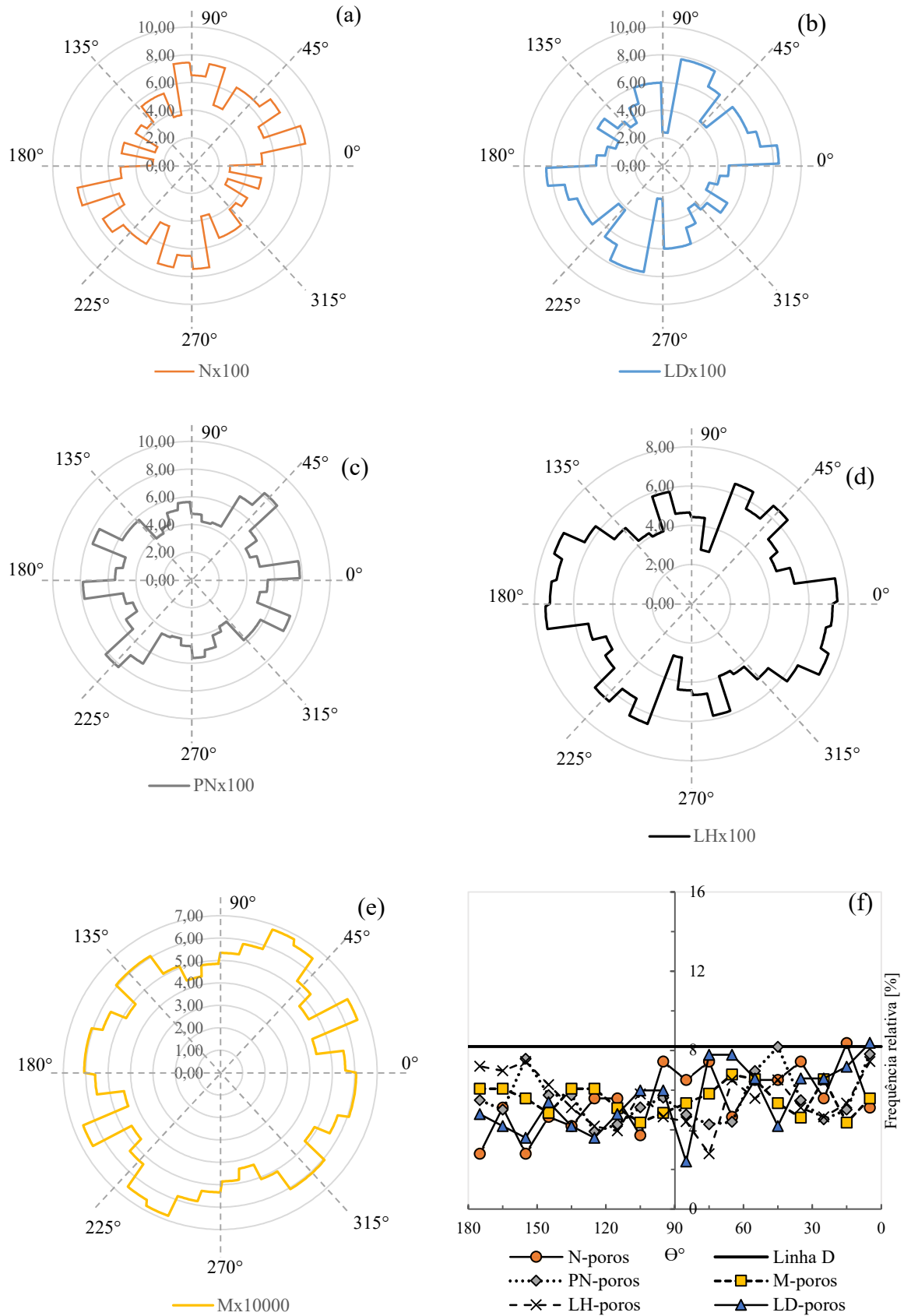


Figura 4.7 – Gráficos semiquantitativos dos poros a) Intacta b) Reconstituída com água destilada c) Energia proctor normal d) Reconstituída com hexametáfosfato e) Energia modificada f) Frequência relativa *versus* orientação de todas as estruturas

Quanto ao posicionamento das agregações percebe-se que para a amostra indeformada as variações das inclinações podem ser devidas ao processo de intemperização fazendo com que não haja uma orientação preferencial; diferentemente das amostras LD e LH que foram sedimentadas pela formação da lama, e das amostras compactadas as quais sofreram um processo lento de aplicação de energia (PN e M). No entanto, esperava-se que também as amostras com hexametáfosfato (LH) e modificadas (M) apresentassem uma orientação preferencial, ao qual é perceptível uma tendência de orientação porém não evidente que podem estar relacionadas: (1) com o efeito do hexametáfosfato na constituição da lama LH, e (2) as análises para as amostras modificadas (M) serem realizadas nas ampliações de 10000 que correspondem as micro agregações cuja sua forma é circular e isto dificulta na obtenção das orientações preferenciais.

Com relação a orientação quanto aos poros (Figura 4.7f), em todas as estruturas de análise não há uma inclinação preferencial o qual evidencia que na etapa inicial de constituição das amostras a forma do poro não sugere uma orientação evidente.

De uma forma geral, alguns estudos como de Delage *et al.*, (1996), Romero *et al.*, (2016), Ng *et al.*, (2016) e Cheng *et al.*, (2020) mostram que com o processo de compactação as amostras inicialmente no ramo seco apresentam comportamento bimodal com agregações (com macroporos e microporos evidentes), ou seja, as partículas de argila se aglomeram formando agregados, no entanto com o aumento da umidade e/ou energia essa estrutura vai de aglomerada para dispersa com aumento de microporos e exclusão total dos macroporos resultando em uma estrutura unimodal.

Como se pode observar a estrutura do solo indeformado neste estudo é bimodal o qual caracteriza uma microestrutura com macroporos (poros interagregados) e microporos (poros intra-agregados). Com o processo de compactação, na amostra PN o que se percebe é a redução e rearranjo da agregação com diminuição significativa de macroporos e continuação de uma estrutura bimodal.

As amostras modificadas (M) não apresentam agregações, e a distribuição de poros juntamente com as curvas granulométricas levam a entender que somente há microporos e micro agregações, caracterizando assim uma estrutura unimodal. Ademais, ao comparar com os microporos das amostras N, PN, LD e LH percebe-se que houve redução significativa, com exceção das amostras LH onde os microporos se equivalem a M (Figura 4.3a).

De acordo com Alonso *et al.*, (2013) uma variável microestrutural pode ser adotada (ξ_m) para quantificar e descrever a microestrutura do solo (equação 4.0).

$$\xi_m = \frac{e_{micro}}{e} \quad (4.0)$$

onde, e corresponde ao índice de vazios total medido e e_{micro} corresponde ao índice de vazios com relação a microestrutura. Assim, o índice de vazios seria o somatório do e_{micro} e e_{macro} a qual corresponde a parte referente aos macroporos. Dessa forma, a Tabela 4.2 corresponde aos índices de vazios e variável microestrutural obtidos em relação a massa/volume da amostra (ξ_{mi} , ξ_{macro}) e a partir de ensaios MIP (ξ_m , ξ_{macro}), bem como a agregação relativa para cada estrutura (AR). Assumiu-se que os valores de microporos da amostra modificada são os valores de referência sendo os valores de macroporos calculados como a diferença entre o índice de vazios total e os valores de microporos.

Tabela 4.2 – Índices de vazios discretizados, variável microestrutural e agregação relativa

	e			ξ_{mi}	ξ_m	ξ_{macro}	ξ_{macro}	AR
	e_{Total}	e_{micro}	e_{Macro}					
N	1,63	0,60	1,03	0,37	0,29	0,63	0,71	41,42
LD	1,50	0,60	0,90	0,40	0,47	0,60	0,53	42,51
LH	1,13	0,60	0,53	0,53	0,46	0,47	0,54	28,36
PN	0,96	0,60	0,36	0,63	0,55	0,38	0,45	23,47
M	0,60	0,60	0,00	1,00	0,80	0,01	0,20	12,9

A Figura 4.8 representa os gráficos em relação a variável microestrutural e agregação relativa. Percebe-se que quanto menor é a agregação relativa maior é variável microestrutural (Figura 4.8a). Assim, ao considerar que os microporos não se alteram ($e=0,6$) se verifica a relação direta entre AR e e_{Macro} (Figura 4.8b).

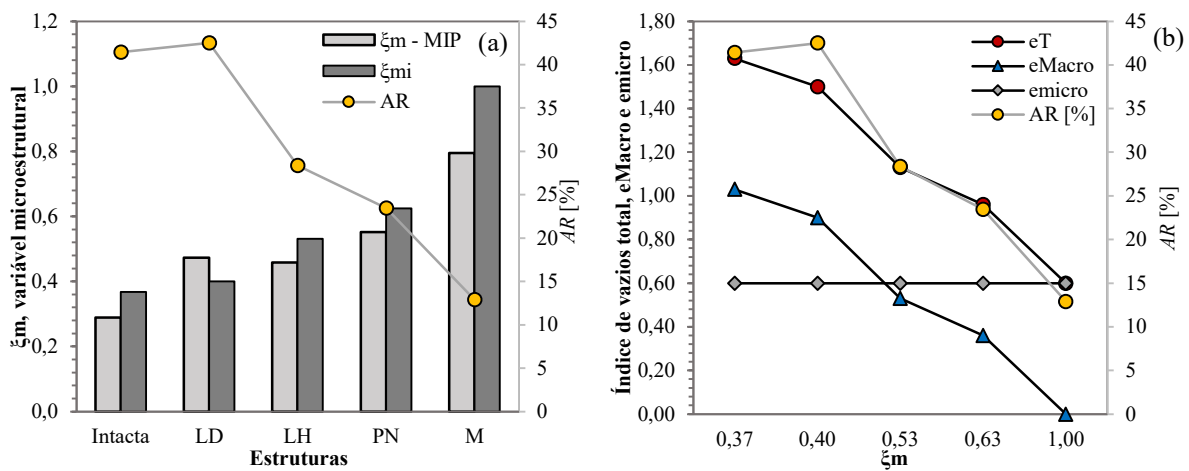


Figura 4.8 – A evolução microestrutural para as diferentes estruturas a) Relação entre ξ_m e AR b) Relação entre índice de vazios, ξ_m e AR

4.2 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E ESTRUTURA

As curvas de retenção das diferentes estruturas na condição intacta (N), compactadas no ramo Proctor normal (PN), Modificado (M), Lama com água destilada (LD) e Lama com hexametáfosfato de sódio (LH) são apresentadas na Figura 4.9, essas curvas são representadas na relação entre umidade gravimétrica (%) e sucção (kPa). Os ajustes obtidos são baseados nas propostas de Durner (1994) os quais são utilizados em ajustes bimodais para amostras no processo de secagem. Os parâmetros são apresentados na Tabela 4.3 e definidos pela equação (4.1):

$$w = \frac{w_w^L}{\left[1 + (a_L \cdot S)^{n_L}\right]^{1-1/n_L}} + \frac{w_w^S}{\left[1 + (a_S \cdot S)^{n_S}\right]^{1-1/n_S}} \quad (4.1)$$

onde, onde, a e n = são parâmetros de ajuste, os sufixos L e s para grande e pequeno poro, S é a sucção.

Nessa análise (Figura 4.9), a amostra indeformada (N) apresenta uma umidade gravimétrica de 45% e valor de entrada de ar (VEA) de 4 kPa de sucção. Com a diminuição do índice de vazios, devido ao processo de compactação, há o aumento do valor de entrada de ar, e percebe-se a perda da forma bimodal inicial. A bimodalidade também é reduzida com o processo de reconstituição, apesar do aumento do índice de vazios inicial. Estas características podem estar relacionadas com a diminuição de agregação e conseqüentemente modificação da distribuição de macroporos. No entanto, em termos de microporos, constata-se pouca modificação devido à proximidade das curvas a partir de 2000 kPa. Por outro lado, os dados que correspondem a amostra com energia modificada indicam uma curva com perda de bimodalidade, que podem representar a atuação referente aos microporos.

Tabela 4.3 – Parâmetros de ajustes de Durner (1994) em relação a umidade *versus* sucção

	w_L	a_L	n_L	m_L	ws	as	ns	ms	R^2
N	22,5	0,13	3,73	0,55	22,4	0,00012	2,92	0,61	0,99
PN	12,5	0,17	4,10	0,56	22	0,000089	2,62	0,61	0,99
M	1,75	0,05	5,00	0,56	18,75	0,000049	2,92	0,75	0,92
LD	33	0,16	0,65	0,57	22	0,00012	2,92	0,61	0,99
LH	19,7	0,06	2,10	0,5	16	0,000089	2,62	0,61	0,89

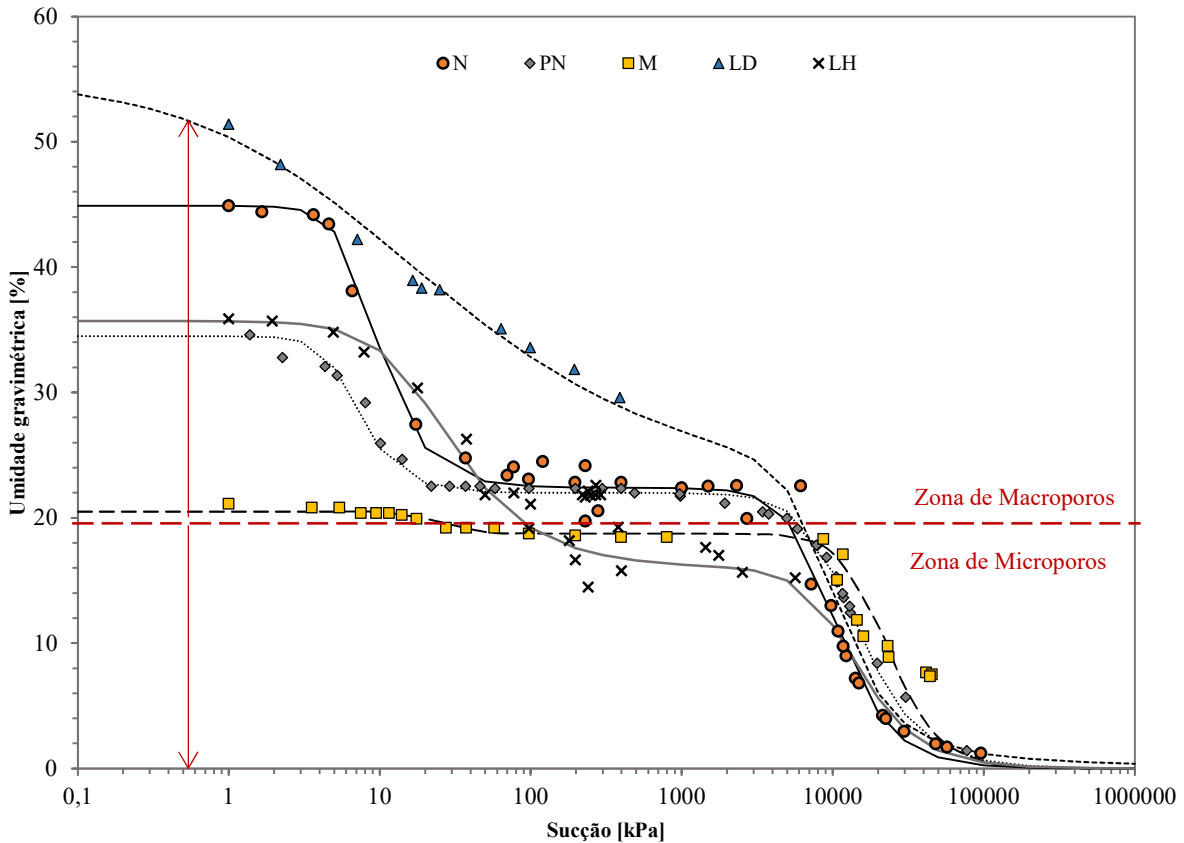


Figura 4.9 – Curvas de retenção característica nas condições N, PN, M, LD e LH.

O comportamento prévio da estrutura pode ser identificado a partir da análise das curvas de retenção (Otálvaro *et al.*, 2016; Ng *et al.*, 2016; Kuhn *et al.*, 2020). Nesse sentido, são apresentadas as SWCC das amostras ensaiadas empregando o índice de água ($e_w = V_w/V_s$) com o ajuste da proposição de Durner (1994). A partir desse ajuste foi possível prever a distribuição de poros (PSD) em relação a sucção através da derivada da função (equação 4.2).

$$PSD = \frac{\Delta e_w}{\log(\Delta s)} \quad (4.2)$$

onde: Δe_w é a variação do índice de água em um ponto; Δs = variação da sucção inicial e final. A curva de injeção de ar acumulada pode ser obtida a partir da curva característica do índice de ar definida pelo complemento do vazio total da amostra e índice de água (equação 4.3).

$$e_a = e + e_w \gg e_{nw} \quad (4.3)$$

onde: e_a = índice de ar (V_a/V_w); e = índice de vazios da amostra; e_{nw} = tensão superficial do líquido não molhante. A partir da analogia da curva característica de ar (Prapaharam *et al.*, 1985) com ensaios de intrusão de mercúrio no poro (equação 4.4), possibilitou definir a faixa de poros a qual a estrutura pertence, sendo:

$$u_a - u_w = \frac{4\sigma_w \times \cos(\theta_w)}{D} \quad (4.4)$$

onde: $(u_a - u_w)$ é a sucção mátrica; σ_w = tensão superficial na interface ar/água (0,0728N/m); θ_w = ângulo de contato entre meio poroso e a água, assumido 0° neste trabalho conforme Otálvaro (2013).

A Figura 4.10 corresponde as curvas características em relação ao índice de água e a PSD prevista em relação à sucção do solo. De uma forma geral, percebe-se que a estrutura bimodal foi observada no solo natural ($e=1,63$), e com a diminuição do índice de vazios há variação na área destinada aos macroporos, indicando pouca variação nos microporos. Há um comportamento perceptível nos picos das PSD que indicam coincidência com o ponto de inflexão da SWCC, tanto para a região de macroporos quanto para os microporos.

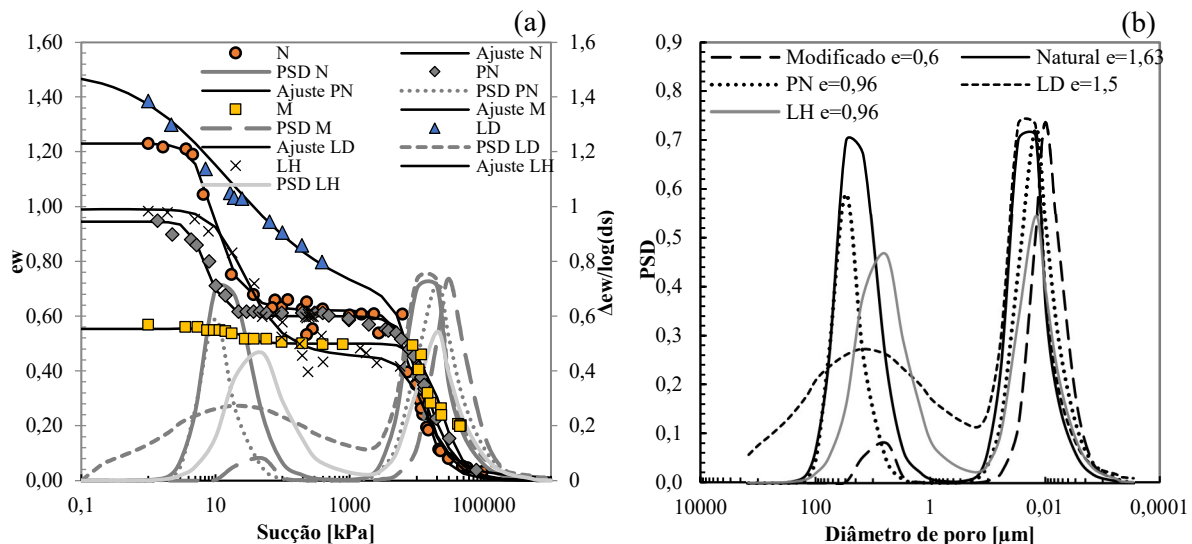


Figura 4.10 – Curvas de índice de água e previsão de PSD para solo. (a) Índices de água (b) Previsão da distribuição de poros

As distribuições de poros obtidas a partir das SWCC evidenciam interdependência entre o comportamento hidráulico e a microestrutura tanto que as PSD medidas a partir dos ensaios MIP em relação as previstas pela SWCC (Figura 4.11) apresentam formas equivalentes. No entanto, apenas os valores que representam o início dos microporos foram os que se apresentam mais próximos aos medidos (Figura 4.11a). Os estudos de Otálvaro *et al.*, (2016) mostram que o comportamento das distribuições de poros obtidas a partir da SWCC não coincidem totalmente devido a não consideração da contração das amostras.

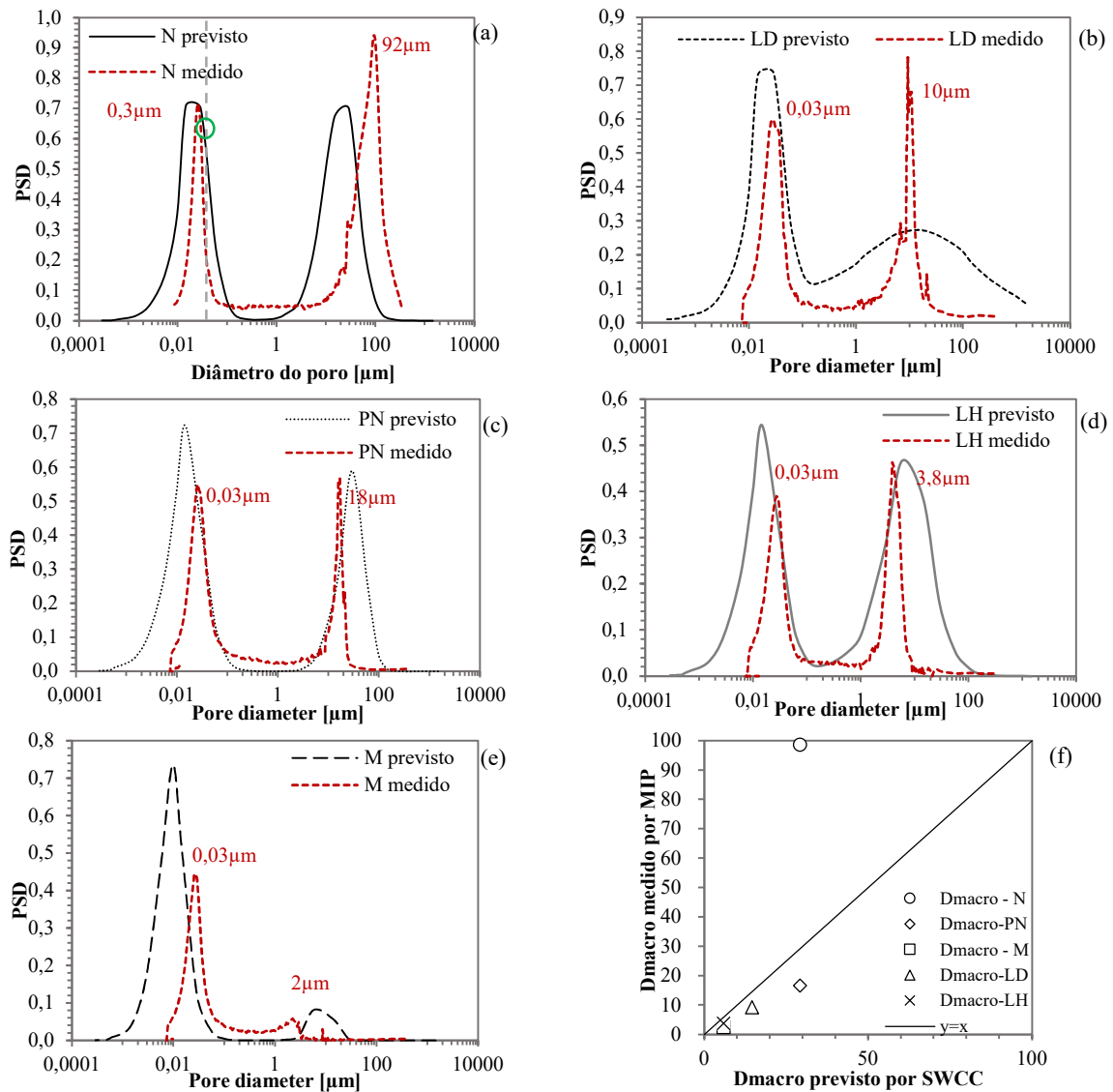


Figura 4.11 – PSD medidas e previstas. a) N b) LD c) PN d) LH e) M f) D_{macro} previsto *versus* D_{macro} por MIP

Quando se analisa em termos de poros dominantes da macroestrutura (D_{macro} - Figura 4.11) verifica-se que os valores previstos *versus* os medidos se apresentam próximos da linha $y=x$ (com exceção da amostra intacta). De uma forma geral, as diferentes estruturas apresentam diâmetro de microporos iguais ($0,03\mu m$) onde o valor de entrada de ar corresponde a sucções atuantes entre 13000 e 15000 kPa.

4.2.1 ANÁLISE DA VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA A PARTIR DAS CURVAS DE CONTRAÇÃO

O solo indeformado estudado apresenta-se com respectivos índices de vazios que variam entre 1,50 e 1,70 (Silva, 2009; Otálvaro, 2013; Borges 2015; Burgos, 2016). Assim, este item

tem como objetivo analisar as variações volumétricas e relacioná-las com as diferentes estruturas (N, PN, M, LD e LH) a partir das curvas de contração.

As Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 representam os gráficos obtidos a partir das curvas de contração por molhagem e secagem das amostras, estas por sua vez foram relacionadas com a sucção do solo com base na SWCC e assim se formaram gráficos com referência aos índices de vazios (e), umidade volumétrica (θ) e saturação (S_r).

As respostas das curvas de contração nas amostras intactas (N) apresentam-se na Figura 4.12. Percebe-se que a umidade em relação ao índice de vazios (Figura 4.12a) atua no sentido de que não há aumento do índice de vazios com o aumento de umidade. Ademais, ao analisar a umidade volumétrica (Figura 4.12c), saturação (Figura 4.12d) é possível perceber uma histerese o que pode estar relacionada a própria variação do solo e estrutura macroporosa (Ng *et al.*,2016).

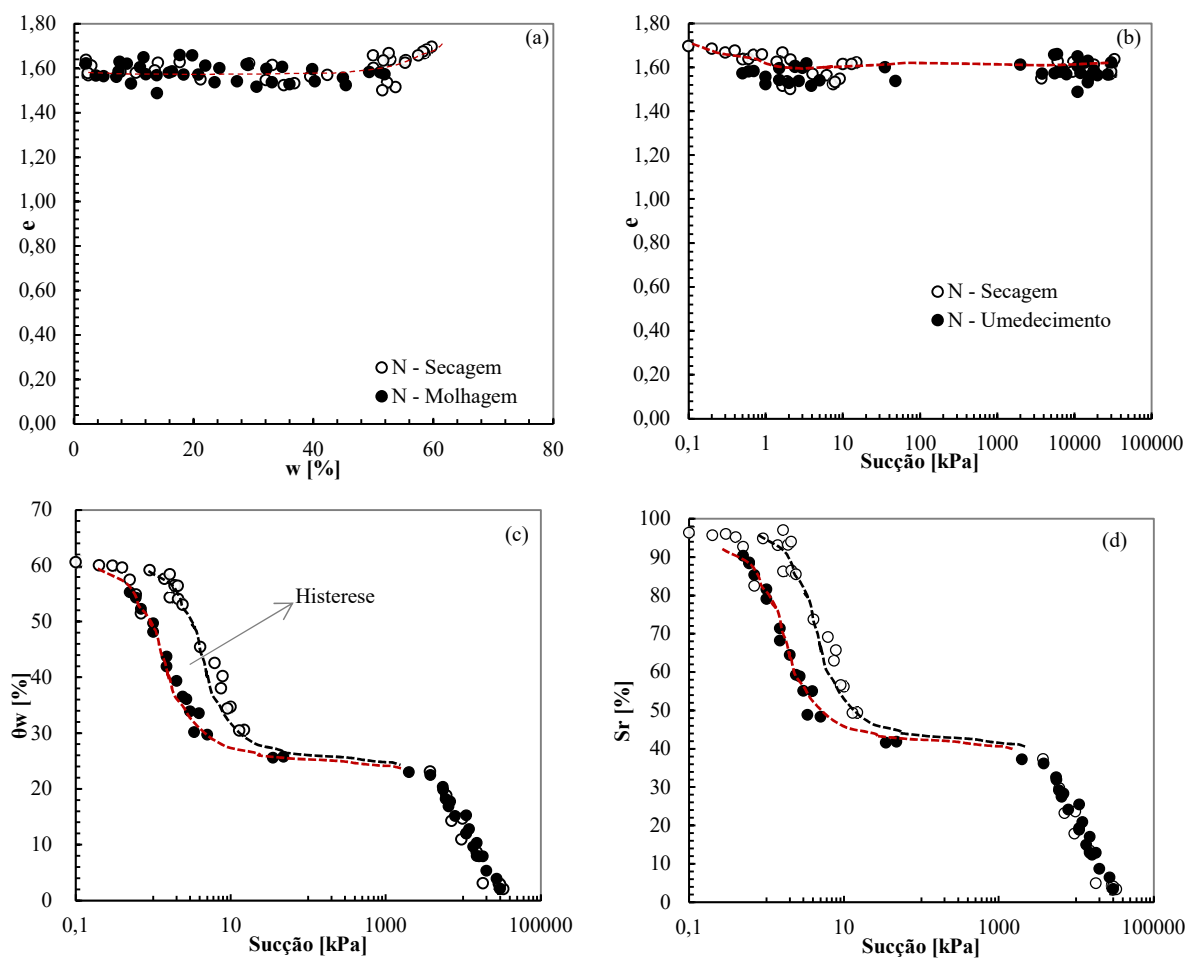


Figura 4.12 – Curvas de contração da amostra indeformada (N) (a) Índice de vazios *versus* umidade (b) Índice de vazios *versus* sucção (c) Umidade volumétrica (d) Grau de Saturação

A Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos da amostra compactada com a energia de Proctor normal (PN). Ao analisar a relação entre e e umidade percebe-se que assim como a amostra N não há variação do índice de vazios. Ademais, a umidade volumétrica da amostra PN apresenta valor de 50% de saturação indicando tanto uma redução na histerese quanto na umidade de saturação em relação às amostras intactas. A amostra M (Figura 4.14a e b), da mesma forma que PN e N, também não apresenta um comportamento de recuperação do índice de vazios com o processo de molhagem.

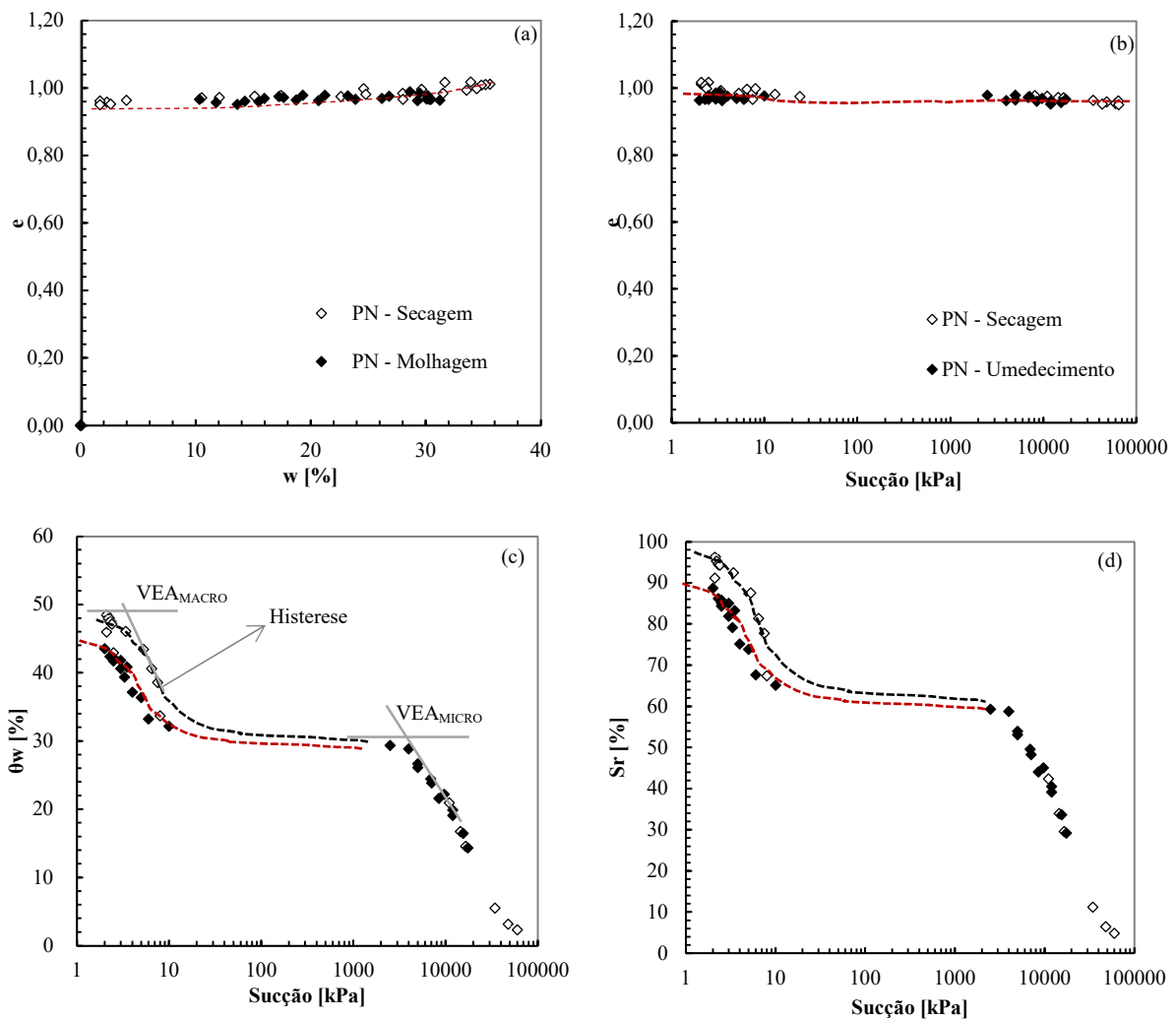


Figura 4.13 – Curvas de contração da amostra Proctor normal (PN) (a) Índice de vazios *versus* umidade (b) Índice de vazios *versus* sucção (c) Umidade volumétrica (d) Grau de Saturação

Em relação as curvas volumétricas (Figura 4.14c) e de saturação (Figura 4.14d) das amostras modificadas (M) percebe-se um comportamento com uma tendência unimodal. De uma forma geral, as curvas volumétricas e de saturação na amostra M indicam um

comportamento congruente a região do valor de entrada de ar dos microporos para as amostras PN e intacta (N).

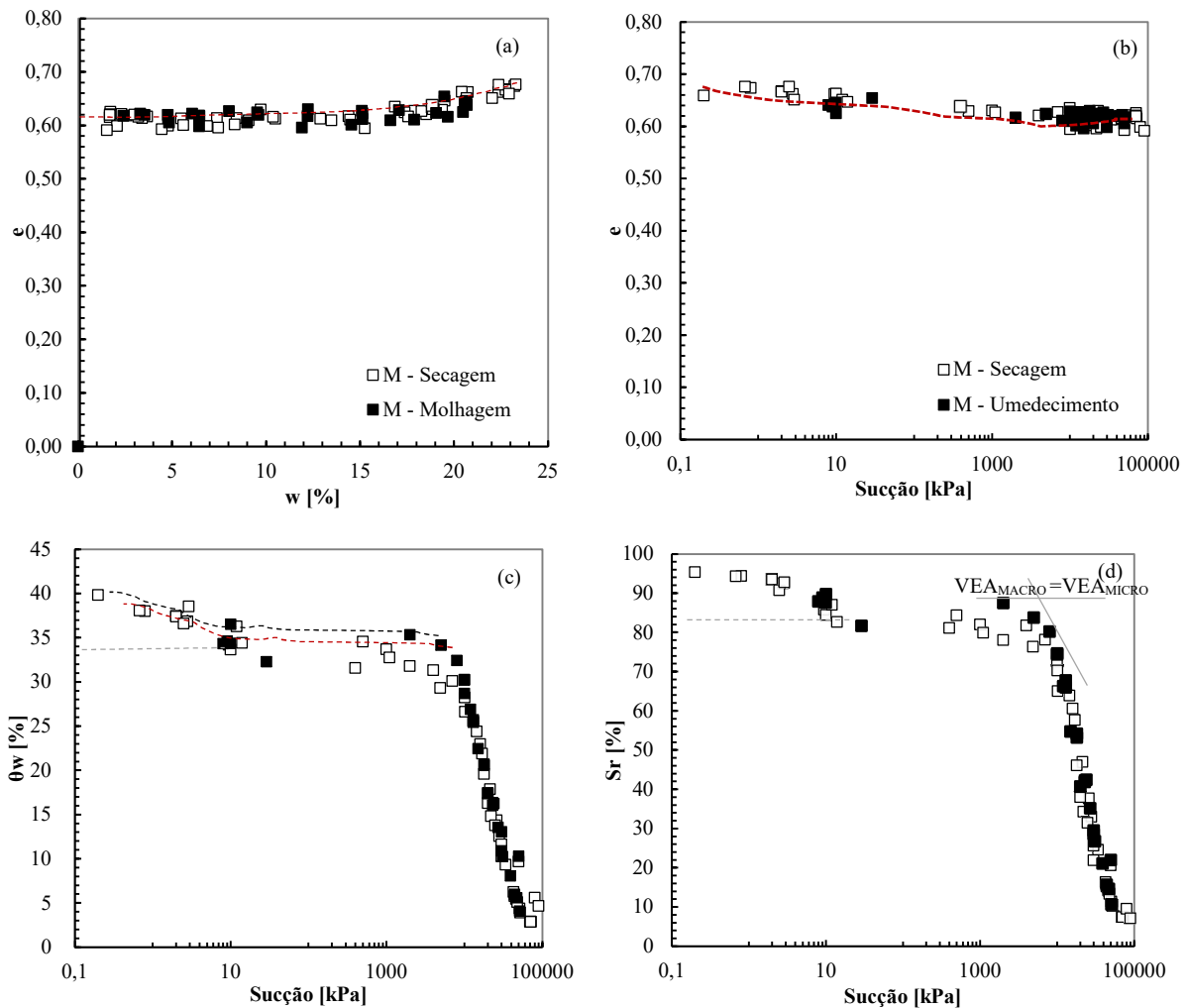


Figura 4.14 – Curvas de contração da amostra com energia modificada (M) (a) Índice de vazios *versus* umidade (b) Índice de vazios *versus* sucção (c) Umidade volumétrica (d) Grau de Saturação

Observa-se nas amostras reconstituídas (LD e LH) que a maior variação do índice de vazios se encontra em sucções baixas (Figura 4.15b e Figura 4.16b) onde se apresentam os poros de diâmetros maiores (macroporos), no entanto, como essas amostras não foram consolidadas, com o processo de secagem houve o adensamento natural com modificação da estrutura com variação de índice de vazios de 1,6 para 0,9 nas amostras LD e de 1,0 para 0,6 nas amostras LH.

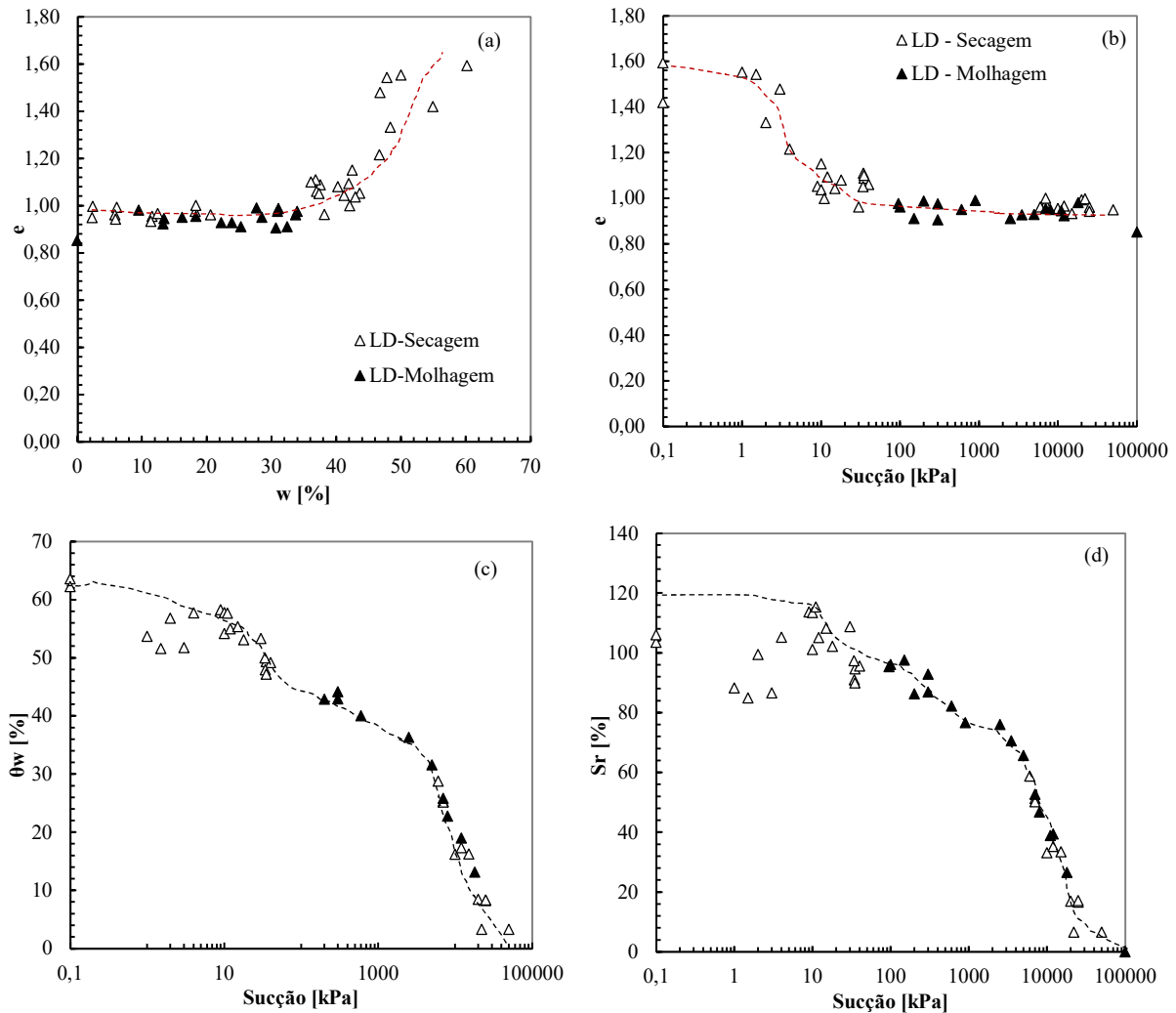


Figura 4.15 – Curvas de contração da amostra reconstituída com água destilada (LD) (a) Índice de vazios *versus* umidade (b) Índice de vazios *versus* sucção (c) Umidade volumétrica (d) Grau de Saturação

Apesar da estrutura LH apresentar o mesmo índice e peso específico da amostra PN ($e=0,96$) os processos de moldagens exibem comportamentos distintos em termos de variação volumétrica. Estes resultados podem ser atribuídos a orientação das partículas, onde nas amostras compactadas estão dispostas em agregações com certa orientação (Figura 4.1) e nas amostras reconstituídas há diminuição das agregações e formação de partículas dispersas. Estes resultados também se apresentam consoantes com estudos de Cai *et al.*, (2020).

A Tabela 4.4 corresponde aos máximos valores encontrados de índices de vazios no processo de molhagem e secagem, com esses dados foi possível verificar a deformação volumétrica entre as amostras. Nota-se que as maiores deformações ocorreram nas amostras reconstituídas (entre 0,38 e 0,43) e as menores nas amostras compactadas (entre 0,03 e 0,06). Ademais, se verifica que o processo de secagem das amostras LH possibilitou se igualar ao índice de vazios da amostra compactada por energia modificada (M).

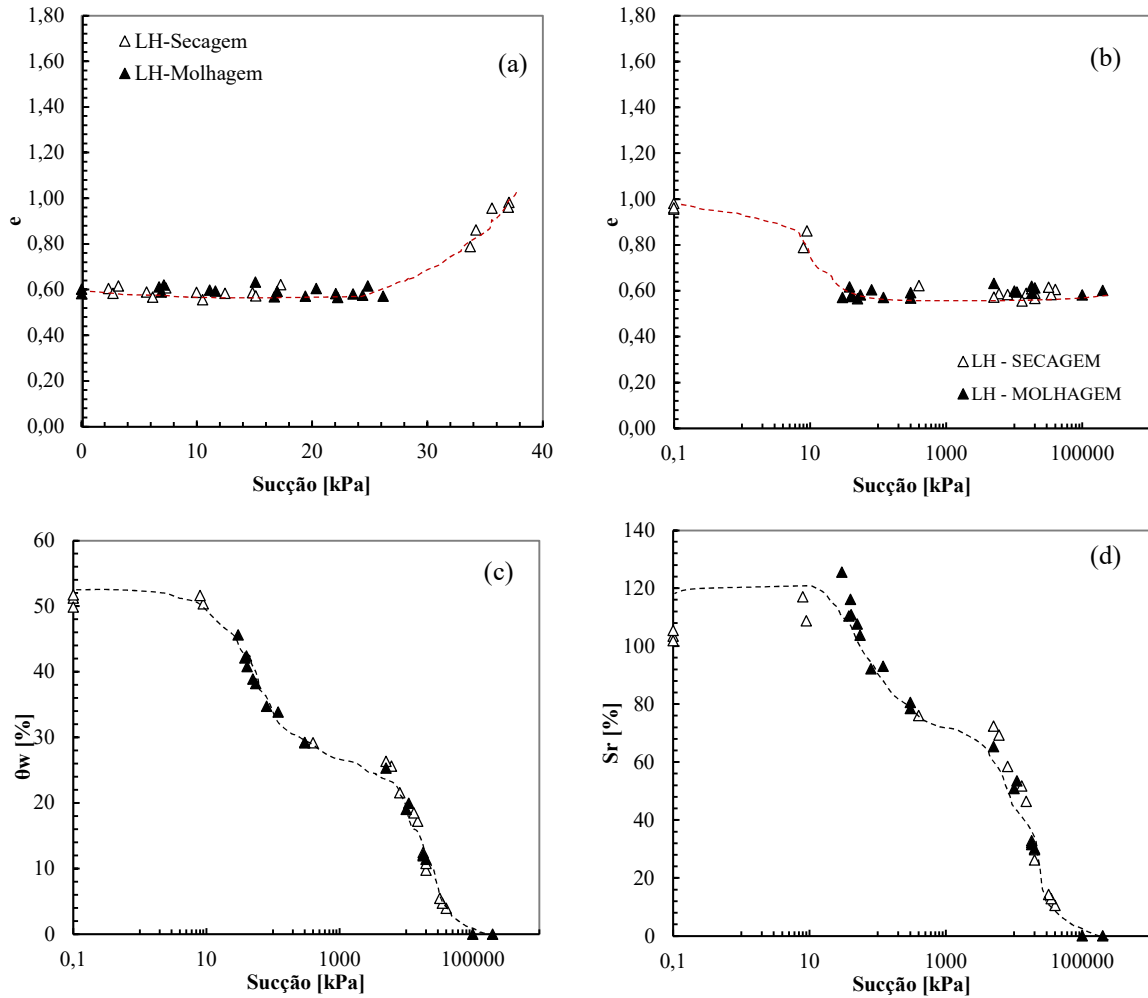


Figura 4.16 – Curvas de contração da amostra com energia modificada (M) (a) Índice de vazios *versus* umidade (b) Índice de vazios *versus* sucção (c) Umidade volumétrica (d) Grau de Saturação

Tabela 4.4 – Dados de índices de vazios e deformação volumétrica

Amostra	e_{sat}	e_{final}		ϵ	
		secagem	molhagem	secagem	molhagem
N	1,70	1,50	1,60	0,12	0,06
LD	1,59	0,93	0,99	0,41	0,38
LH	0,98	0,56	0,57	0,43	0,42
PN	1,02	0,95	0,99	0,06	0,03
M	0,68	0,59	0,60	0,12	0,12

Para entender o comportamento das diferentes estruturas com a sucção a Figura 4.17 corresponde a relação da deformação volumétrica (ϵ) com o aumento de sucção. A deformação volumétrica (ϵ) foi obtida com os valores dos índices de vazios (na secagem) para cada sucção e relacionados com e_{sat} . Ao analisar a deformação volumétrica com o aumento de sucção (Figura 4.17) verifica-se que a amostra intacta (N) possui uma deformação de pico no momento

que satura (sucção de 1 kPa) e em seguida essas deformações são pequenas e seguem em diminuição. Por sua vez, nas amostras reconstituídas as maiores deformações se encontram entre 5 e 20 kPa de sucção com estabilização de deformação para as amostras com hexametáfosfato e aumento para a LD. Ademais nas amostras compactadas há certo crescimento linear de tal forma que a deformação máxima acontece em sucções maiores que 2000kPa.

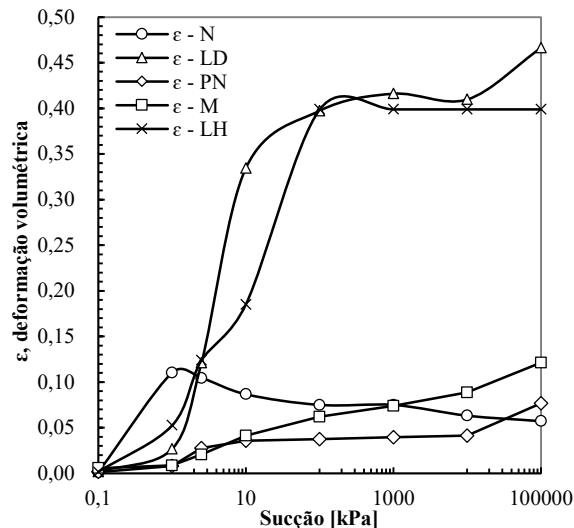


Figura 4.17 – Deformação volumétrica versus sucção no processo de secagem

4.2.2 PERMEABILIDADE E ESTRUTURA

A Figura 4.18 corresponde aos resultados obtidos de permeabilidade na condição saturada para cada amostra estudada na temperatura de 20°C. Percebe-se na Figura 4.18a a relação entre o volume percolado e as permeabilidades as quais se verificam os k_{sat20} das amostras indeformadas (N) de $5,0 \times 10^{-10}$ m/s, da Proctor normal ($5,0 \times 10^{-8}$ m/s), da lama com água destilada ($5,0 \times 10^{-9}$ m/s), da LH de $1,5 \times 10^{-10}$ m/s, e, por fim a amostra M com $2,84 \times 10^{-10}$ m/s.

De uma forma geral os estudos (Mitchell *et al.*, 1965; Yuan *et al.*, 2018) mostram que a macroporosidade e microporosidade efetivamente atua na permeabilidade. Sendo assim os resultados também são apresentados entre k_{sat20} e a relação V_p/V_v (volume percolado por volume de vazios) (Figura 4.18b).

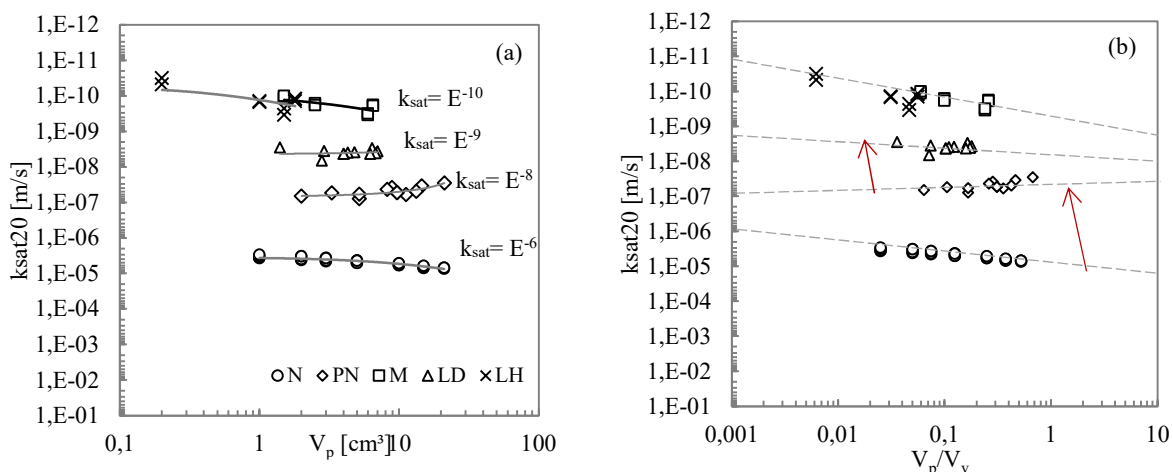


Figura 4.18 – Permeabilidade saturada para as diferentes amostras. (a) k_{sat} versus V_p (b) k_{sat} versus V_p/V_v

Ao comparar as estruturas com a permeabilidade verifica-se que as amostras intactas apresentam a maior permeabilidade, em seguida PN, LD e por fim uma congruência de valores entre LH e M. Estes resultados evidenciam a influência da macroporosidade e da orientação das agregações bem como partículas nas diferentes amostras onde a água flui principalmente nos macroporos, em seguida nas partículas dispersas e assim até certo ponto nos microporos.

As amostras compactadas no ramo úmido tendem a resultar uma menor permeabilidade do que compactada no ramo seco na mesma densidade, e assim podem ser explicadas pela quantidade de agregações formadas (Lambe, 1958; Mitchell *et al.*, 1965). Deste modo é o que se percebe no comportamento ao comparar entre as amostras M e LH, bem como LD e N. De certa forma o processo de reconstituição reduziu as agregações e formou material coloidal entre os macroporos, e assim dificultou a percolação de água entre os vazios dos poros resultando em permeabilidades menores mesmo com macroporos evidentes.

4.3 RESUMO

Este capítulo mostrou uma investigação experimental, inicialmente com a análise microestrutural do solo laterítico em termos quantitativos, semiquantitativos e qualitativos. Essa análise inicial permitiu relacionar aspectos estruturais com o comportamento hidráulico a partir das curvas características de retenção, curvas de contração por molhagem e secagem e por fim permeabilidade do solo.

Inicialmente, os ensaios MIP e MEV mostraram macroporos e microporos evidentes (92 μ m e 0,03 μ m) com orientação aleatória das agregações para as amostras intactas. No entanto, com a compactação percebeu uma redução na agregação relativa com possível

rearranjo que mostraram diminuição nos macroporos nas amostras PN até total oclusão como verificado nas amostras com energia modificada (M). Paralelamente, o processo de reconstituição evidenciou ainda existência de agregações, porém possível material coloidal disperso com água e com certa apresentação de bimodalidade nas curvas características retenção.

De uma forma geral, as curvas de contração apresentam comportamento distinto entre as amostras reconstituídas, intactas e compactadas. Esses comportamentos evidenciam o efeito da microestrutura. Nas amostras intactas a alta histerese se deve aos macroporos evidentes o qual juntamente com as agregações que estão dispostas de forma randômica provocam essa variação que conseqüentemente também se aplicam aos microporos. Essa associação também pode ser verificada nas amostras compactadas M e PN as quais possuem menores valores de histerese, bem como a amostra LH que em sucções maiores que 10000 kPa apresentam índices de vazios próximos a amostra M, ou seja, houve redução significativa de macroporos.

As deformações volumétricas, por outro lado, podem indicar que esses resultados são consequência do processo de moldagem que diminuem as agregações, aumentam as partículas disponíveis na água (colóides). Por exemplo, nas amostras intactas há aumento de deformação até certo ponto (1 kPa) que pode ser atribuído ao colapso fruto da saturação e assim rompimento das fracas cimentações, a partir desse momento as deformações diminuem o que demonstram que a sucção está atuando nas agregações. As amostras reconstituídas, por outro lado, mostram maiores deformações volumétricas devido ao material disperso na água formado com a diminuição de agregação. Por fim, o processo de compactação evidencia o surgimento de certa cimentação que atuam de forma progressiva na deformação volumétrica com o aumento de sucção.

5 QUANTIFICAÇÃO DA ESTRUTURA BIMODAL NA COMPRESSIBILIDADE A PARTIR DO ACRÉSCIMOS DE TENSÕES

Sabe-se que a compressibilidade é um aspecto fundamental do comportamento dos solos, se tratando de problemas geotécnicos as análises são sempre embasadas nestes conceitos sendo estes ligados ao histórico de tensões, formação, mineralogia e estrutura do solo (Gens e Anova, 1993; Alonso *et al.*, 2013; Mendonza e Farias, 2020). No entanto, para um solo tropical com estrutura bimodal ainda existem questionamentos quanto a influência dos componentes da estrutura como as agregações e os efeitos da macroporosidade e microporosidade. Assim, uma análise detalhada a partir de ensaios edométricos é realizada nestas diferentes condições (íntacta, compactada e reconstituída). Por fim, é proposto uma análise discretizada em relação a atuação dos microporos e macroporos e verificado e quantificado aspectos estruturais do solo laterítico.

5.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO A PARTIR DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS

A Figura 5.1 apresenta as curvas de adensamento (recalque x tempo) das amostras em quatro tensões aplicadas (25, 100, 600, 1500 kPa). Nas tensões mais baixas (25 kPa) nota-se que as amostras reconstituídas apresentam as maiores deformações axiais, no entanto com o aumento de tensão a amostra íntacta exibe deformações próximas a LH e LD (100 kPa), até se aproximar a LD em 600 kPa e chegar na maior deformação ($\epsilon = 0,44$) em 1500 kPa. Por sua vez, as amostras modificadas não apresentaram deformações evidentes as quais corroboram com a hipótese que esta energia aplicada foi suficiente para eliminar os macroporos e que estes são responsáveis por boa parte das deformações sofridas pelas outras amostras. Ademais, a rigidez observada nas amostras indeformadas (N) nas tensões de 20 kPa e 100kPa tem como razão a existência de cimentação que suportam até certo ponto as tensões aplicadas. Outros resultados encontram-se no Apêndice C.

A Figura 5.2 apresenta as curvas de compressão $e-\log \sigma'$ das amostras N, LD, PN, M e LH na condição saturada e os parâmetros de compressibilidade são apresentados na Tabela 5.1. Inicialmente, verifica-se que a tensão de pré-adensamento (σ'_p) para a amostra reconstituída e íntacta é igual, porém os índices de compressão e recompressão são distintos.

Para a amostra compactada M ($e=0,57$) o valor do coeficiente de compressão e recompressão mostrou-se em 0,061 o que indica pouca variação volumétrica na amostra, além de não ser possível identificar um valor para tensão de pré-adensamento, o que pode sinalizar que a energia Proctor Modificada corresponde a uma sobrecarga superior ao máximo carregamento aplicado no ensaio (>1500 kPa). Estes valores ao comparar com parâmetros da estrutura (de um solo laterítico) de estudos de Kuhn *et al.*, (2021) apresentam-se concordantes com o índice de compressão dos microporos. Sendo assim, a compressibilidade nas amostras modificadas pode se referir à atuação dos microporos.

Tabela 5.1 – Parâmetros de compressibilidade do solo em diferentes condições

Amostras	e_o	Cr	Cc	σ'_p [kPa]
N	1,72	0,015	0,676	10
PN	0,92	0,044	0,319	250
M	0,58	0,061	-	-
LD	1,56	0,007	0,393	10
LH	1,02	0,020	0,115	10

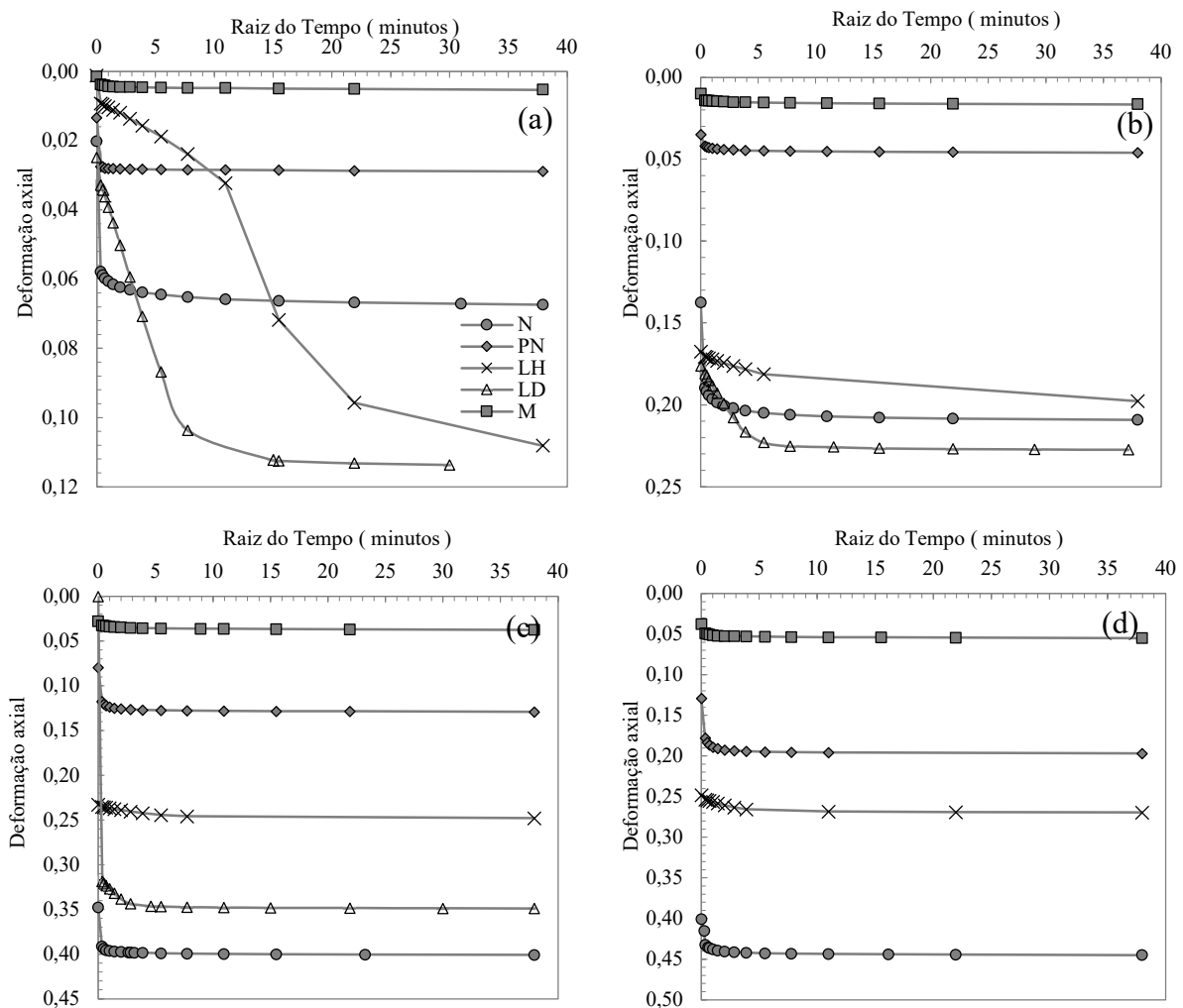


Figura 5.1 – Curvas de adensamento raiz do tempo versus deformação axial. a) $\sigma'_v = 20$ kPa b) $\sigma'_v = 100$ kPa c) $\sigma'_v = 600$ kPa d) $\sigma'_v = 1500$ kPa

A amostra PN ($e=0,92$), por sua vez, possui compressibilidade menor comparada com a indeformada devido a conseqüente diminuição de macroporos oriunda do processo de compactação. No entanto, ao relacionar com a amostra reconstituída com hexametáfosfato (LH) se verifica comportamentos diferentes. A estrutura LH (Figura 5.2c) apresenta duas inclinações no ramo normalmente adensado também apresentados nas amostras N e LD diferentemente da amostra PN e M (Figura 5.2d) o que pode representar uma alta compressibilidade.

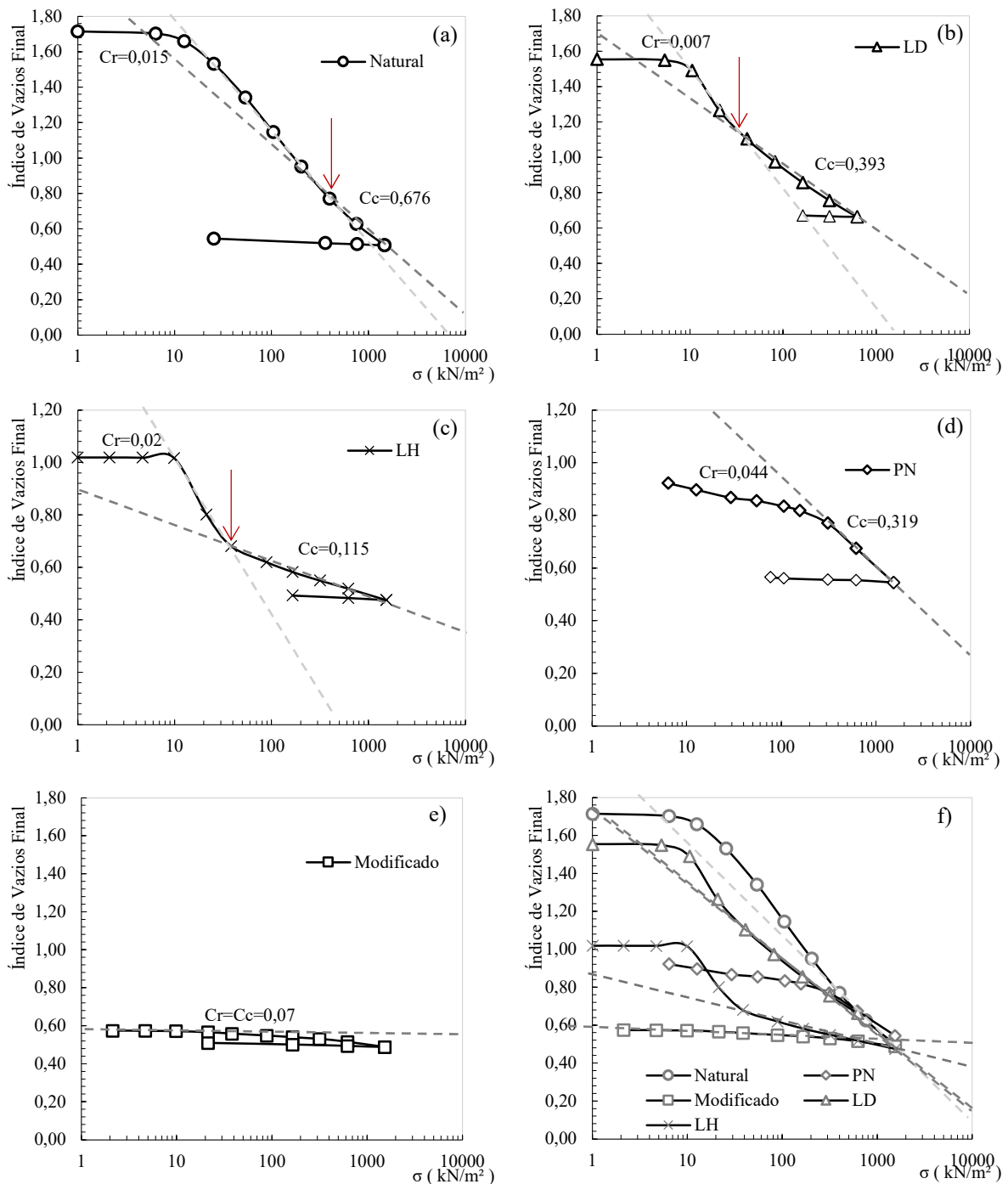


Figura 5.2 – Comportamento compressível através de ensaios edométricos unidimensional. a) N b) LD c) LH d) PN e) M f) Comparativos de todas as curvas de adensamento

Com o aumento da tensão aplicada constata-se que há diminuição do índice de vazios e convergência das amostras, o que culmina a um comportamento similar visto que há destruição dos componentes da estrutura que resiste até certo ponto (Figura 5.2f). Isto pode ser verificado pelos coeficientes de adensamento e variação volumétrica que são apresentados na Figura 5.3. Os coeficientes de adensamento apresentam convergência a partir de 100 kPa ($C_v=5 \times 10^{-3}$ cm²/s), no entanto para variação volumétrica do solo (Figura 5.3c) percebe-se que as amostras reconstituídas apresentaram maiores índices iniciais, mas convergiram com o aumento de tensão. Observa-se diminuição da permeabilidade (Figura 5.3b) com o aumento das tensões devido a diminuição do índice de vazios, como era de se esperar. A amostra indeformada apresenta sempre permeabilidades maiores, independente da tensão e a amostra modificada juntamente com LH apresenta menor permeabilidade evidenciando a importância dos macroporos quanto à permeabilidade deste solo.

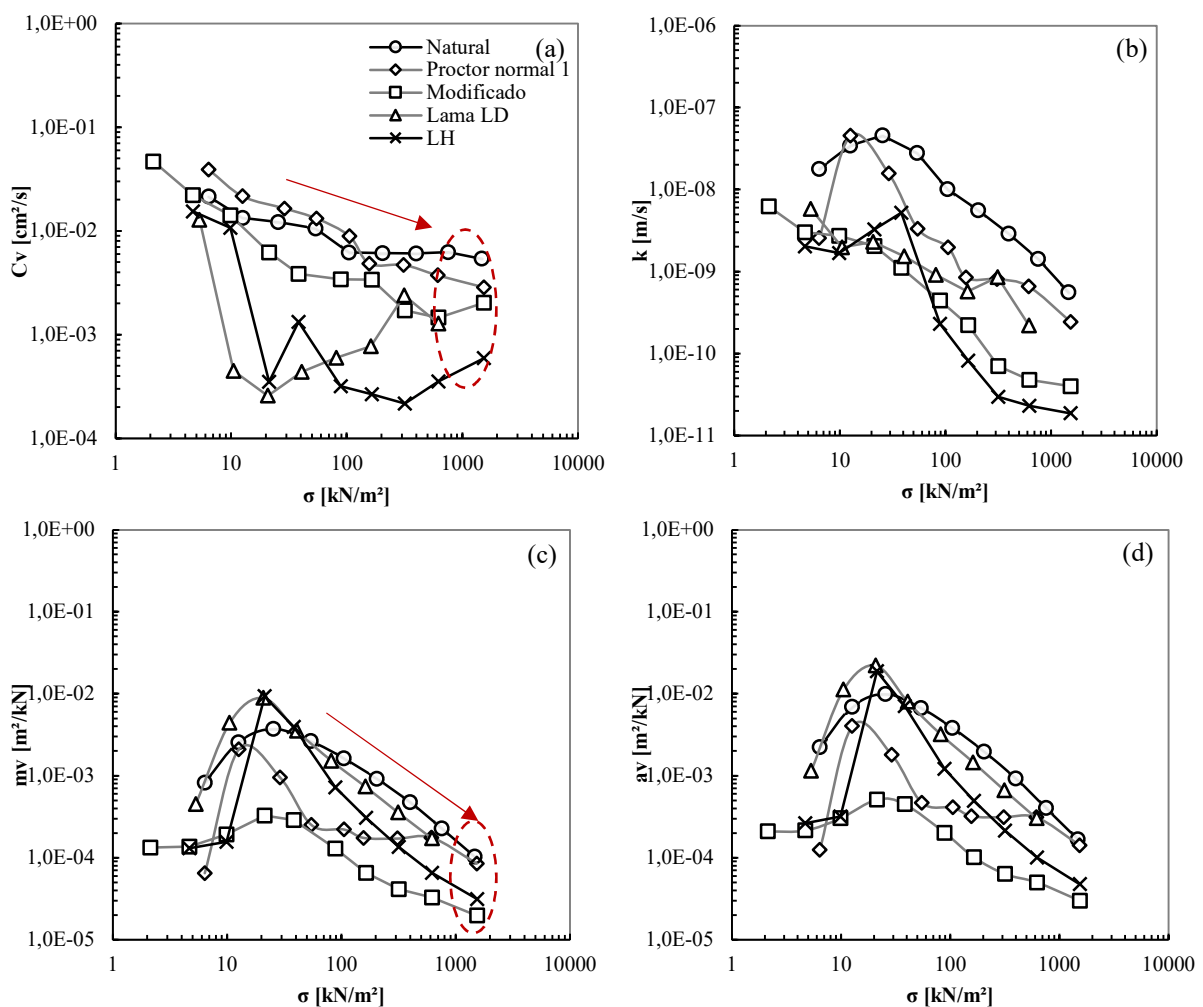


Figura 5.3 – Variação dos parâmetros de compressibilidade com aumento de tensão aplicada (a) Coeficiente de adensamento (b) Coeficiente de variação volumétrica (c) Permeabilidade (d) coeficiente de compressibilidade

5.2 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA: ESTADO INTRÍSECO

Para o melhor entendimento da influência da estrutura sobre a compressibilidade deste solo, empregou-se a partir da análise de Burland (1990) a taxa de vazios normalizada (I_v), definida pela equação (5.0):

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} \quad (5.0)$$

onde, e é o índice de vazios da amostra para uma tensão; e_{100}^* e e_{1000}^* correspondem ao índice de vazios da amostra reconstituída (lama com água destilada) nas tensões de 100 e 1000 kPa e são fixos na equação.

Quando os valores de I_v da amostra estão próximos da ICL significa que os efeitos da estrutura são pequenos. A Figura 5.4 mostra a relação entre a taxa de vazios normalizada com as tensões aplicadas do ensaio edométrico junto com a ICL definida por Burland (1990). Nota-se que a amostra reconstituída (LD) e indeformada (N) iniciam com valores de I_v positivos e com o aumento de tensão juntam-se próximo a ICL. Por outro lado, as amostras compactadas PN e M, começam a partir de valores negativos concordando com as propostas de Burland (1990), onde valores negativos indicam sedimentos compactados, e positivos sedimentos fofos os quais são características das amostras empregadas para LD e N.

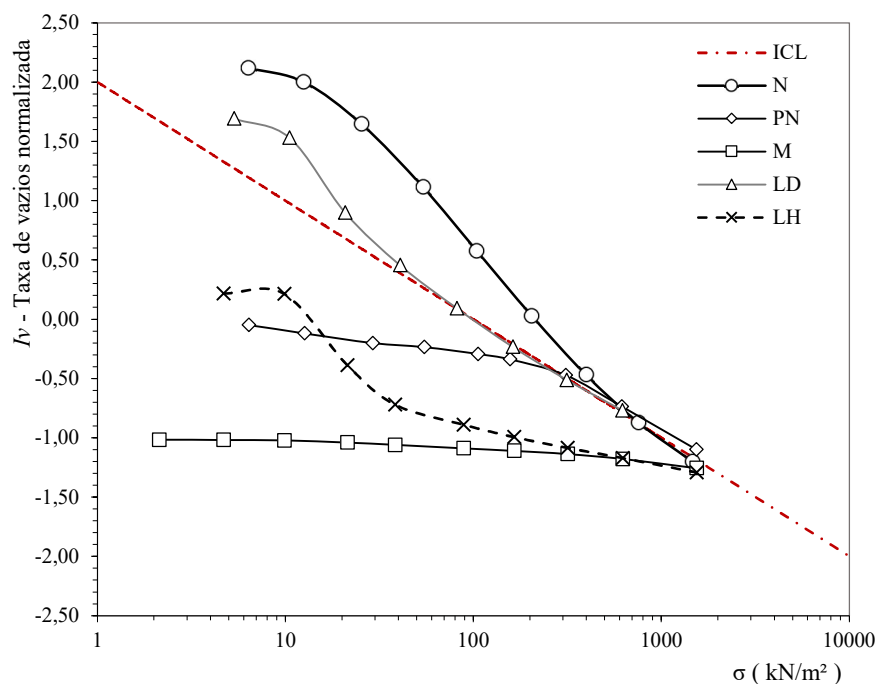


Figura 5.4 – Variação da taxa de vazios normalizada para as diferentes condições.

A amostra intacta (N) somente se aproxima da curva intrínseca de compressão (ICL) a partir de valores a partir de 400 kPa de tensão aplicada, o que indica uma resistência da estrutura aos esforços. Por outro lado, a condição compactada PN mostra que mesmo com valores de índices de vazios iniciais menores, a desestruturação inicia a partir de 150 kPa. Por fim, os valores definidos da amostra compactada M (modificado) que exibem a atuação de grande parte dos microporos indicam que o efeito da estrutura iniciaria somente a partir de 1500 kPa.

Segundo Gasparre e Coop (2008) a curva de compressão de um material indeformado pode tender a se curvar para a ICL. Isso demonstra uma estrutura metaestável, que neste caso se degrada com deformações. Alternativamente a curva de compressão pode seguir uma linha abaixo à ICL, mostrando a presença de elementos estáveis que não se degradam com deformações.

A amostra reconstituída com hexametáfosfato (LH), por outro lado, mostrou-se comportamento de sedimentos compactados diferentemente do processo de aquisição da amostra reconstituída LD, sendo que à medida que há o aumento de tensão, a I_v da curva LH converge para os mesmos valores da amostra compactada modificada (M).

O resultado definido para amostra com hexametáfosfato apresenta-se compatível com os estudos de Otálvaro (2013) e Lopes (2016) o qual evidencia a necessidade de uma nova forma de verificar a influência da estrutura deste solo tropical, por exemplo, Lopes (2016) confirma que a amostra reconstituída com pH 9 são as mais indicadas para representar o estado de referência, visto que o processo com água destilada não elimina as agregações. Ademais, outros estudos como de Ng *et al.*, (2020a) realizados em solo laterítico mostram a efetividade da agregação o que muitas vezes são as responsáveis pela maior resistência e menor compressibilidade.

Assim, a proposta de Burland (1990) para este solo, também pode ser analisada a partir da taxa de vazios normalizada da amostra com hexametáfosfato (LH – ICL'). Dessa forma é possível entender quais elementos da estrutura são afetados em cada tipo de amostra. A Figura 5.5 corresponde a taxa de vazios normalizada juntamente com as linhas intrínsecas definidas com lama com água destilada (ICL) e hexametáfosfato (ICL').

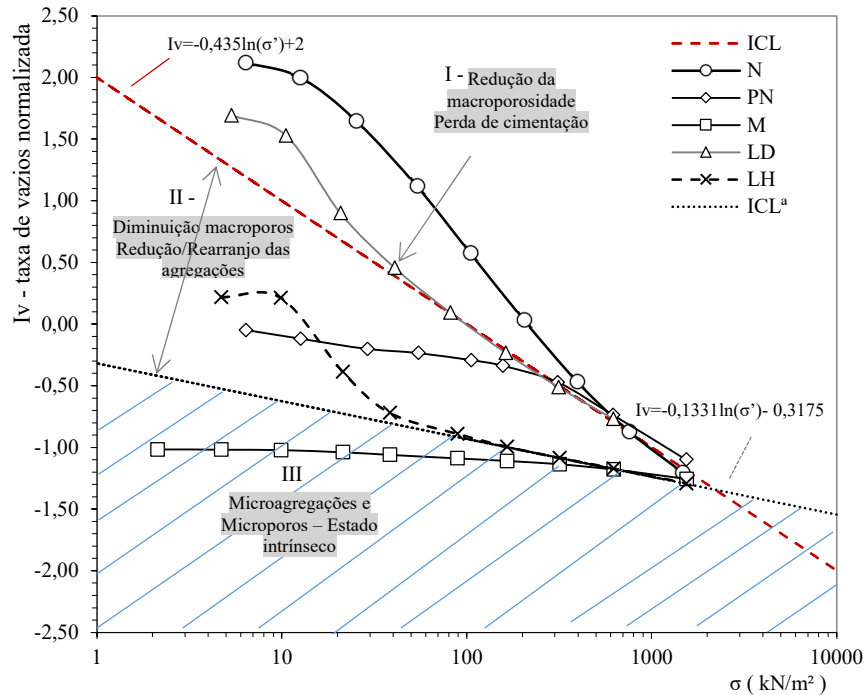


Figura 5.5 – Variação da taxa de vazios normalizada para as diferentes condições.

Os valores de I_v no trecho I, de certa forma correspondem a amostras com índices de vazios elevados e consequente macroporosidade elevada, como o encontrado na estrutura intacta deste estudo. O que se percebe também em estudos de Okewale (2020), em solos cimentados como de Prietto (2004) e Rosa (2006) e com características metaestáveis de Li *et al.*, (2016). No entanto, o processo de compactação para a amostra laterítica evidencia uma certa resistência das agregações juntamente com diminuição de macroporos (trecho II), o qual é totalmente eliminado com a compactação semiestática aplicada com energia modificada (M – trecho III) chegando assim ao possível estado intrínseco.

A partir dos valores de I_v é possível determinar o índice de vazios que corresponde à linha intrínseca de compressão (ICL) isolando o parâmetro e , sendo assim chamado de e^* (equação 5.1).

$$e^* = I_v \times (e_{100}^* - e_{1000}^*) + e_{100}^* \quad (5.1)$$

Para melhor entendimento a Figura 5.6a corresponde aos dados de ensaios nas condições de estudo junto com a função e' e e^* (índices de vazios em relação a amostra reconstituída LH e LD) definida a partir de I_v . Percebe-se índices iniciais de 1,66 e 0,82 com intersecção em tensões efetivas aplicadas em 2000 kPa. Com esses valores possibilitaram obter a relação tensão x índices de vazios intrínseco do solo mostrado na Figura 5.6b, os quais apresentam comportamento exponencial, indicando maiores sensibilidade da estrutura a partir de 200 kPa.

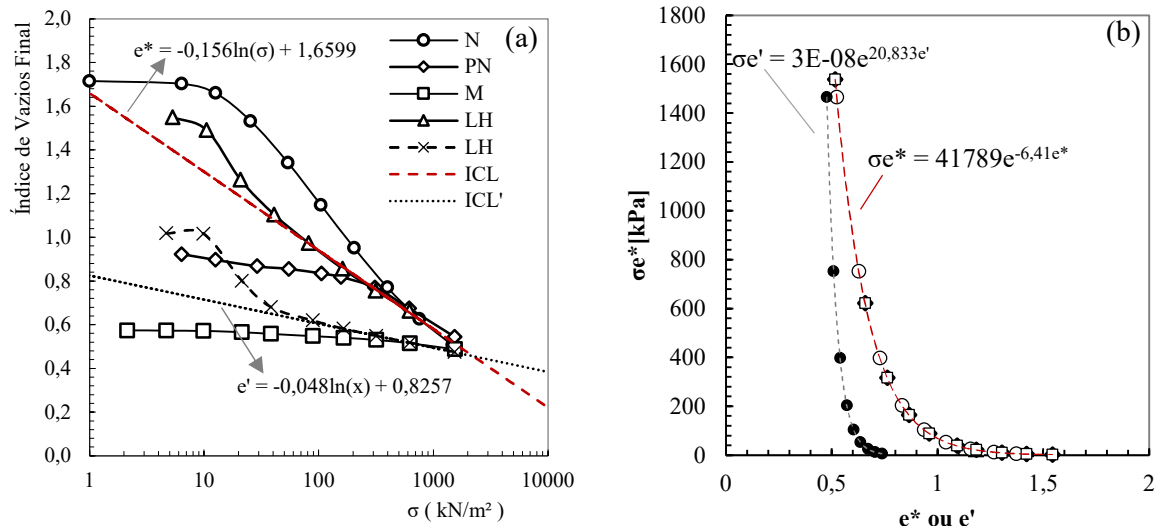


Figura 5.6 – a) Índices de vazios em relação à ICL b) Tensão *versus* índice de vazios das amostras reconstituídas

5.2.1 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA: QUANTIFICAÇÃO

Para quantificar a ação da estrutura foram utilizadas as propostas de Gasparre e Coop (2008) (Figura 5.7). A Figura 5.7a corresponde a sensibilidade à tensão (S_σ), definida pelas tensões após o pré-adensamento do solo em razão da tensão vertical da ICL ($\sigma'/\sigma e^*$) para o mesmo índice de vazios. Esta relação pode ser considerada como um parâmetro que incorpora as diferenças microestruturais das argilas. A não variação das amostras PN e M indicam a presença de elementos estáveis que não se desestruturaram com a aplicação de tensão.

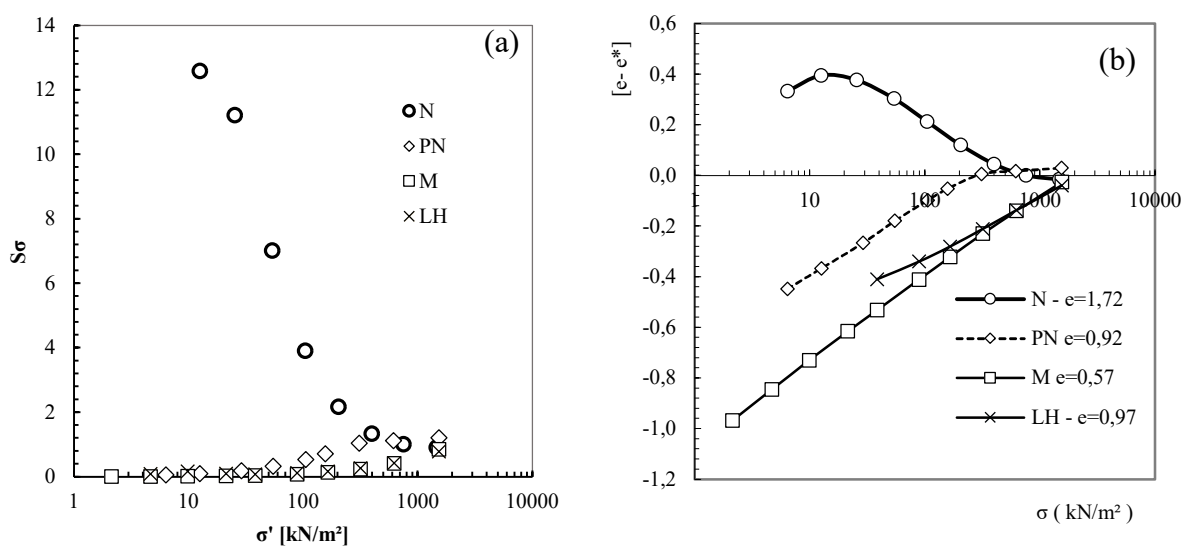


Figura 5.7 - Taxa de vazios em relação aos valores intrínsecos da amostra reconstituída LD. (a) Sensibilidade à tensão (b) Valores de $e - e^*$.

A Figura 5.7b corresponde a normalização proposta por Gasparre e Coop (2008) onde o índice de vazios (e) menos o índice da amostra de referência (e^*) corresponde a função definida na Figura 5.6a. Nesse caso, percebe-se que a amostra intacta apresenta maior efeito de desestruturação com o aumento de tensão. Os valores negativos de PN e M indicam que não há sensibilidade.

De uma forma geral, Gasparre e Coop (2008) sugerem que os elementos de uma estrutura metaestável são mais associados com as cimentações (“*bonding*”) e os elementos estáveis são resultados da fábrica. Apesar de ser uma abordagem simples pois em muitos solos não é possível discretizar os efeitos individuais da microestrutura, o mesmo pensamento é encontrado em outros estudos (Coop *et al.*, 1995; Burland *et al.*, 1996; Baudet and Stallebrass, 2004).

No entanto, percebe-se que a quantificação é relacionada com a amostra reconstituída com água destilada, o qual apresenta boa parte das agregações. Assim, a Figura 5.8a corresponde a sensibilidade à tensão ($S_{\sigma'}$) definida pelas tensões após o pré-adensamento do solo a partir das amostras com hexametáfosfato. Dessa forma, percebe-se um comportamento em relação à macroporosidade e microporosidade. Observa-se que as amostras LD e N possuem grande influência em todas as tensões diferentemente da amostra compactada PN que só há sensibilidade com a tensão a partir de valores de 200 kPa.

A Figura 5.8b corresponde aos valores normalizados $e-e'$ em relação aos dados da amostra LH. Nota-se que as amostras N, LD e PN tem influência da macroporosidade, e os resultados negativos das amostras M correspondem à atuação somente de microporos.

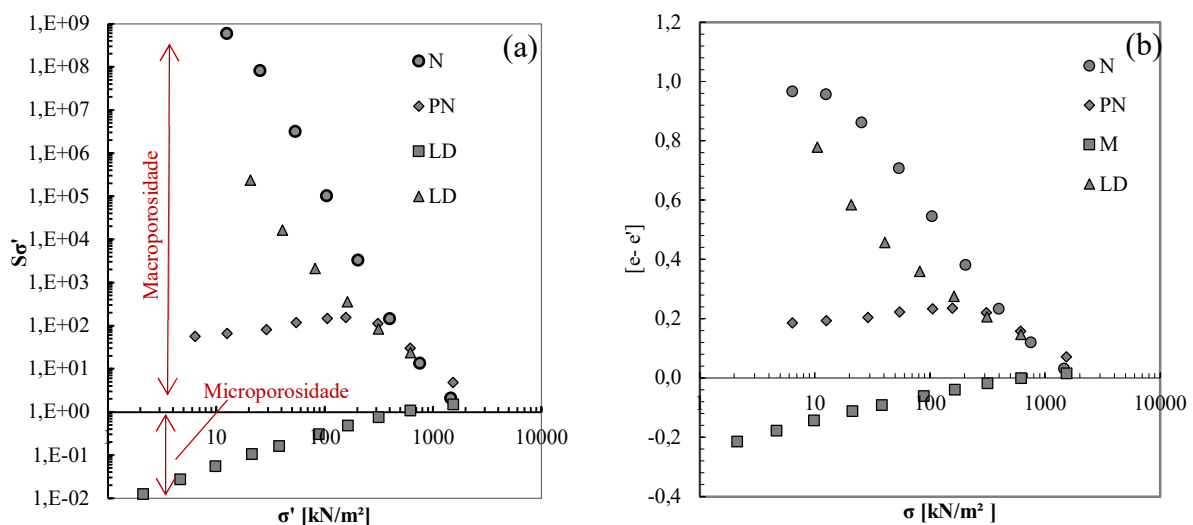


Figura 5.8 - Taxa de vazios em relação aos valores intrínsecos da amostra LH a) Sensibilidade à tensão b) Valores normalizados de Valores de $e-e'$.

Comparando o comportamento da amostra compactada, com as amostras N e LD fica evidente que à medida que as amostras com maior índice de vazios são carregadas há a gradativa eliminação dos macroporos o que explica sua maior compressibilidade. Por outro lado, as amostras compactadas já tiveram os macroporos eliminados pelo processo de compactação, o que é evidenciado na sua menor compressibilidade. No caso extremo da amostra M não há macroporos a serem eliminados e pode-se dizer que a sua compressibilidade estaria totalmente associada a compressão dos microporos. Assim, na Figura 5.9 também mostra a relação entre índices de vazios da estrutura que atinge os macroporos (e_{macro}) e os microporos (e_{micro}) considerando que o índice de vazios da amostra M corresponde a atuação somente dos microporos. Percebe-se que o comportamento da curva com relação aos macroporos coincide com a inclinação (Cc) das amostras que possuem macroporos.

As amostras reconstituídas com hexametáfosfato, por sua vez, apresentam comportamento próximos do seu índice de compressão (Cc) entre 40 e 300 kPa em relação a Cc_{macro} , no entanto para valores próximos a 400kPa há uma diminuição significativa da macroporosidade aproximando do valor de Cc_{micro} em 0,03.

A Tabela 5.2 mostra os valores dos coeficientes de compressão discretizados em relação aos microporos e macroporos bem como a sensibilidade à expansão (Ss) definida pela relação entre Cr e o índice de recompressão da amostra desestruturada (neste caso Cr da estrutura LD).

Tabela 5.2 – Parâmetros de compressibilidade discretizados

Amostras	Cc	Cc_{macro}	Cc_{micro}	Ss
N	0,68	0,60	0,08	0,46
PN	0,32	0,27	0,05	0,16
M	-	-	0,06	0,10
LD	0,39	0,32	0,03	1
LH	0,12	0,08	0,03	0,34

A sensibilidade à expansão (Ss), segundo Gasparre e Coop (2008) e Schmertmann (1969) serve como um indicador entre as diferenças de uma estrutura intacta e degradada, pois à medida que a desestruturação ocorre a linha definida pela inclinação da amostra intacta (Cr) aumenta tendendo a ficar paralela ao índice de recompressão da amostra reconstituída (LD). Para a amostra laterítica os valores que apresentaram maior índice correspondem a amostra N e LH.

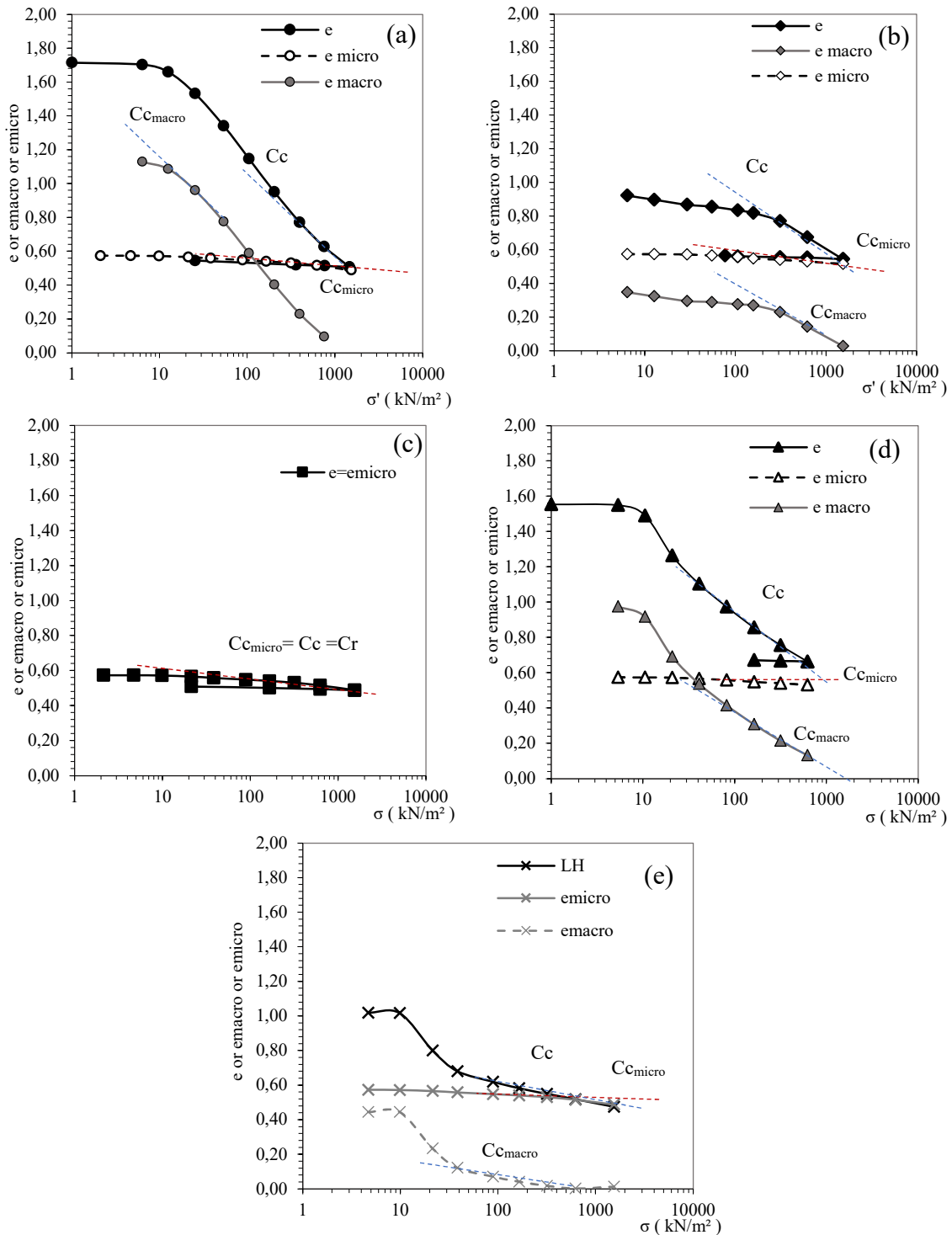


Figura 5.9 - Comportamento compressível através de ensaios edométricos unidimensional. a) N b) PN c) M d) LD e) LH

A Figura 5.10 mostra a relação da variável microestrutural definida por Alonso *et al.*, (2013) com o aumento de tensão e a correspondência com os macroporos existentes nas amostras (e_{macro}). Verifica-se que as amostras N, LD e LH apresentam maiores variações de ζ_m com o aumento de tensão o que indica uma relação clara com a redução dos macroporos e a sensibilidade à tensão destas amostras. Por outro lado, as amostras compactadas mostram

valores praticamente constantes até a tensão 250 kPa, mostrando que independente da energia de compactação há uma resistência quanto à compressibilidade. Por fim, os valores de e_{macro} bem como de ξ_m tendem a convergirem resultado de uma estrutura similar.

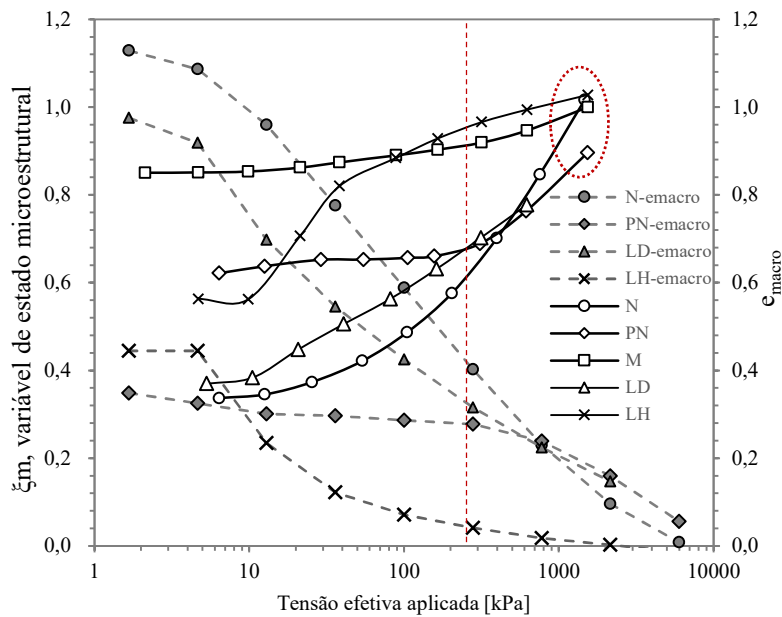


Figura 5.10 – Relação da variável microestrutural conforme tensão aplicada.

5.3 RESUMO

Uma análise detalhada foi feita no comportamento compressível a partir de ensaios edométricos, investigando os efeitos da estrutura através de comparações entre o comportamento da amostra intacta, compactada e reconstituída. Inicialmente, os resultados de deformação *versus* raiz do tempo mostraram que as maiores deformações ocorreram nas amostras intactas, porém em tensões menores que 100 kPa elas apresentaram rigidez, não deformando tanto quanto as amostras reconstituídas o que leva a entender que a cimentação contida na amostra N também afeta a compressibilidade em certo nível de tensão o qual também é confirmado pela análise da sensibilidade (S_σ) com relação aos dados da amostra LD.

As curvas de compressibilidade, no entanto, mostram que com o aumento de tensão há uma convergência em uma única linha o qual difere em cada amostra. A amostra compactada PN apresentou desestruturação a partir de 300 kPa que corresponde a diminuição dos macroporos conforme é indicado pelas análises de S_σ' , no entanto a possível cimentação existente provocada pela compactação é considerável estável (S_σ).

As amostras LH e M apenas convergem em valores a partir de 1500 kPa o que pode ser considerado como estado intrínseco do solo restando apenas os microporos. Assim, as curvas

discretizadas mostraram a importância da macroporosidade e que ela dita grande parte do comportamento.

6 EFEITO DA ESTRUTURA NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO LATERÍTICO

Os resultados dos capítulos anteriores mostraram que a estrutura do solo laterítico exerce forte influência na compressibilidade e comportamento hidráulico do solo. Neste capítulo será avaliado os efeitos da estrutura sobre a resistência ao cisalhamento.

Por ser um solo residual, e ser resultado de um alto processo de intemperização, as características estruturais envolvem uma ampla faixa de tamanho de poros, alguns sendo tão grandes que normalmente seriam associados com o tamanho dos grãos do solo. Além disso, as agregações formadas por argilas implicam em características e dimensões de areias.

Outro fator importante, corresponde a influência da cimentação (Vaughan *et al.*, 1985; Vaughan, 1988; Maccarini *et al.*, 1989; Leroueil e Vaughan, 1990; Cuccovillo e Coop, 1999; Reis, 2004; Gutierrez, 2005). Nos solos residuais profundamente intemperizados as cimentações são formadas por materiais de ligação como oxi e hidróxidos de ferro e alumínio, bem como pontes de argila e são consideradas como fracas. Estas cimentações muitas vezes não são encontradas pois podem ser perdidas devido a perturbação quanto na amostragem como na própria execução dos testes de laboratório (Reis, 2004).

Vaughan (1985) relata que apesar destes solos serem de natureza bastante diversa, apresentam algumas características similares, dentre as quais, alta permeabilidade, uma envoltória de resistência apresentando intercepto de coesão e uma tensão de escoamento separando um comportamento mais rígido de um mais compressível.

A difícil quantificação da estrutura do solo laterítico é dada principalmente pelas agregações, havendo uma escassez de estudos. Assim, este capítulo mostra a quantificação a partir das propostas de Bullock e Murphy (1980) (dispostas no capítulo 3) o qual considera o agregado como partícula, visto que grande parte do comportamento é referido a eles. Essas análises são baseadas nos estudos de Hattab e Fleureau (2010) porém adaptadas ao solo em estudo.

Assim, este capítulo apresenta uma contribuição sobre o comportamento de resistência ao cisalhamento do solo laterítico obtido a partir do ensaio de cisalhamento direto. Em primeiro momento apresenta-se as diferentes curvas de adensamento resultantes da consolidação, o comportamento tensão-deformação e os deslocamentos horizontais e verticais. Em segundo momento analisa-se o comportamento das diferentes estruturas a partir das curvas de dilatância assim como as envoltórias de resistência.

Os dados obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto são analisados conjuntamente com a estrutura deste solo após o processo de ruptura (pós pico). O enfoque é dado a estrutura em termos de macroporosidade, microporosidade e agregação os quais foram investigados a partir de ensaios MEV e MIP. Em primeiro momento fez-se uma comparação entre as diferentes amostras com base nas curvas de deslocamento vertical x raiz do tempo, estas por sua vez foram analisadas juntamente com resultados de distribuição de poros. Por fim, discussões sobre a disposição dos agregados, forma, bem como orientação foram realizadas com as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

6.1 HIPÓTESES CONSIDERADAS DAS ESTRUTURAS DAS AMOSTRAS

Para iniciar as análises foram adotadas as cinco amostras N, PN, M, LD e LH as quais correspondem: a amostra intacta ou indeformada (N), amostra moldada pela energia de Proctor normal (PN), energia modificada (M), lama com água destilada (LD-pH 6) e por fim, lama com uso de hexametáfosfato de sódio (LH-pH 8,7).

A Figura 6.1 corresponde às estruturas indicadas por cada amostra as quais foram definidas no capítulo 4. A amostra N (Figura 6.1a) corresponde ao objeto de estudo, a qual é formada por agregados, estes agregados por sua vez estão ligados pela cimentação que juntamente com os macroporos e microporos formam a estrutura.

As amostras compactadas (Figura 6.1b, c), com o processo de compactação e moldagem mostram-se um agrupamento e rearranjo das agregações, surgindo uma ligação entre as partículas causada pela aplicação de energia. Neste estudo, as amostras PN apresentam macroporosidade (Figura 6.1b) enquanto nas amostras M apenas microporos (Figura 6.1c).

A Figura 6.1d corresponde a estrutura de lama com uso de água destilada (LD), com certa conservação de agregados, bem como macroporos e microporos que são preenchidos por material coloidal. Ademais, a amostra LH (Figura 6.1d) com redução de agregação relativa e aumento de material coloidal no fluido dentro dos macroporos.

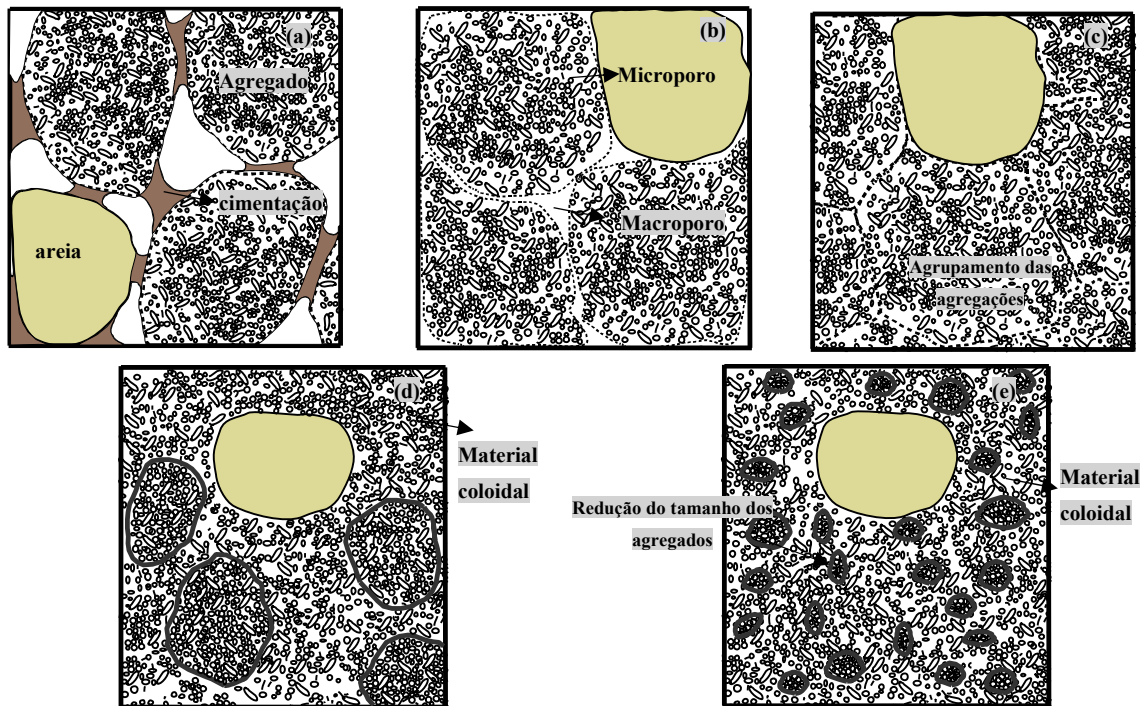


Figura 6.1 – Identificação dos componentes da estrutura. (a) N (b) PN (c) M (d) LD (e) LH

6.2 EVOLUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS APÓS ADENSAMENTO E CISALHAMENTO

Na Figura 6.2 apresenta-se as curvas de compressibilidade das amostras em termos de raiz do tempo e deslocamento vertical, respectivamente. De uma forma geral, observa-se que menores deslocamentos ocorrem nas amostras PN e M, e os maiores nas amostras intactas (N). Percebe-se que a cimentação nas amostras intactas (N) é perdida no próprio processo de adensamento, os ensaios edométricos do capítulo 5 exibem uma resistência da cimentação pela amostra N (Figura 6.2a) que suportam valores menores que 8 kPa. Alguns estudos de Sandroni (1985), Vargas (1953) e Bressani e Vaughan (1989) fazem considerações sobre as cimentações fracas em solos residuais, estas podem ser perdidas antes mesmo do ensaio, ou seja, na própria amostragem pois este processo envolve alívio de tensão total, distúrbios mecânicos, intemperismo, técnicas de ensaio, remoldagem e desestruturação.

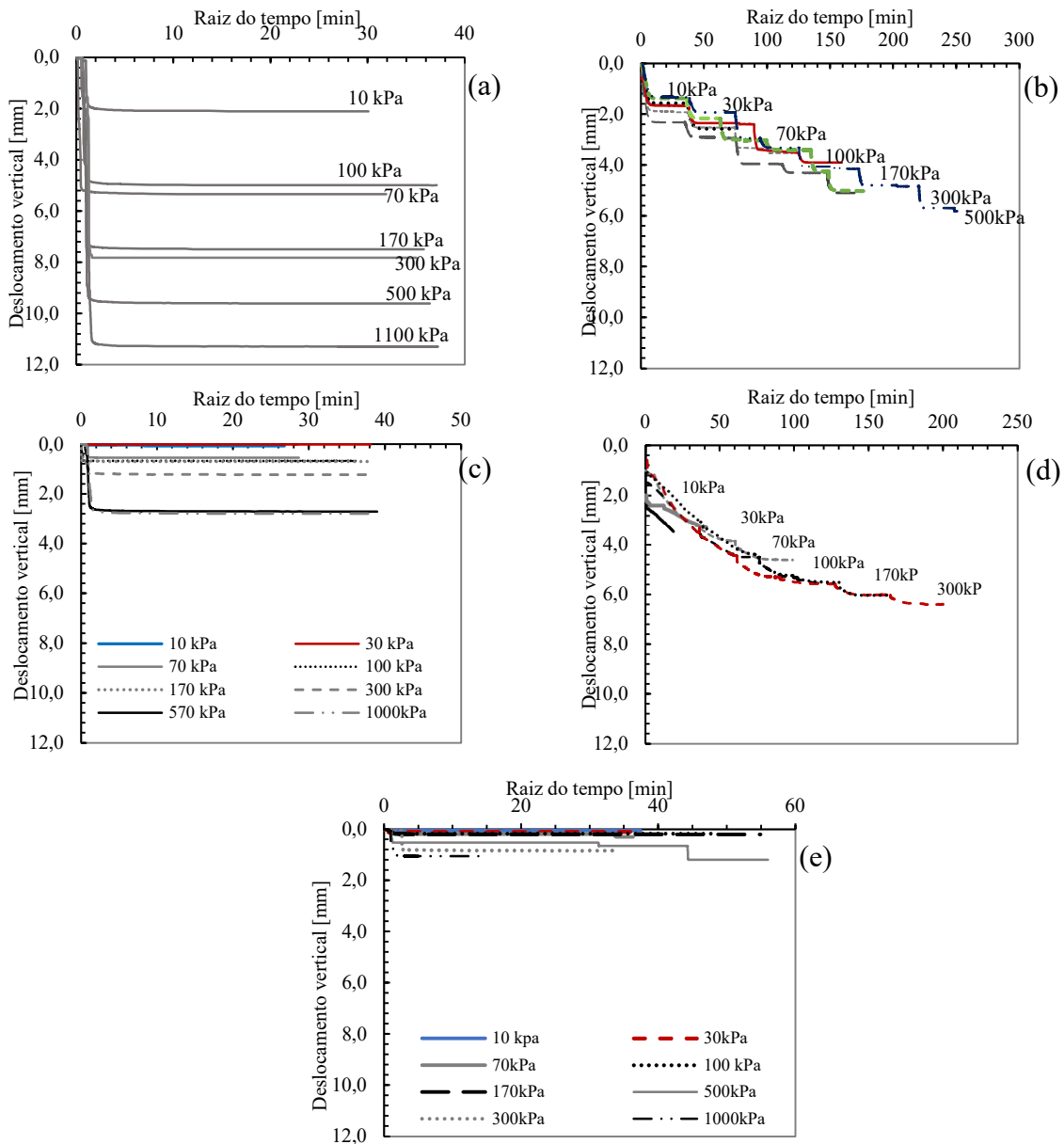


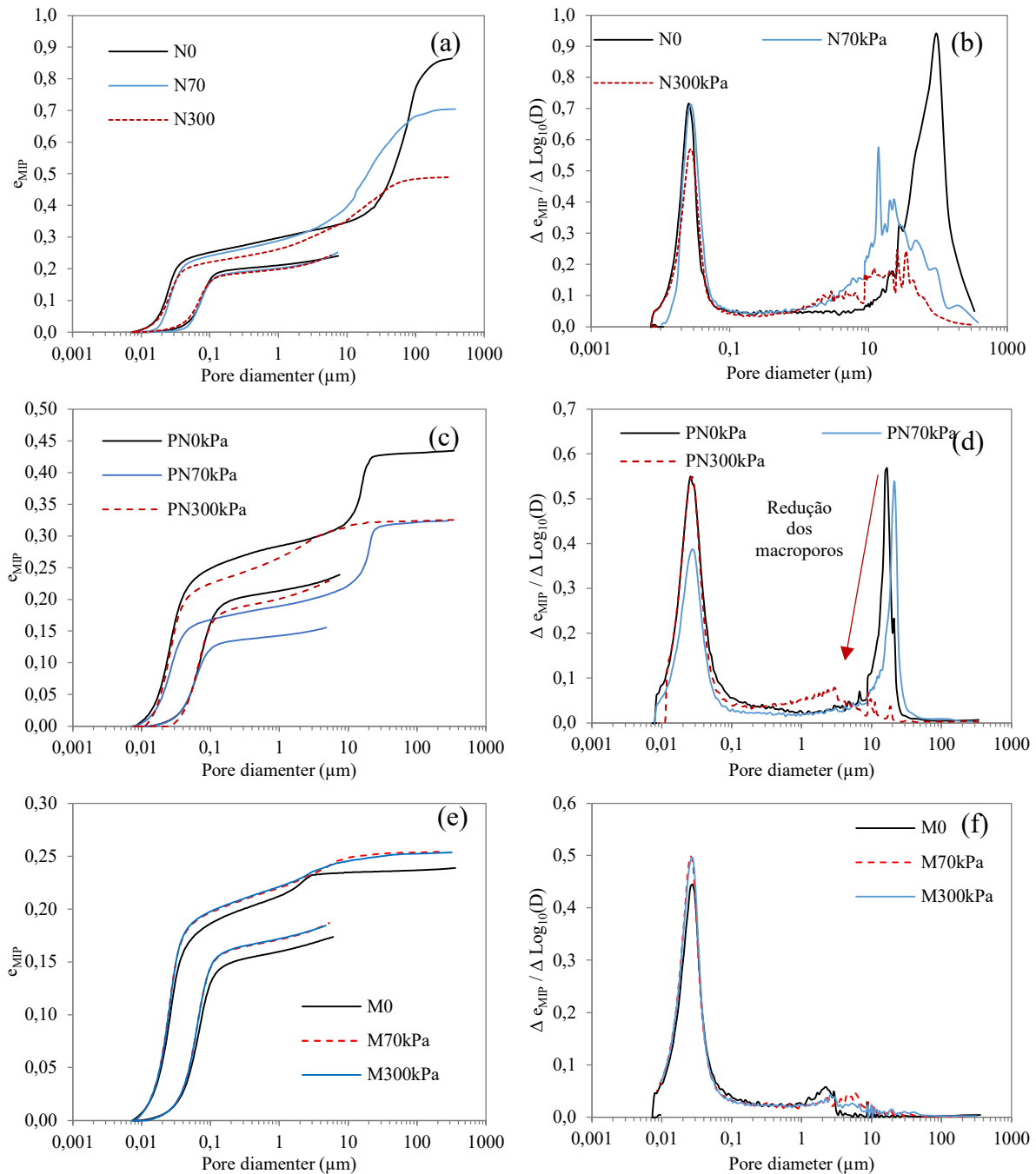
Figura 6.2 – Curvas de adensamento obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto. (a) Amostra N (b) LD (c) PN (d) LH (e) M

Os resultados das amostras reconstituídas LD (Figura 6.2b) e LH (Figura 6.2d) mostram que os estágios de consolidação realizados em etapas são mais apropriados visto que é possível obter a variabilidade do deslocamento ao aplicar a tensão de consolidação além de impossibilitar a extrusão do material no momento do ensaio.

As PSDs (distribuição de poros) para as quatro amostras em diferentes tensões efetivas (0, 70 e 300 kPa) são apresentadas na Figura 6.3, as quais correspondem aos resultados de ensaios MIP antes (0kPa) e após cisalhamento (70 kPa e 300kPa) retirados de uma das bandas das amostras cisalhadas (Figura 3.27). Nota-se que o processo de adensamento e cisalhamento atua de forma a eliminar os macroporos das amostras.

As amostras reconstituídas (Figura 6.3g,h,i,j) exibem sua elevada compressibilidade até mesmo em baixas tensões (Figura 6.2b, d). O aumento de tensão se verifica juntamente com uma diminuição total dos macroporos, que antes se apresentava bimodal tornou-se unimodal.

Nas amostras modificadas (M) o cisalhamento não alterou a porosidade significativamente, e na verdade as outras amostras convergiram a uma estrutura similar à amostra modificada em termos de distribuição de poros (Figura 6.3e, f).



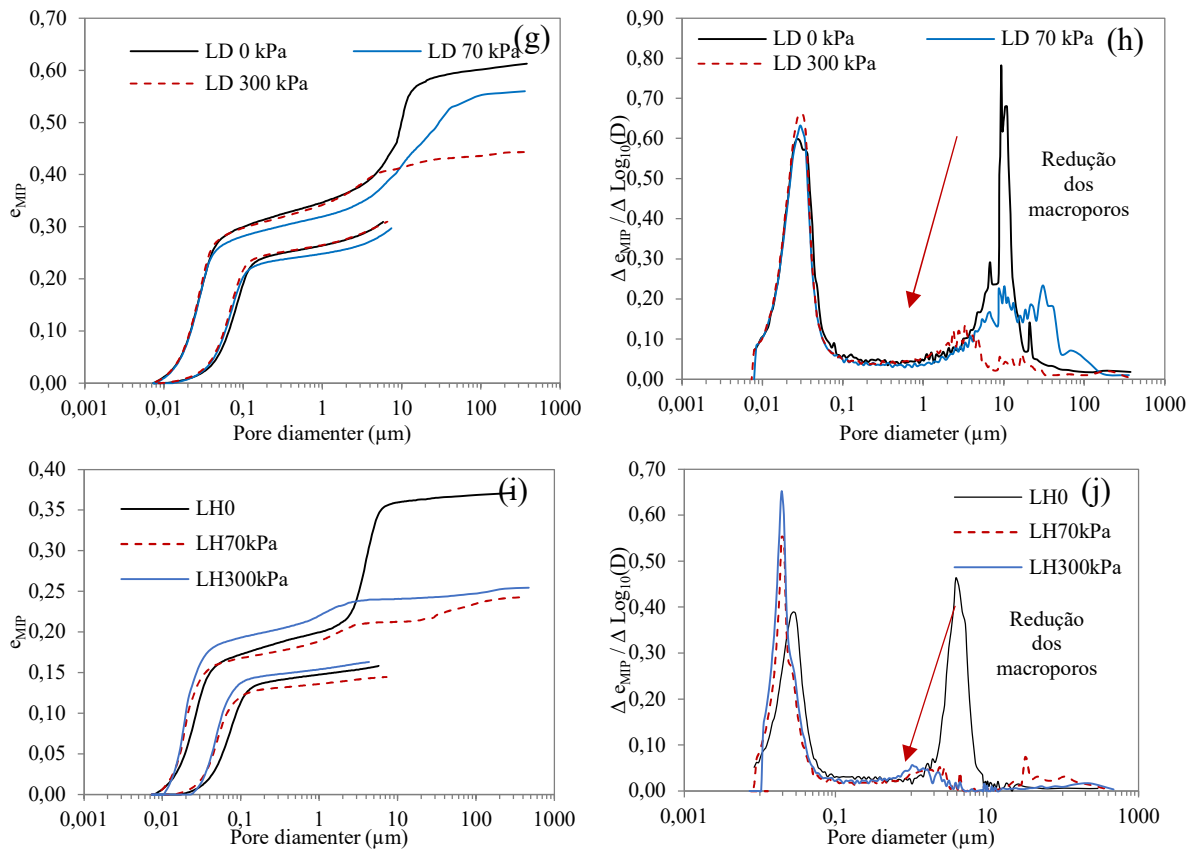


Figura 6.3 – Ensaio MIP antes e após cisalhamento. (a) N: e_{MIP} x diâmetro de poro (b) N:PSD (c) PN: e_{MIP} x diâmetro de poro (d) PN:PSD (e) M: e_{MIP} x diâmetro de poro (f) M:PSD (g) LD: e_{MIP} x diâmetro de poro (h) LD: PSD (i) LH: e_{MIP} x diâmetro de poro (j) LH: PSD

Os resultados apresentados mostram evidências da metaestabilidade na condição intacta (N) e quanto a estrutura é um fator a ser considerado inicialmente pela cimentação e posteriormente pelos macroporos. Alguns estudos como Vaughan (1985), Costa Filho *et al.*, (1989), Vargas, (1953), Reis (2004) dizem que a presença de cimentações fracas pode associar ao solo: (a) a existência de uma pressão aparente de pré-adensamento não relacionada com a história de tensões ou densidade; e (b) uma resposta rígida a baixas tensões confinantes com comportamento mais plástico em maiores tensões, caracterizando uma superfície de plastificação. Esses resultados também corroboram para as ideias elucidadas no capítulo 5.

Vargas (1973) propôs um modelo do comportamento de solos residuais que coincide até então aos resultados obtidos em amostras intactas. O autor constatou que a curva $ex\log\sigma'$ (Figura 6.4a) de uma amostra indeformada de solo residual guarda certa semelhança com as argilas sedimentares sobre adensadas, no sentido de que se compõe em dois trechos. Ao passar do primeiro para o segundo trecho, o solo perde rigidez, sofrendo escoamento. No entanto, os comportamentos similares desses solos possuem origens diferentes. Nas argilas sedimentares está associado ao fenômeno de sobre adensamento, ou seja, a tensão na qual se observa

escoamento corresponde à máxima tensão efetiva vertical a que esteve submetido esse solo ao longo de sua história geológica. Nos solos residuais isso não acontece, porque as tensões de escoamento não se relacionam com as tensões de peso próprio atuais ou antigas, ao menos até certa profundidade. Foram denominadas por Vargas (1973) como pressão de pré-adensamento virtual (Figura 6.4b). O escoamento, nos solos residuais para esses estudos citados está associado à quebra da estrutura cimentada (Reis, 2004).

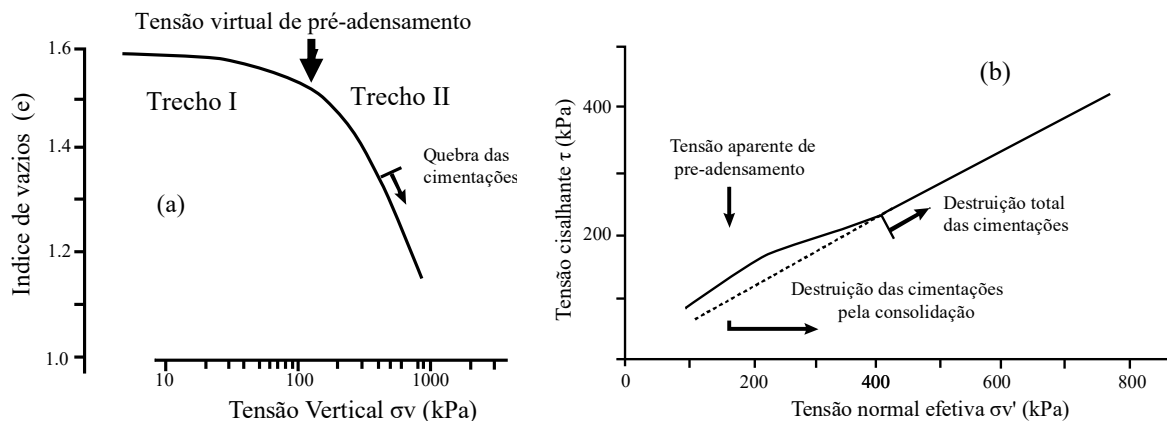


Figura 6.4 – Modelo proposto por Vargas (1973) para amostra N: (a) observada em oedômetro; (b) Resistência drenada em cisalhamento direto. (Modificado de Reis, 2004)

6.3 CURVAS TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTOS

As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam o comportamento das diferentes estruturas através das curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto. As imagens das amostras cisalhadas são apresentadas no Apêndice D.

Para as curvas tensão cisalhante por deslocamento horizontal, observa-se nas amostras N, LD (Figura 6.5) e LH (Figura 6.7) um aumento da tensão com o deslocamento tendendo a um valor máximo, sem diferenciação preponderante entre a resistência ao cisalhamento pós pico. Com relação a deformação vertical x deslocamento horizontal, observa-se compressão durante a ruptura em todas as amostras. O comportamento tensão-deformação e deformação vertical durante a ruptura indicam maiores deformações nas amostras intactas (N) em relação às amostras reconstituídas apresentando característica de argila normalmente adensada.

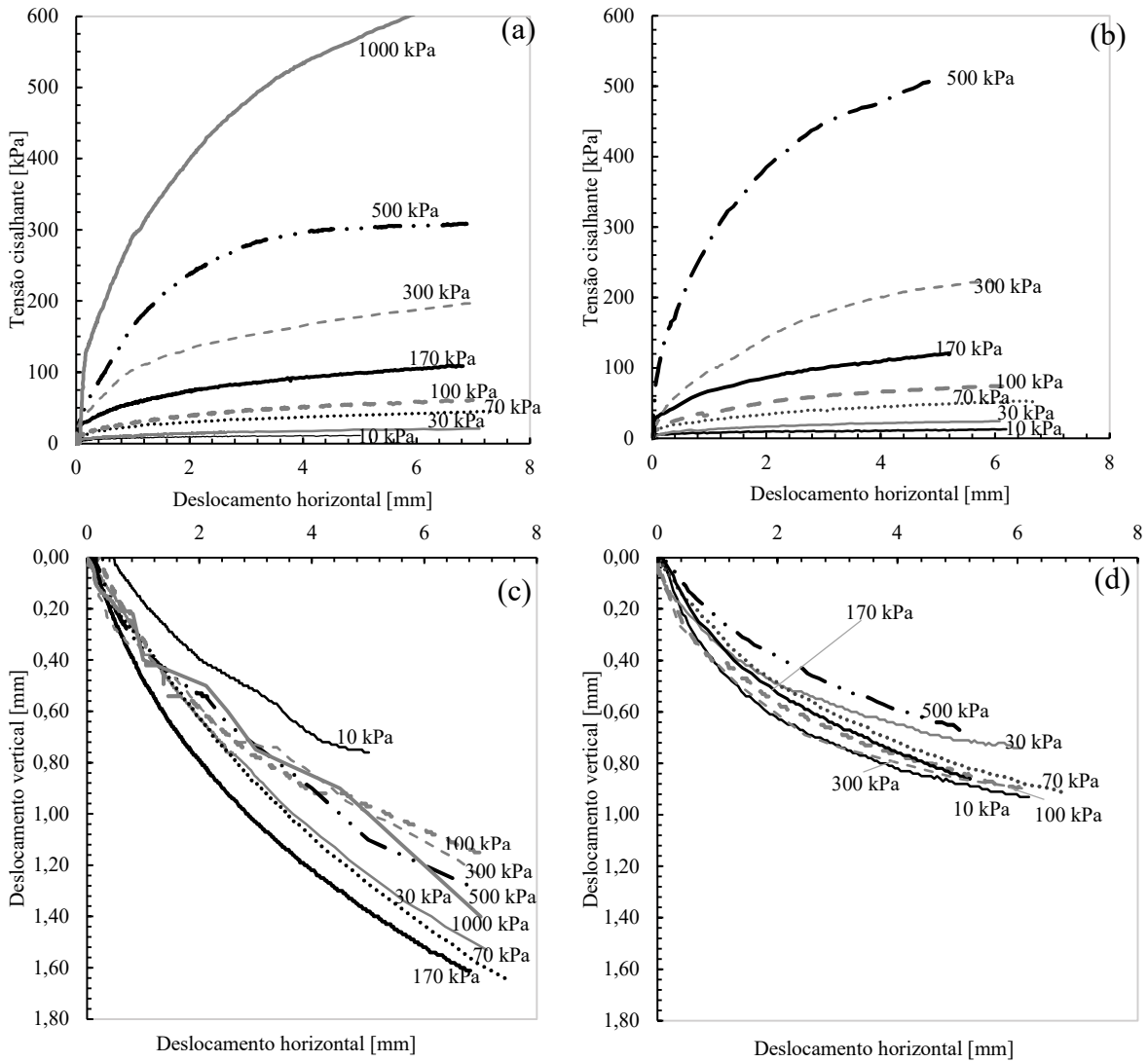


Figura 6.5 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal: a) N; b) LD; Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal: c) N ; d) LD;

Por outro lado, nas amostras compactas (Figura 6.6) as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal mostram comportamento com dilatância em tensões verticais de 10 e 30 kPa para a amostra PN e em 10, 30, 70, 100, 170 e 300 kPa para a amostra M.

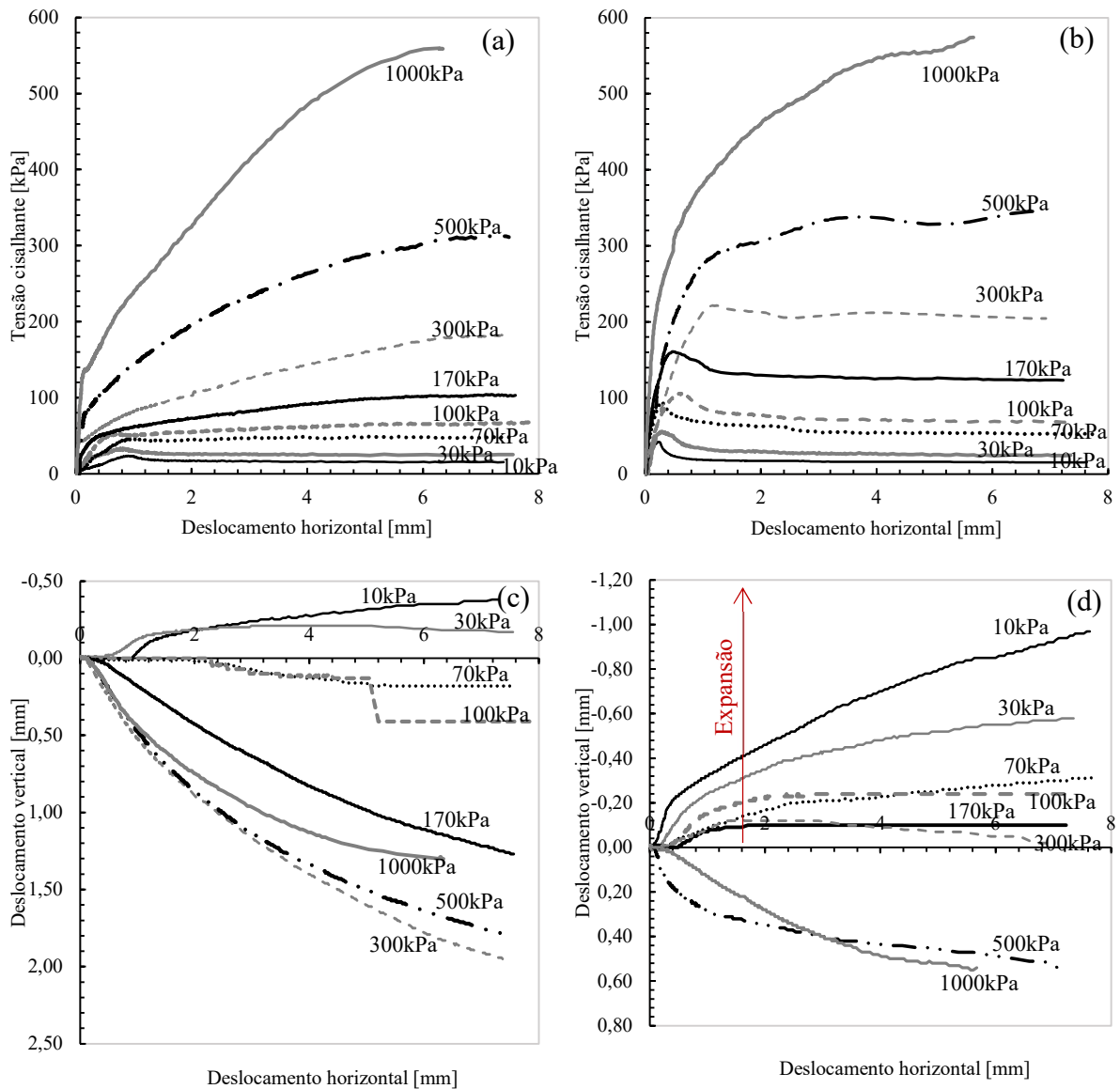


Figura 6.6 – Curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal: a) PN; b) M; Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal: c) PN ; d) M

De uma forma geral, as amostras mostram o quanto a estrutura do solo influencia no comportamento. A amostra intacta (N) apresentou as maiores deformações no momento do cisalhamento o que pode representar a influência da macroporosidade do solo, no entanto nas amostras compactadas, a expansão encontrada nas curvas deformação vertical x deslocamento horizontal evidencia a existência de dilatância ($\sigma_v' < 300$ kPa).

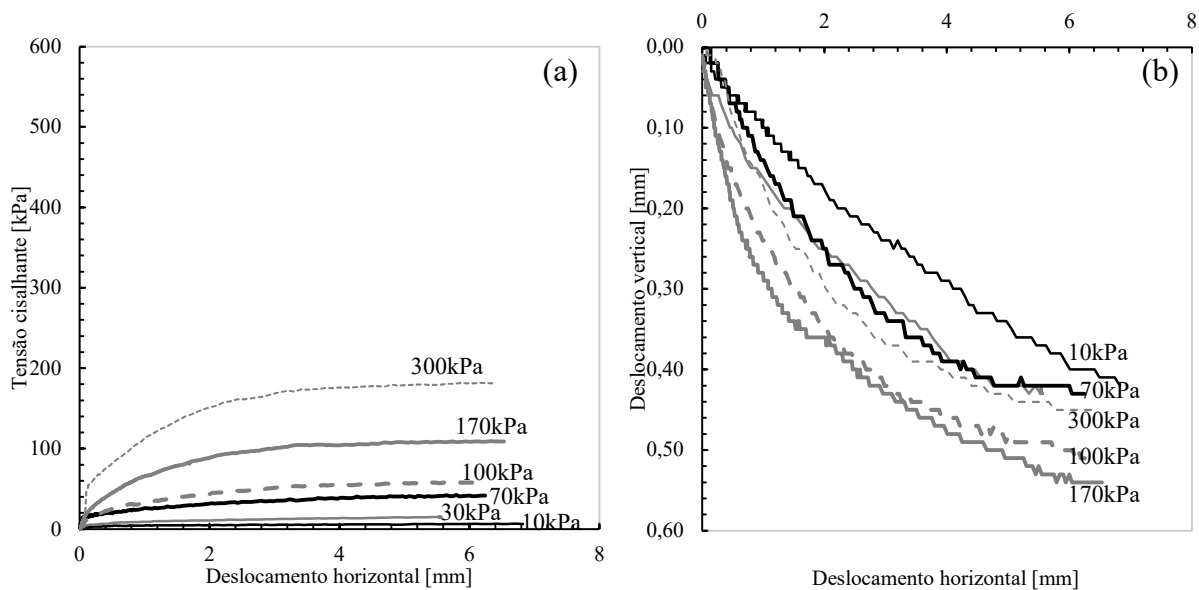


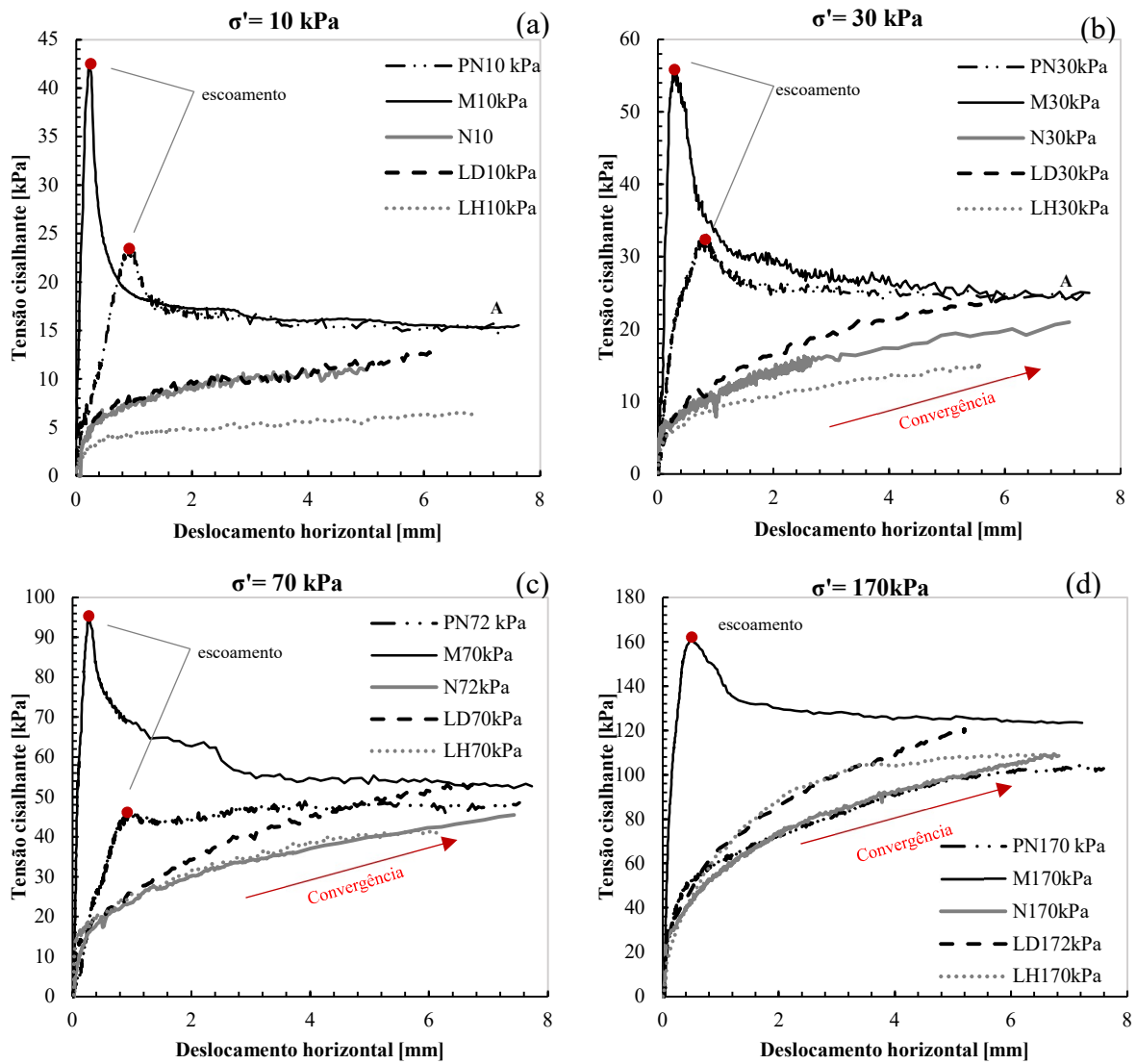
Figura 6.7 – Curvas de amostra reconstituída com hexametáfosfato (LH). (a) Tensão cisalhante x deslocamento horizontal (b) Curva de deformação vertical x deslocamento horizontal

Analisando os resultados apresentados e comparando-os entre as tensões verticais aplicadas (10, 30, 70, 170 e 300kPa) verifica-se um comportamento diferente entre as amostras compactas (PN, M) com as N, LH e LD (Figura 6.8) em tensões baixas (< 70kPa). No entanto com aumento de tensão as resistências residuais tendem a convergirem. As amostras compactas apresentam um comportamento elástico até o ponto de escoamento onde há redução de resistência (pós-pico) e estabilização. Porém em níveis de tensão a partir de 70 kPa a amostra PN diferentemente das amostras M apresentam comportamento plástico com crescimento linear (Figura 6.8e).

Esse comportamento corresponde a resultados parecidos ao de solos residuais estruturados encontrados em Sangrey (1972), Vaughan *et al.*, (1988), Cuccovillo e Coop (1999) e Reis (2004) em que o comportamento se resume no seguinte: as cimentações governam o comportamento do material quando as tensões são baixas (10, 30, 100 kPa). Após o pico de resistência; (a) associado à destruição das cimentações, a resistência por atrito não é suficiente para permitir o aumento de tensão e têm-se a queda da curva (Ponto A das curvas). (b) a tensão confinante sendo mais alta, é capaz de prover resistência por atrito, após plastificação das cimentações (conforme PN em 70 kPa-Figura 6.11c) (c), suficiente para que a tensão continue a crescer até a ruptura (Figura 6.11e).

Esses estudos, ao comparar com a estrutura do solo tropical, devem sofrer adaptações. A cimentação ao qual essas pesquisas descrevem pode ser relacionada às agregações que podem ter sido rompidas com o processo de cisalhamento causando o pico de dilatância, ou um efeito

das ligações provocado durante a compactação as quais foram rompidas durante o ensaio. Nas amostras intactas (N), e reconstituídas (LD e LH) percebe-se que o aumento da resistência pode ser atribuído as agregações que fazem prevalecer o efeito friccional.



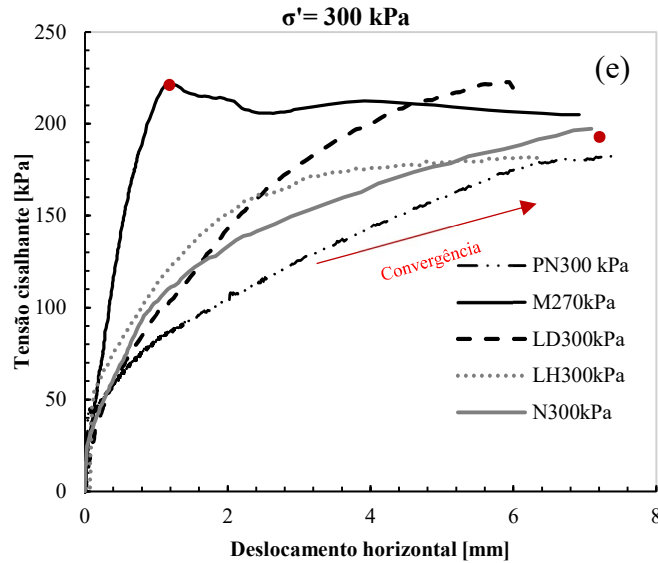


Figura 6.8 – Comparação entre as diferentes estruturas: curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal. (a) $\sigma' = 10$ kPa (b) $\sigma' = 30$ kPa (c) $\sigma' = 70$ kPa (d) $\sigma' = 170$ kPa (e) $\sigma' = 300$ kPa

6.4 DILATÂNCIA

Pode-se observar também a ação da estrutura no comportamento mecânico por meio dos seus efeitos nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Taylor (1948) define que a resistência mobilizada ($\phi'm$) é o efeito combinado da dilatância (ψ) mais o atrito real último (μ). Uma vez que o solo se expande durante o cisalhamento pode-se supor que o deslizamento entre partículas adjacentes ocorra não ao longo de planos horizontais, mas sim em planos inclinados de um ângulo ψ com a horizontal, denominado ângulo de dilatação. Assim, o trabalho realizado pelas forças externas aplicadas P e Q durante os deslocamentos δ_y e δ_x é dado por (equação 6.0):

$$\delta W = P \times \delta_y + Q \times \delta_x \quad (6.0)$$

onde o termo $Q \times \delta_x$ corresponde ao trabalho realizado para cisalhar a amostra enquanto o termo $P \times \delta_y$ corresponde à variação de volume durante o cisalhamento.

Os resultados das trajetórias Q/P em relação ao deslocamento horizontal são apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10, onde Q corresponde à força cisalhante em relação à carga aplicada no topo da amostra (P). Percebe-se que as amostras indeformadas (N) e em lama (LD) apresentam comportamento semelhante onde inicialmente as trajetórias mostram um desvio inicial, no entanto, com o aumento de tensão tendem a convergirem a um valor de Q/P aproximadamente entre 0,45 e 0,7. O mesmo comportamento convergente se percebe nas

amostras compactadas (PN e M), porém os picos demonstram comportamento dilatante, nesse caso entre as tensões de 10 a 30 kPa para as amostras PN, e 10 a 300 kPa para amostras modificadas (M).

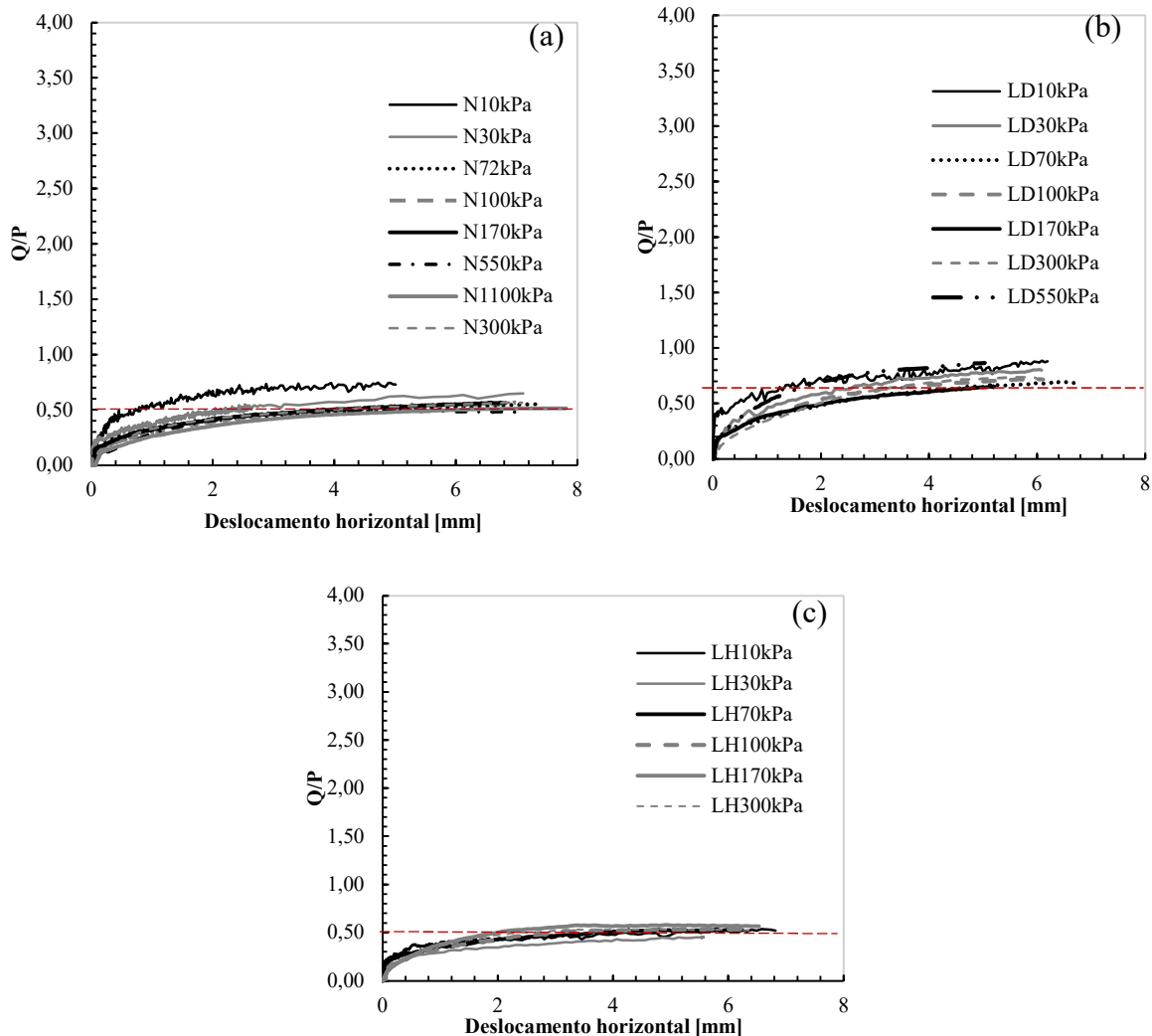


Figura 6.9 – Curvas Q/P x deslocamento horizontal (a) N (b) LD (c) LH

A Tabela 6.1 representa os ângulos de atrito real último para as diferentes estruturas a partir das tensões aplicadas os quais adotaram-se com início da convergência das curvas Q/P . Nota-se que as tensões verticais iniciais apresentam valores maiores e conforme aumenta a tensão há uma tendência de estabilização e convergência entre os ângulos de atrito. Esse efeito não é observado nas amostras reconstituídas onde há certa estabilização de μ . Esse comportamento também é percebido por Kuhn *et al.*, (2022) que indicam que solos com elevado índice de agregação podem apresentar resistência mobilizada bem como ângulo de atrito último elevado.

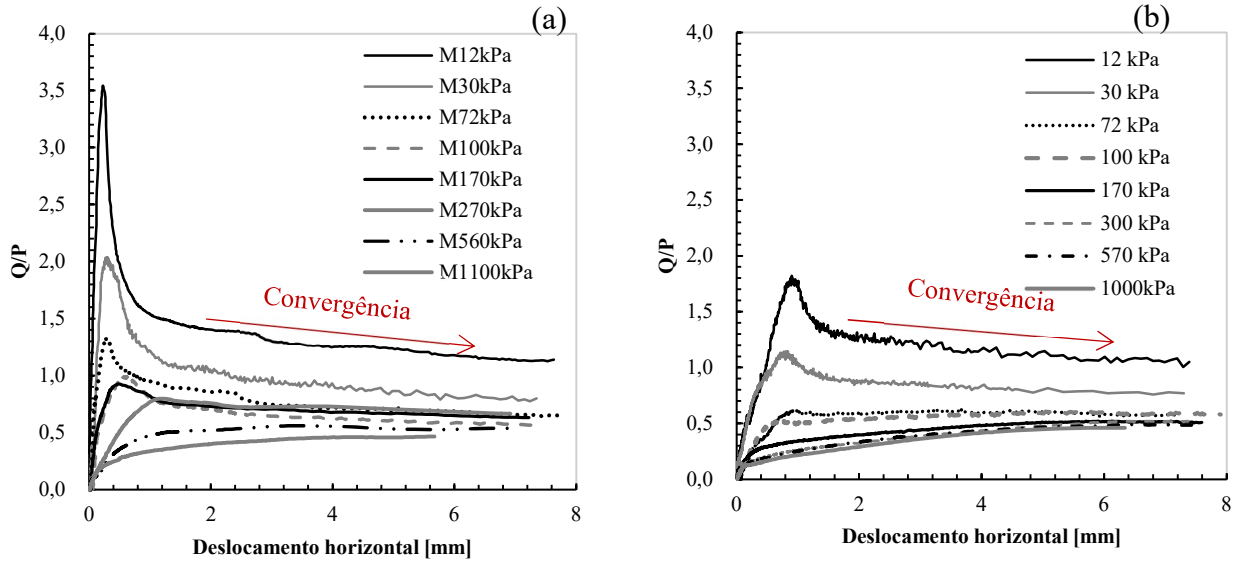


Figura 6.10 – Curvas Q/P x deslocamento horizontal (a) M (b) PN

Tabela 6.1 – Ângulos de atrito real último

Amostra	Tensão efetiva vertical, σ'_v (kPa)							
	10	30	70	100	170	300	500	1100
I	33°	31°	26,6°	26,6°	31°	-	26,6°	26,6°
PN	46,4°	37,5°	30,1°	30,1°	27°	27°	26,6°	26,6°
M	48,7°	37,6°	33°	29,7°	29,7°	32,2°	28,4°	25,2°
LD	39,7°	36,9°	35°	35°	35°	35°	40°	-
LH	26,7°	24,2°	26,6°	26,6°	28,8°	26,6°	-	-

A Figura 6.11 corresponde aos valores da dilatância obtidos a partir da relação entre o deslocamento vertical e horizontal ($\Delta y/\Delta x$). De uma forma geral, o solo laterítico tende a apresentar dilatância em tensões menores que 300 kPa para as amostras M e PN. No entanto, nas amostras reconstituídas e intactas (N) não há picos definidos de dilatância (Figura 6.11a,d,e).

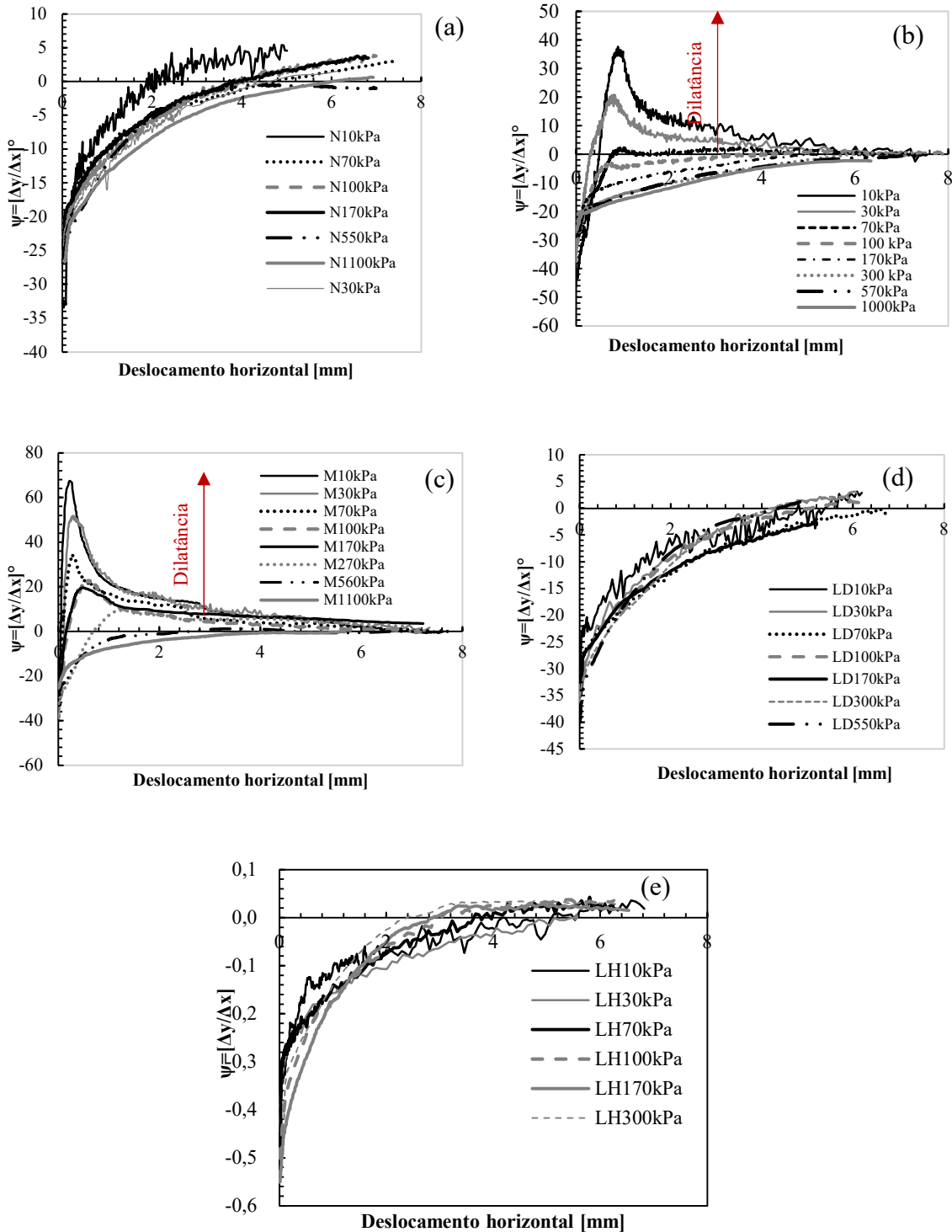


Figura 6.11 – Dilatância x deslocamento horizontal (a) N (b) PN (c) M (d) LD (e) LH

Ao analisar a relação dos ângulos de atrito de pico e ângulo de atrito último residual com a tensão efetiva aplicada (Figura 6.12), nota-se que com o aumento dos níveis de tensão os ângulos últimos e de pico se aproximaram (26°) indicando em maiores tensões um comportamento único para todas as amostras. A amostra reconstituída LH apresentou valores

constantes tanto de ângulo de atrito de pico quanto último evidenciando aspectos de desestruturação. Por outro lado, as amostras compactadas apresentaram os maiores valores de ângulo de pico devido à dilatância ($\sigma' < 300$ kPa) evidenciando a ação da estrutura nessas tensões. A dilatância das amostras intactas apresenta comportamento semelhante quando comparadas com a das amostras reconstituídas, ou seja, a estrutura nesse caso não desempenhou contribuição de imbricamento de agregações ou cimentação.

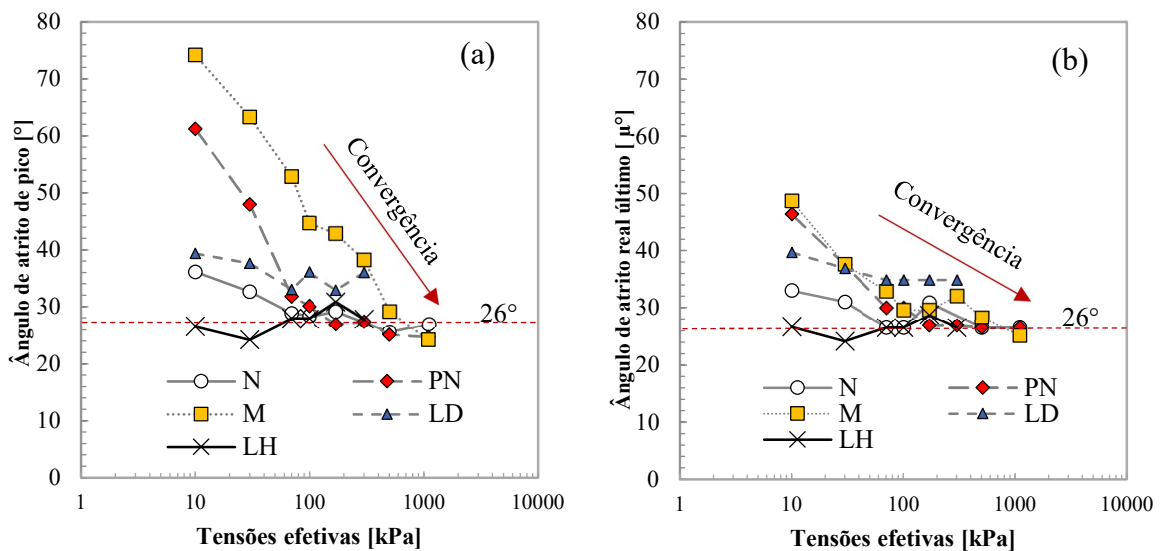


Figura 6.12 – Ângulos de atrito de pico e último a partir das Curvas Q/P (a) Ângulo de atrito de pico (φ'_m) (b) Ângulo de atrito último (μ^o)

6.5 ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA E ESTRUTURA APÓS CISALHAMENTO

Para um melhor entendimento do efeito da estrutura empregou-se neste item a análise das envoltórias de ruptura juntamente com análises qualitativas e semiquantitativas a partir das imagens obtidas por MEV e uso do programa *ImageJ*. A Figura 6.13 apresenta a envoltória resultante de ensaios de cisalhamento direto na condição saturada para a amostra intacta (N) em que foram utilizadas tensões entre 14 e 1090 kPa. Os resultados indicam ângulo de atrito a 28° e intercepto coesivo de 1 kPa.

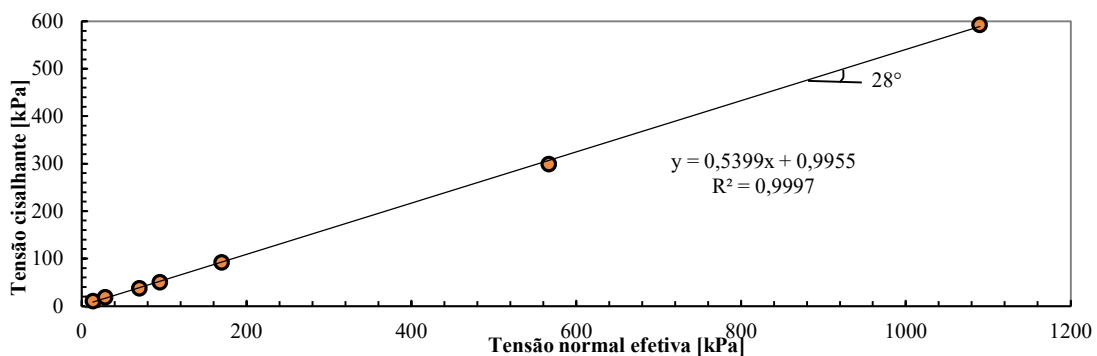


Figura 6.13 – Envoltória cisalhante amostra intacta (N)

Ao analisar a envoltória (N-Figura 6.13) percebe-se uma característica típica de areias fofas devido ao baixo intercepto coesivo (1kPa) e ângulo de atrito característico de solos arenosos (28°). Este resultado condiz ao comportamento explicado por autores como Bressani e Vaughan (1989) por ser um solo residual fracamente cimentado, essas ligações podem não ter suportado aos níveis de tensões inicialmente aplicados, ou até mesmo perdidas no próprio processo de moldagem. Assim, o comportamento deste solo é regido pela resistência das agregações juntamente com a diminuição dos macroporos.

Esta hipótese é confirmada ao observar na Figura 6.14 na qual corresponde a imagens antes ao cisalhamento (0 kPa) e nas tensões 70 e 300 kPa. Inicialmente se verifica que há uma redução do tamanho das agregações (0 a 70 kPa) o qual se intensifica com o aumento de tensão em 300 kPa (Figura 6.14h). Por outro lado, os microporos da estrutura N juntamente com as micro agregações não apresentaram variação com o aumento de tensão mostrando concordância com os definidos nas amostras a partir dos ensaios MIP.

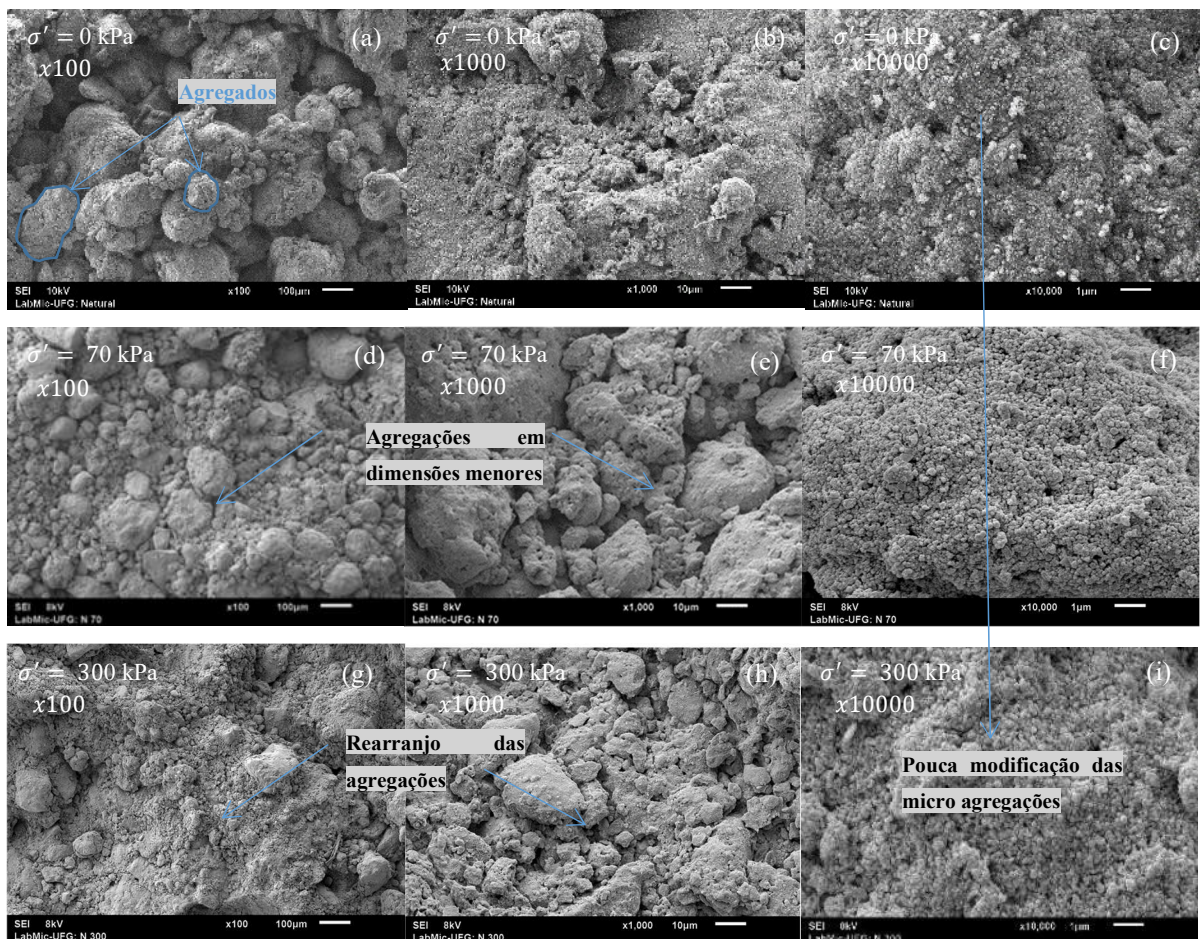


Figura 6.14 – Estrutura intacta (N). (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x10000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$.

Observa-se na Figura 6.15 os gráficos semiquantitativos da amostra N com respeito a forma bem como a área das agregações. Nota-se a mudança da forma das agregações entre 0,6 e 0,7 nas tensões de 300kPa e a diminuição da área com o aumento de carga que acontecem no plano cisalhante. As imagens delimitadas pelo uso do *software ImageJ* encontram-se no Apêndice E.

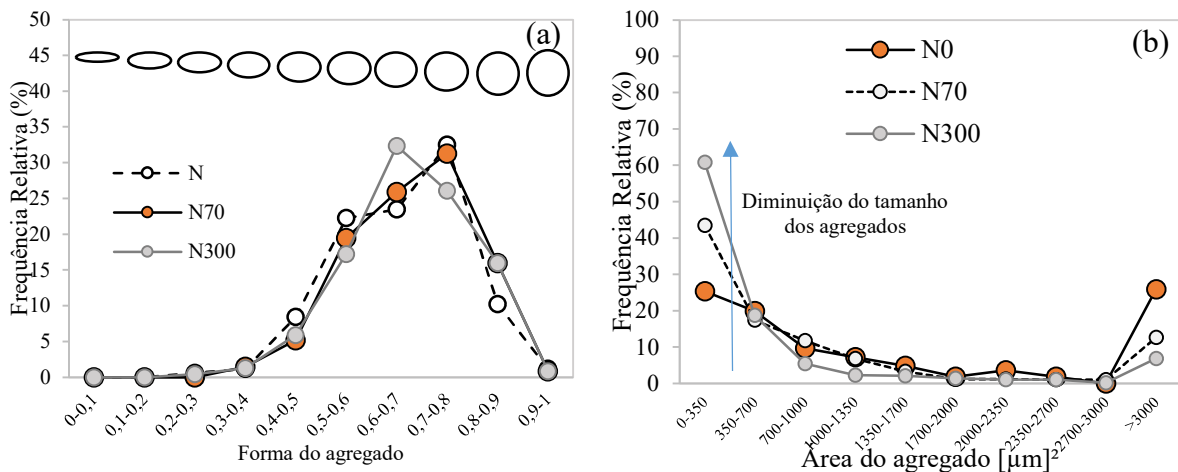


Figura 6.15 - Gráficos semiquantitativos amostra N (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados

Na Figura 6.16a,b estão representados os diagramas circulares bem como a frequência relativa x orientação das agregações quanto a amostra intacta (N). Percebe-se que o processo de cisalhamento formou uma orientação que antes era randômica (0 kPa), passando para 35° (70 kPa) e com aumento de tensão uma tendência em 15-20° (300 kPa).

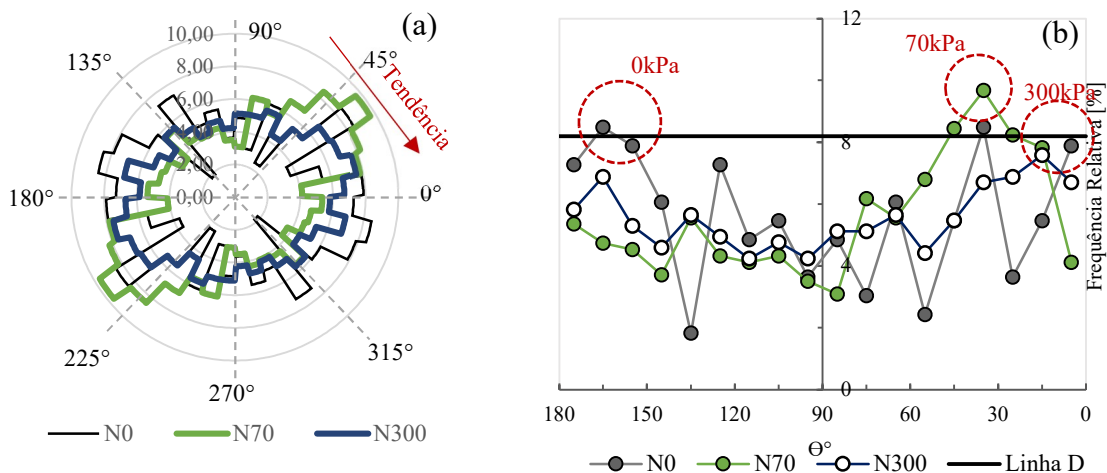


Figura 6.16 – Orientações quanto aos agregados da amostra N. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa versus orientação

Os resultados mostrados para a amostra intacta (N) expõem as modificações estruturais durante o adensamento e cisalhamento. Percebe-se que com o aumento de tensão seus macroporos são preenchidos por agregados de área correspondente entre 0 e 350 μm^2 , além disso há modificação da forma do agregado, indicando rearranjo em 300 kPa.

Ao observar o comportamento da amostra compactada na condição Proctor normal (Figura 6.17) verifica-se uma diminuição do ângulo de atrito (26°) e consequente aumento do intercepto coesivo (15,8 kPa) em relação à amostra intacta (N). Além disso, percebe-se que há um comportamento bilinear (Figura 6.17b) onde o ponto de inflexão é igual a 100 kPa. Em valores abaixo deste ponto de inflexão (< 100 kPa) percebe-se que houve atuação de dilatância.

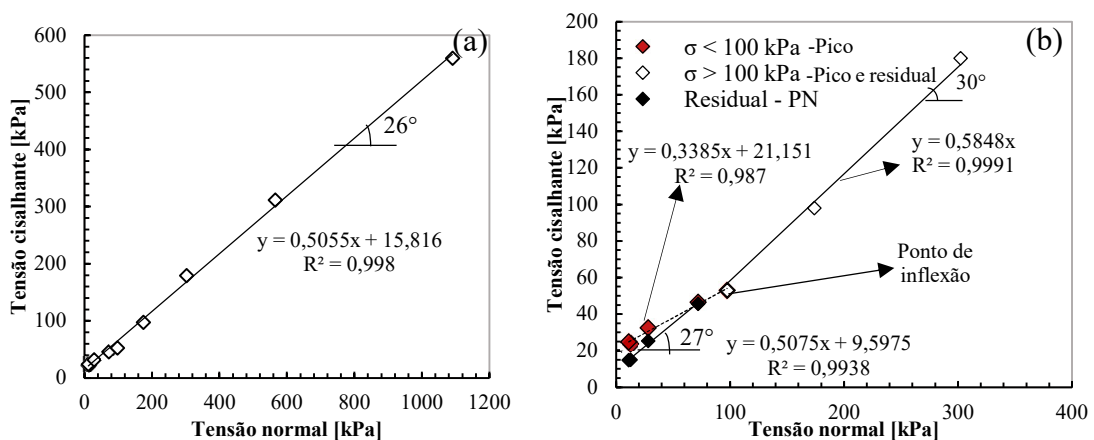


Figura 6.17 - Envoltória cisalhante amostra Proctor normal. (a) Envoltória generalizada (b) Envoltória valores de tensões efetivas menores que 400 kPa.

A Figura 6.18 corresponde as imagens da estrutura compactada PN. As ampliações evidenciam que no instante 0 kPa as amostras apresentam agregações que estão em rearranjo (união dos agregados) e pouco nítidas. No entanto, com o aumento de tensão em 70 kPa observa-se agregações soltas e seus tamanhos reduzidos (Figura 6.18d, e). Com o aumento de tensão se inicia o agrupamento com redução de macroporos (Figura 6.18g, h). Os microporos e micro agregações, por sua vez, não apresentam modificações significativas.

A Figura 6.19a,b corresponde ao gráfico em relação a forma e área do agregado da amostra compactada PN. Nota-se a mudança da forma de circular para angular conforme há aumento de tensão. Além disso, verifica-se crescimento no tamanho da área das agregações em 300 kPa, e consequente rearranjo com áreas entre 0-350 μm^2 .

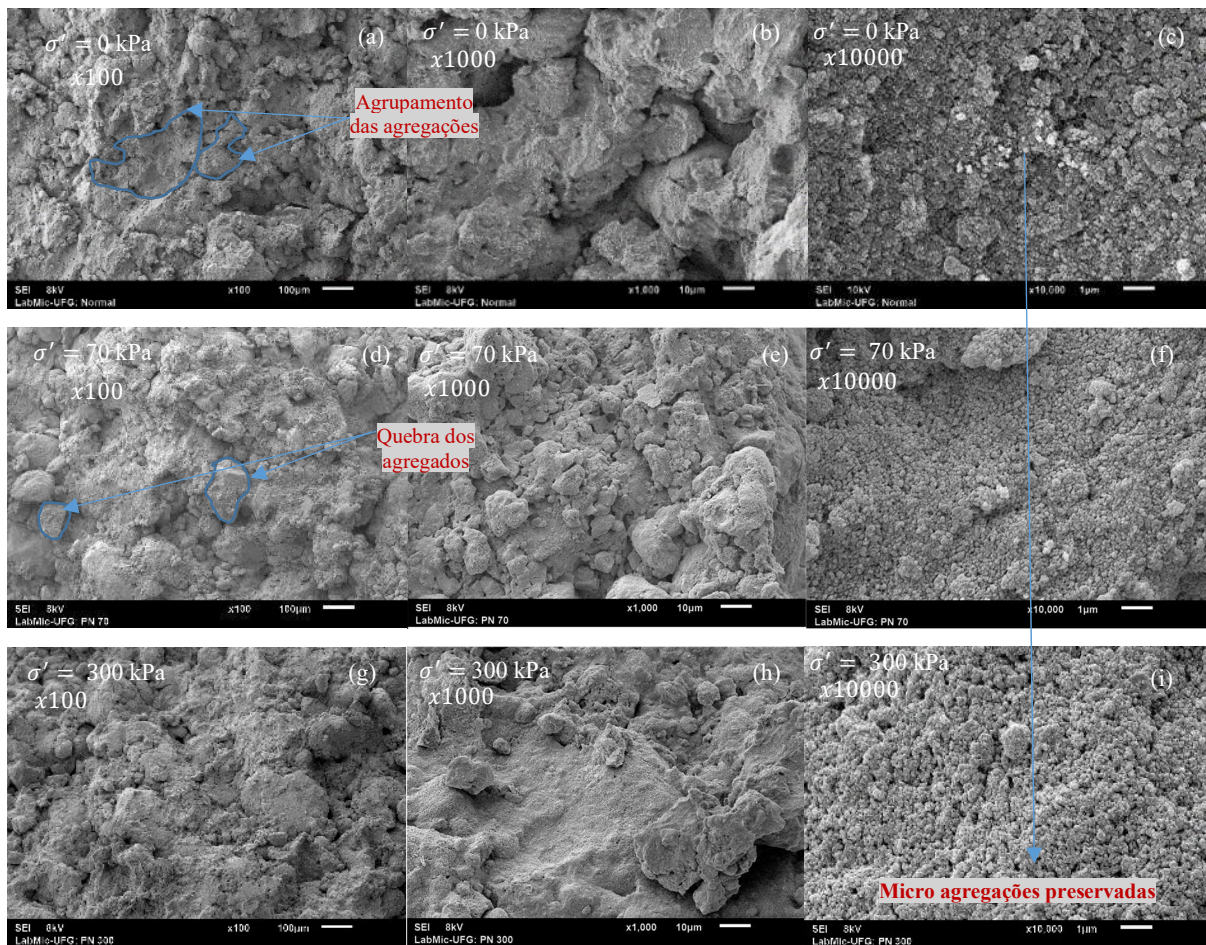


Figura 6.18 – Estrutura PN após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0$ kPa (b) x1000: $\sigma' = 0$ kPa (c) x10000: $\sigma' = 0$ kPa (d) x100: $\sigma' = 70$ kPa (e) x1000: $\sigma' = 70$ kPa (f) x10000: $\sigma' = 70$ kPa (g) x100: $\sigma' = 300$ kPa (h) x1000: $\sigma' = 300$ kPa (i) x10000: $\sigma' = 300$ kPa.

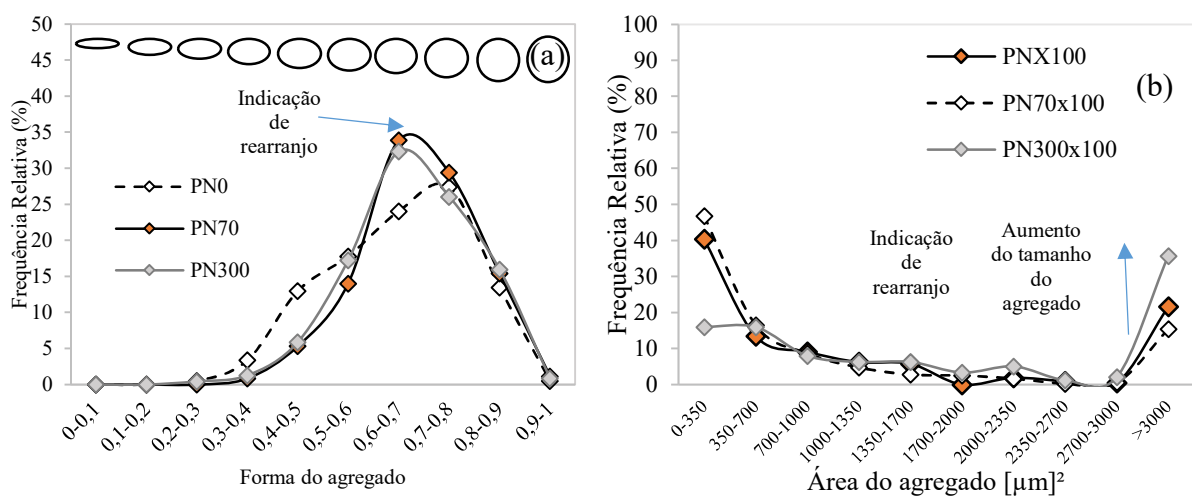


Figura 6.19 – Gráficos semiquantitativos amostra PN (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados

Ao analisar as rosetas de inclinação (Figura 6.20a) e a frequência relativa x orientação (Figura 6.20b) percebe-se uma tendência de mudança de orientação com o aumento da tensão efetiva em 70 kPa onde ocorre dilatação, no entanto, em valores de 300 kPa o qual a dilatação não é encontrada as inclinações estão próximas às tensões efetivas de 0 kPa (15°).

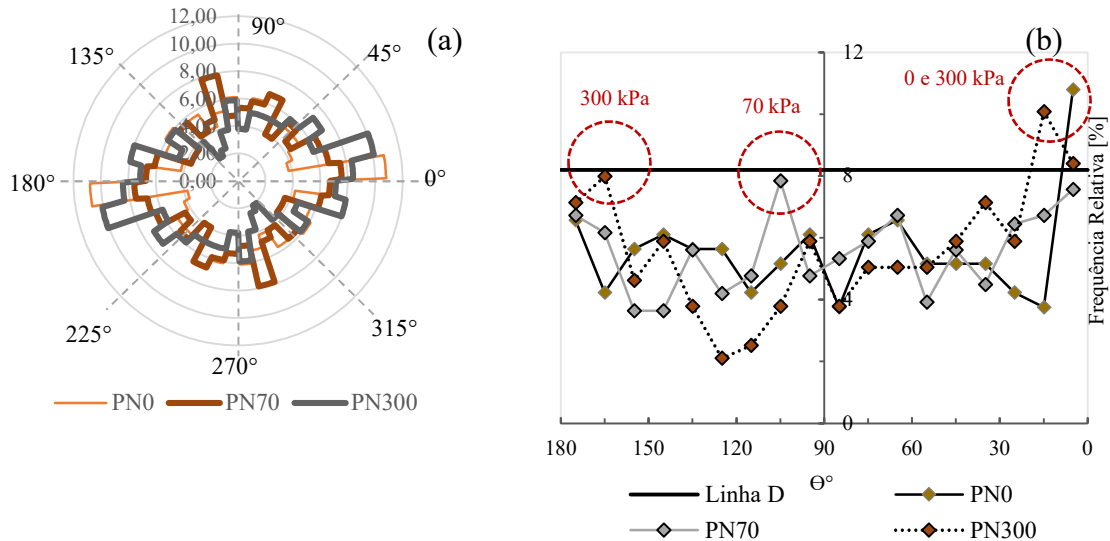


Figura 6.20 – Orientações quanto aos agregados da amostra PN. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa *versus* orientação

A bi linearidade da envoltória também é percebida na amostra compactada com a energia modificada (M) com ponto de inflexão igual a 270 kPa (Figura 6.21), o que pode ser explicado pelo aumento da energia de compactação e conseqüente rearranjo das agregações. No geral, a envoltória apresentou ângulos de 36,6° e 34,6° para valores residuais e de pico respectivamente. Para tensões acima de 270kPa a envoltória exibiu ângulo de atrito efetivo de pico em 23°.

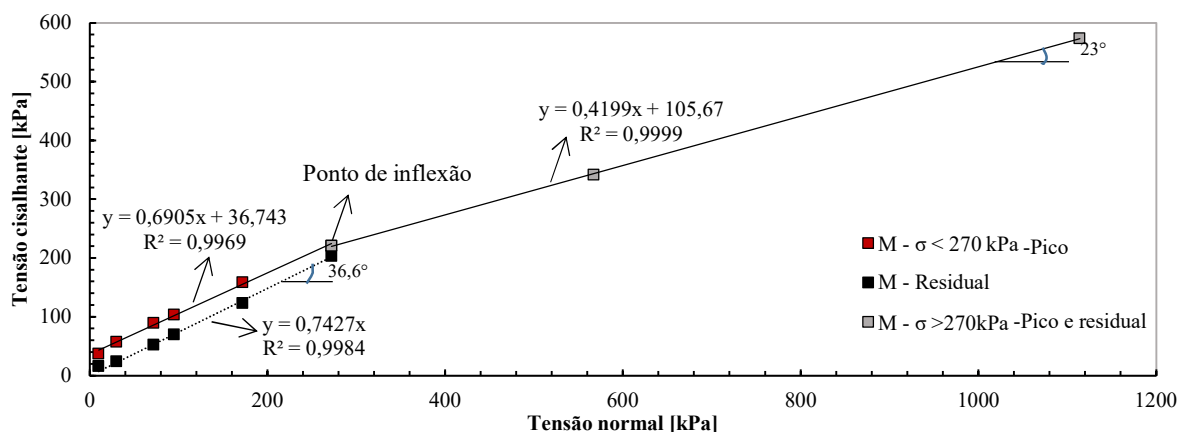


Figura 6.21 – Comportamento cisalhante estrutura com a energia modificada.

Percebe-se nas amostras compactadas que sofreram a ação cisalhante em $\sigma' = 70\text{kPa}$ revelaram agregações na linha de cisalhamento. Esse comportamento é mais nítido nas amostras compactadas à energia modificada (M) onde as agregações são destacadas em 70 kPa (Figura 6.22d) que coincidentemente são as estruturas as quais sofreram dilatação. Com o aumento de tensão ($>300\text{ kPa}$) os agregados não são evidentes revelando uma estrutura apenas com microporos (Figura 6.22g).

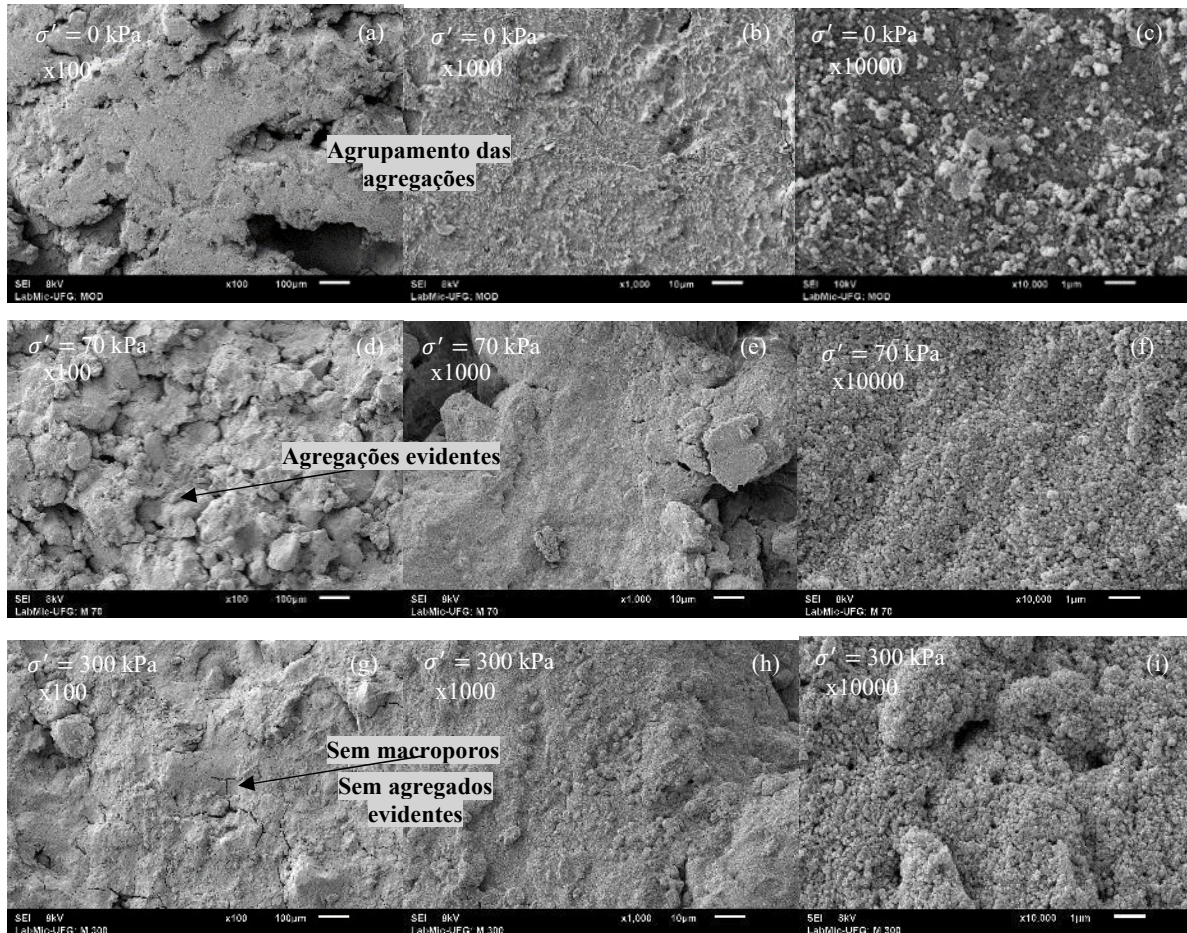


Figura 6.22 – Estrutura M após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$.

Estas análises, nas amostras M, são evidenciadas a partir dos gráficos semiquantitativos (Figura 6.23) realizados em ampliações x100 e x10000. Em 0 kPa de tensão aplicada não se observa agregações nítidas na escala x100, assim se considerou as micro agregações em escala x10000. Por outro lado, com o cisalhamento na tensão efetiva de 70 kPa observa-se agregações devido a área de agregados encontrada ($>3000\ \mu\text{m}^2$). Com o aumento da tensão (300 kPa)

percebe-se que houve um agrupamento dos agregados impossibilitando a análise nesta tensão. Assim, ao analisar as orientações da amostra modificada (M) verifica-se ângulos entre 45° e 65° em 70 kPa de tensão efetiva (Figura 6.23b) o que demonstra que houve movimentação das agregações.

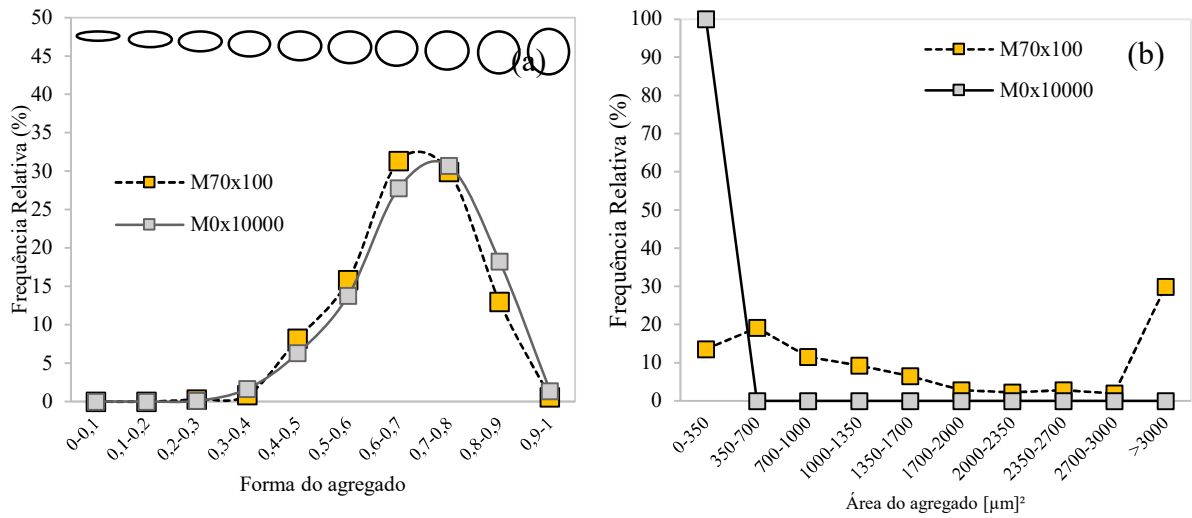


Figura 6.23 – Gráficos semi quantitativos amostra M (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados

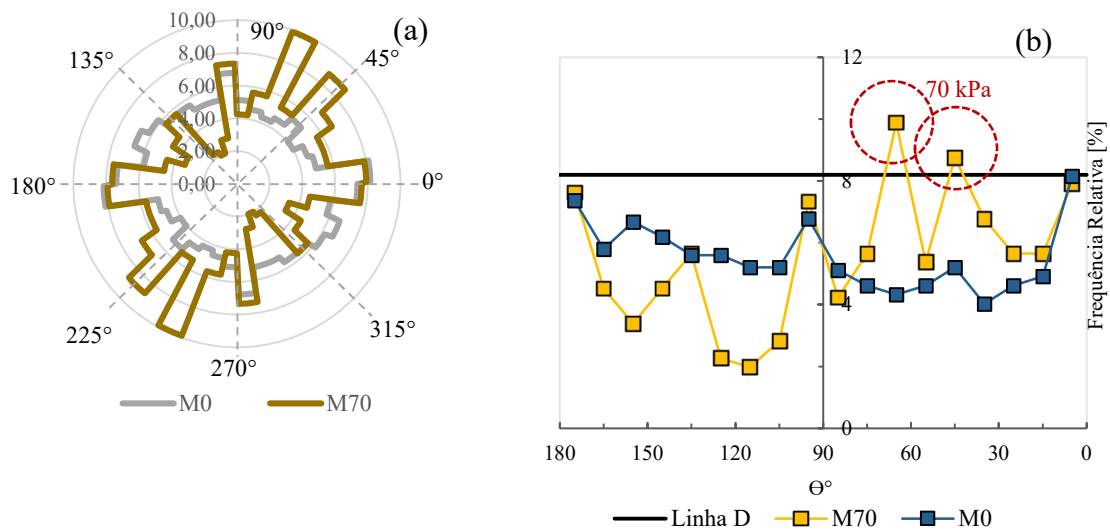


Figura 6.24 – Orientações quanto aos agregados da amostra M. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa *versus* orientação

As amostras reconstituídas LD e LH, por outro lado, apresentam comportamento cisalhante diferente das amostras compactadas sendo mais parecido com os das amostras intactas (N). A envoltória da estrutura reconstituída LD (Figura 6.25) apresentou ângulo de

atrito (ϕ') de 35° sendo próximo a inclinação do intercepto de LH (31°) e apresentando intercepto coesivo igual a zero.

As envoltórias bi lineares nas amostras compactadas indicam que a dilatância estaria relacionada a estrutura da amostra devido à quebra das agregações ou da coesão ocasionada pelo rearranjo (Mahalinga-Iyer e Williams, 1994). Por outro lado, o comportamento da amostra intacta e lama não apresenta dilatância para nenhum nível de carga. Ao comparar as amostras com as envoltórias reconstituídas (Figura 6.25) percebe-se que as estruturas que apresentaram dilatância correspondem a valores acima das envoltórias LH e LD ($\sigma' < 270$ kPa).

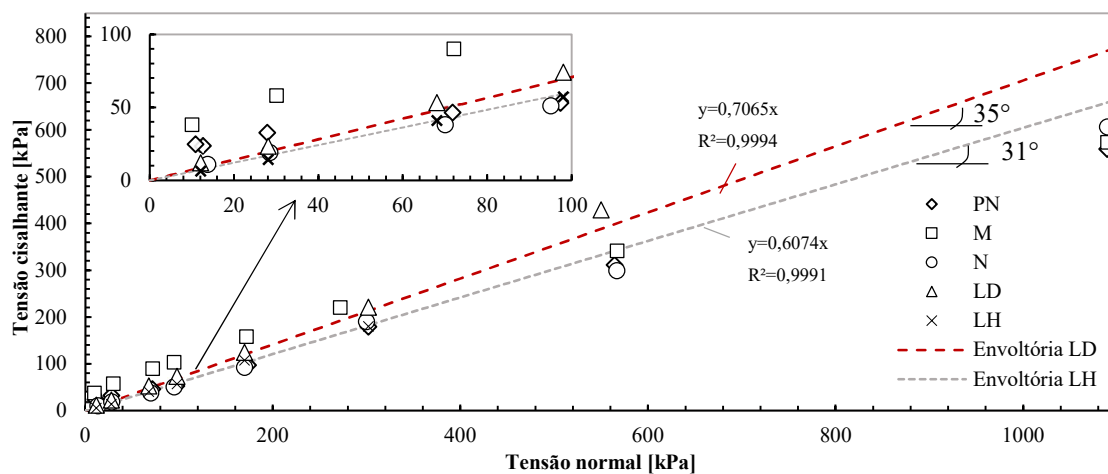


Figura 6.25 – Envoltórias de cisalhamento: tensão de pico

A estrutura da amostra LD ainda apresenta agregações cuja forma se encontra na faixa de 0,6 a 0,8. Há ainda o crescimento de área do agregado conforme o aumento da tensão cisalhante (Figura 6.27). No entanto, em tensões a 300 kPa percebe-se que há união da agregação (Figura 6.26g) característica esta encontrada em todas as outras estruturas nesta tensão. Além disso, a orientação da amostra LD apresentou modificação de 165° para 65° na tensão de 70 kPa (Figura 6.28) porém não indicando efeitos sobre o comportamento.

A amostra reconstituída LH, por sua vez, apresentou melhor correspondência em tensões efetivas aplicadas para valores residuais (Figura 6.25) o que corrobora para a ideia de estado intrínseco (Burland, 1990; Otalvaró *et al.*, 2015; Lopes, 2016). No entanto, as imagens mostram que o processo de reconstituição com hexametáfosfato de sódio (pH 9) reduziram o tamanho dos agregados, mas não os eliminaram totalmente.

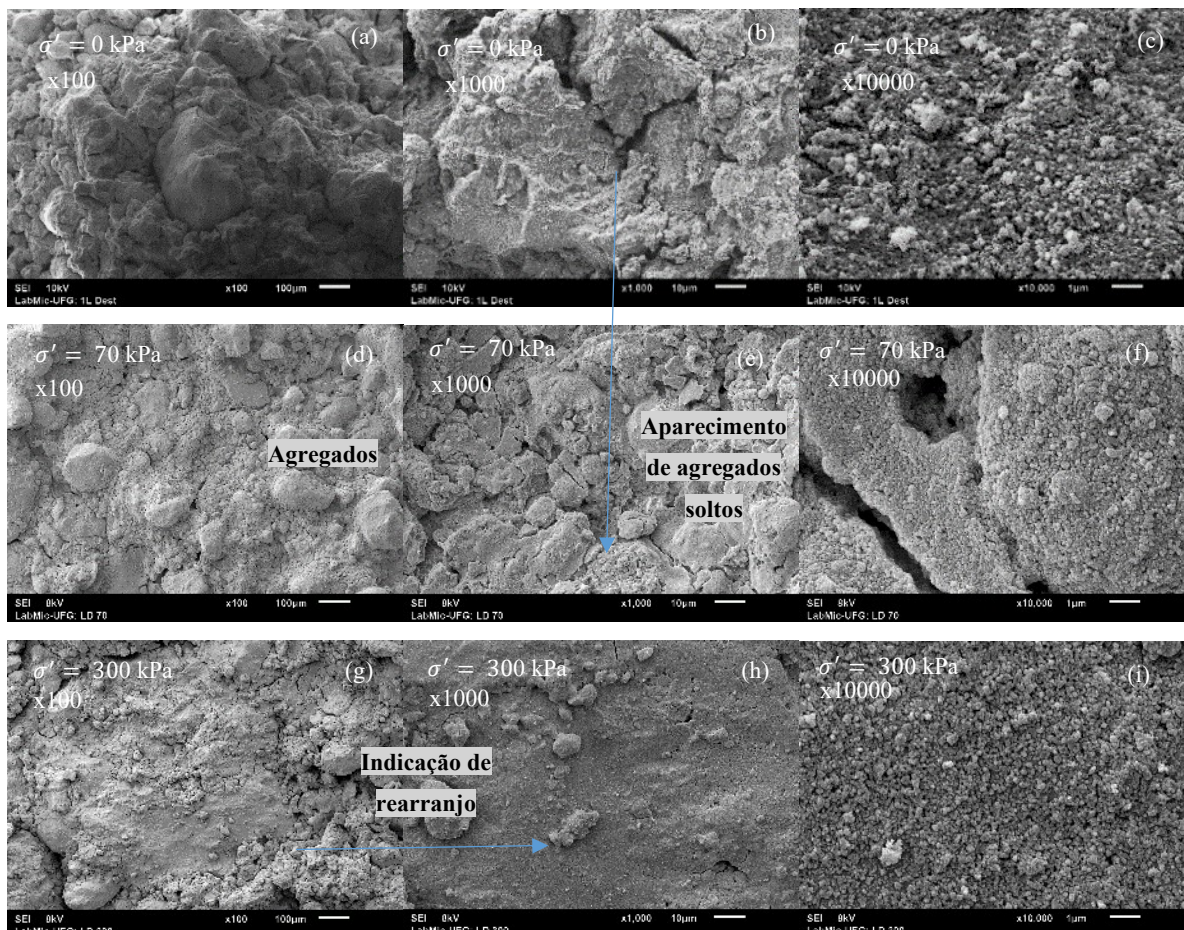


Figura 6.26 – Estrutura LD após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (b) x1000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (c) x10000: $\sigma' = 0\text{kPa}$ (d) x100: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (e) x1000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (f) x10000: $\sigma' = 70\text{kPa}$ (g) x100: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (h) x1000: $\sigma' = 300\text{kPa}$ (i) x10000: $\sigma' = 300\text{kPa}$.

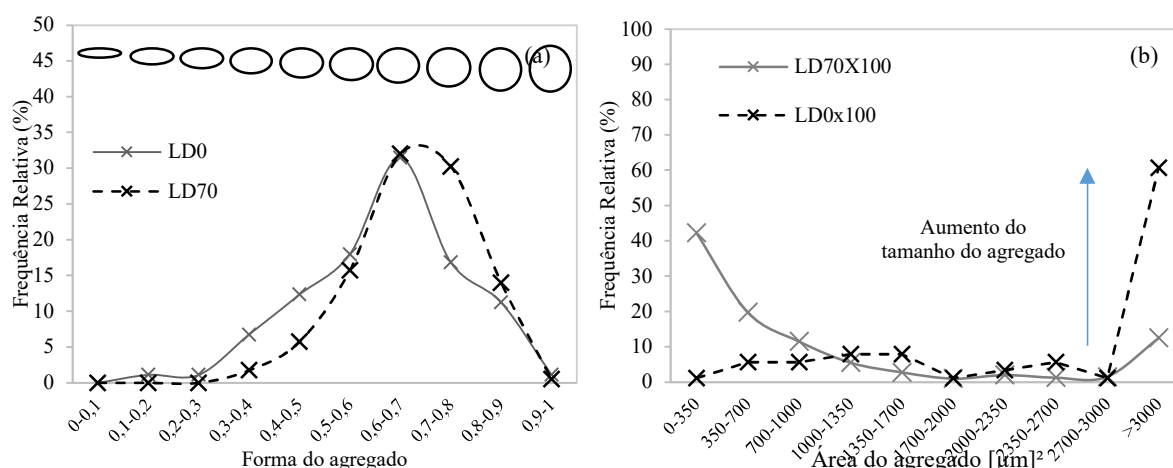


Figura 6.27 – Gráficos semiquantitativos amostra LD (a) Forma do agregado (b) Área dos agregados

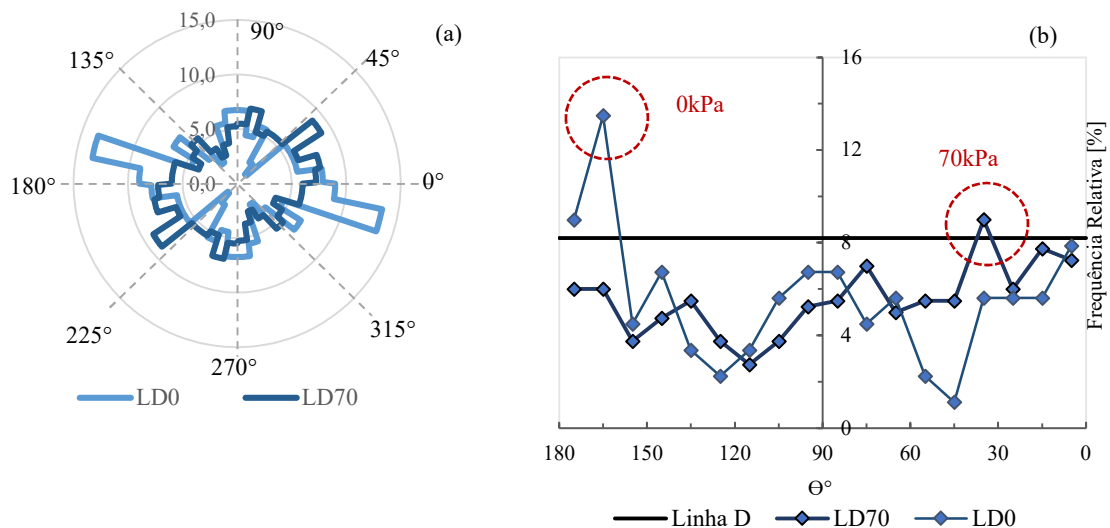


Figura 6.28 – Orientações quanto aos agregados da amostra LD. (a) Roseta de inclinação (b) Frequência relativa *versus* orientação

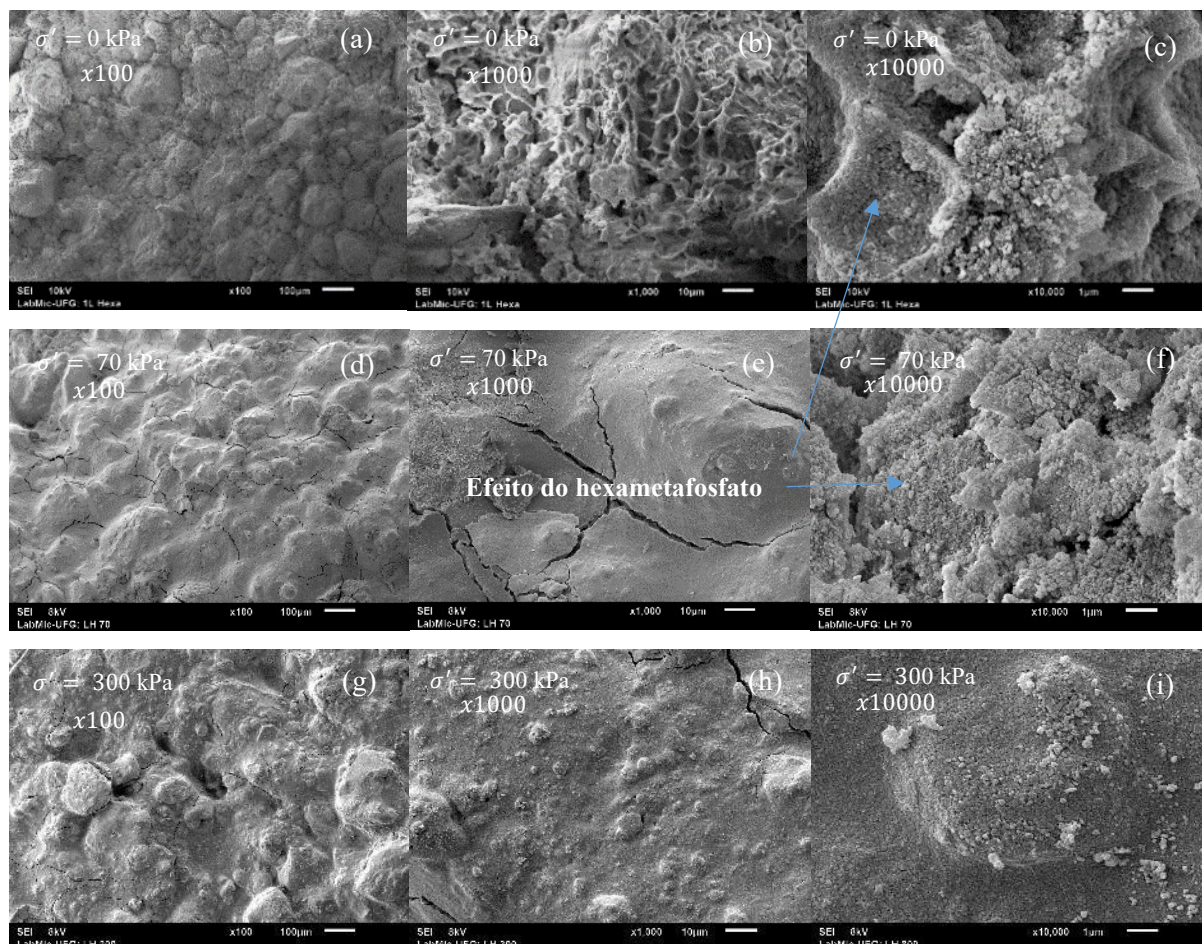


Figura 6.29 – Estrutura LH após adensamento e cisalhamento. (a) x100: $\sigma' = 0$ kPa (b) x1000: $\sigma' = 0$ kPa (c) x10000: $\sigma' = 0$ kPa (d) x100: $\sigma' = 70$ kPa (e) x1000: $\sigma' = 70$ kPa (f) x10000: $\sigma' = 70$ kPa (g) x100: $\sigma' = 300$ kPa (h) x1000: $\sigma' = 300$ kPa (i) x10000: $\sigma' = 300$ kPa.

As agregações encontradas nas amostras reconstituídas com uso do hexametáfosfato de sódio indicaram que não participam no acréscimo de resistência podendo ser utilizadas como um estado desestruturado. No entanto, com relação aos microporos nessa condição (LH), há um efeito causado pelo uso do hexametáfosfato observado nas ampliações x10000 (Figura 6.29c, f,i) em 0 e 70kPa de tensões aplicadas os quais desaparecem em 300 kPa.

Por fim, a Figura 6.30 demonstra a evolução microestrutural no processo de cisalhamento. Nas amostras intactas, o aumento de tensão ocasiona preenchimento de agregados nos macroporos existentes devido a quebra da agregação com perda de cimentação muitas vezes antes do processo de cisalhamento (Figura 6.30b). No entanto, nas amostras compactadas há presença de dilatância com aparecimento de agregações no plano cisalhante (Figura 6.30e, g). As amostras reconstituídas se comprimem por conta do adensamento do material coloidal com diminuição de poros (Figura 6.30i, k). Todas as estruturas com o aumento de tensão (> 300 kPa) tendem a ter o mesmo comportamento que reflete na mesma representação microestrutural (Figura 6.30c).

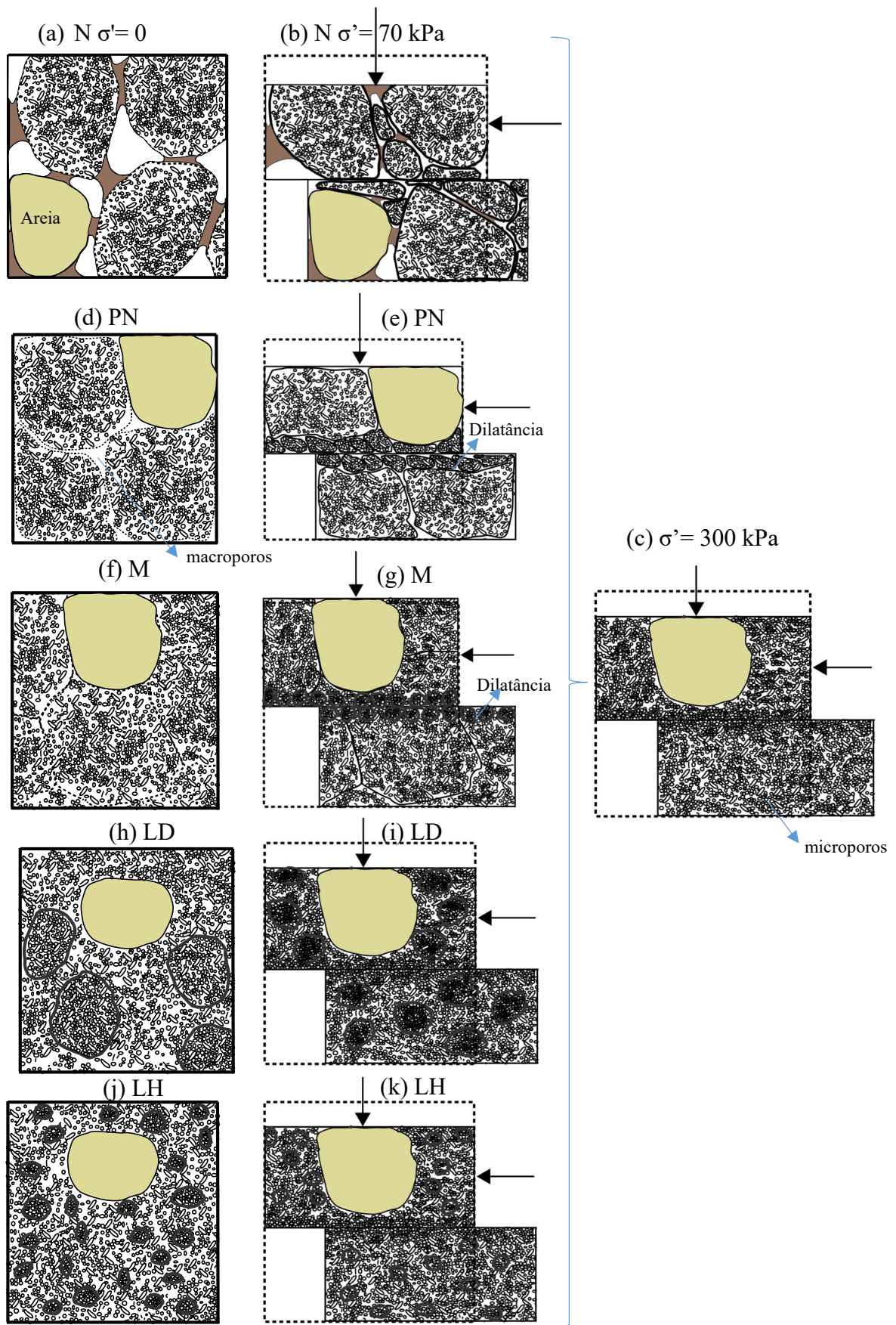


Figura 6.30 – Evolução microestrutural a partir da ação tensão-deformação

6.6 RESUMO

Este capítulo mostrou a importância da estrutura no comportamento mecânico do solo laterítico ao analisar a estrutura deste solo após o processo de ruptura. As curvas de tensão x deslocamento juntamente com os ensaios MIP mostraram que os adensamentos provocados antes ao cisalhamento reduzem significativamente os macroporos sendo que os microporos pouco se alteraram.

De uma forma geral, o comportamento das amostras compactadas é oposto aos das amostras intactas e reconstituídas em tensões verticais até 170 kPa o que se mostra pré-adensado para as amostras compactadas e normalmente adensado para as intactas e reconstituídas. No entanto, percebe-se que com o aumento de tensão (300 kPa) as curvas tendem a convergirem, o que também é evidenciado pela redução dos macroporos restando apenas os microporos nessa faixa de atuação de tensão.

Os dados semiquantitativos e qualitativos obtidos pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura revelam que há mudança de forma, tamanho das agregações e orientação. Nas amostras compactadas em tensões cisalhadas em 70kPa há evidências de agregações bem como orientação o que pode ser de fato resultantes do efeito da dilatância.

Os resultados mostram a complexidade em analisar a estrutura intacta de um solo laterítico. Nota-se que as cimentações frágeis, bem como a formação agregada evidenciam solos com macroporosidade. Por outro lado, as amostras compactadas (PN e M) apresentam um rearranjo das agregações, e este rearranjo mostra que a estrutura se comporta com aspectos ligados à dilatância, os quais são verificadas até 70 kPa e 300 kPa nas amostras Proctor normal (PN) e modificada (M), respectivamente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se que o solo tropical tem grande complexidade, o que se deve principalmente a estrutura do solo que se encontra com agregações, cimentações frágeis, macroporos e microporos. De fato, é um solo que tem característica de solo granular (na condição intacta), mas conforme ocorrem solicitações, adição de fluidos com alto pH há alterações na estrutura e consequentemente no comportamento seja ele compressível, cisalhante ou hidráulico.

Diante do que foi exposto a pesquisa contribuiu na análise do comportamento de solos tropicais estruturados a partir do estudo das diferentes amostras investigando como esses elementos atuam na resposta mecânica e hidráulica. Assim, observou-se:

- As diferentes amostras estudadas possibilitam a avaliação do efeito da estrutura no comportamento hidromecânico do solo tropical de Brasília - DF. De início verificou-se que as amostras intactas (N) se encontram com agregações dispostas de forma aleatória, cimentações fracas, dupla porosidade. As amostras compactadas, por sua vez, se mostraram com rearranjo/agrupamento nas agregações com formação de cimentação devido ao processo de compactação, com diminuição parcial (PN) e total (M) dos macroporos. Por fim, as amostras reconstituídas LD, com material coloidal disperso e agregações ainda evidentes, sendo necessário a utilização do hexametáfosfato de sódio para reduzir as agregações e obter amostras mais próximas do estado intrínseco (LH);
- A análise a partir das curvas granulométricas permitiram verificar que a agregação relativa *versus* variável microestrutural se apresenta inversamente proporcional, ou seja, quanto menor é a agregação relativa maior é variável microestrutural;
- As curvas características bem como a permeabilidade permitiram compreender como as diferentes estruturas impactam no comportamento hidráulico do solo. De modo que, nas amostras indeformadas (N) há deformação volumétrica até 1 kPa de sucção a qual pode ser atribuída em primeiro momento ao colapso (< 1 kPa), após isso há certa resistência para deformar, possivelmente devido a sucção. Ademais, nas amostras compactadas verificou-se uma deformação volumétrica linear progressiva com o aumento de sucção que pode ser atribuído à fábrica e a forte

cimentação. Por fim, ao contrário das compactadas, as amostras reconstituídas que não tem cimentação, as quais apresentaram material disperso na água, se mostraram com as maiores deformações volumétricas;

- Os ensaios edométricos juntamente com a análise de sensibilidade (S_o) evidenciaram que em tensões até 100 kPa as cimentações das amostras intactas (N) podem resistir às deformações. No entanto, a partir de 100 kPa a compressibilidade das amostras N são maiores que todas as amostras analisadas, o que de fato leva a supor que a cimentação também influencia no comportamento até certo ponto, no entanto, nas amostras compactadas a cimentação é estável e nas reconstituídas não há elemento de ligação onde evidencia que o comportamento do solo laterítico é dependente da macroporosidade;
- Como a macroporosidade dita a maior parte do comportamento, além da evidência da agregação nos solos lateríticos, foi proposto uma avaliação do efeito da estrutura deste solo onde no decorrer do carregamento se percebe redução gradual dos macroporos e quebra das cimentações, redução do tamanho dos agregados que podem terem sofrido agrupamento tornando estruturas compactadas estáveis;
- As amostras reconstituídas com hexametáfosfato mostraram comportamento próximo às amostras modificadas com evidência de atuação somente dos microporos;
- Foi identificado que o comportamento (tensão cisalhante x deformação) das amostras compactadas é divergente aos das amostras intactas e reconstituídas apresentando como pré-adensado para as amostras compactadas e normalmente adensado para as intactas e reconstituídas. No entanto, percebe-se que com o aumento de tensão (300 kPa) as curvas tendem a convergirem devido a formação de uma estrutura similar entre as amostras (sem macroporos);
- A dilatância encontrada nas amostras compactadas mostram que a cimentação gerada no processo de compactação bem como o rearranjo das agregações podem ser os fatores decisivos para ocorrência de comportamento dilatante;

- Após a ruptura por cisalhamento há mudança de forma, tamanho das agregações e orientação.

7.7 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras propõem-se:

- Aplicar essa metodologia e conceitos utilizando-se da mecânica dos solos não saturados a partir de ensaios com aplicação de sucção;
- Realizar todos os ensaios em solos mais profundos como saprolíticos;
- Desenvolver um equipamento de cisalhamento com monitoramento de sucção e de poropressões;
- Realizar análise microestrutural em tempos de deslocamento, verificando assim, como as agregações se comportam em frente à ação tensão deformação;
- Analisar as amostras intactas em baixas tensões cisalhantes e em diferentes processos de moldagem;
- Realizar estudos focados na contribuição dos hidróxidos de ferro e alumínio no comportamento do solo;
- Verificar outros métodos de obtenção de amostras para eliminar as agregações do solo;
- Desenvolver um novo modelo constitutivo que considere aspectos estruturais desse solo tropical.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6458:2018. Solo - Peso específico real dos grãos, Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6459:2018. Solo – Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7180:2018. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7181:2018 Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7182:2018 Solo – Curvas de compactação, Rio de Janeiro.
- ASTM: D3080:04. 2008. Metodologia de ensaios em equipamento de cisalhamento direto.
- Alonso, E. E; Gens, A; Josa, A (1990). A constitutive model for partially saturated soils. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>
- Alonso, E. E.; Pinyol N.M; Gens A. (2013). Compacted soil behaviour: initial State, structure and constitutive modelling. *Géotechnique*.
- Amorosi, A. & Rampello, S. (2007). An experimental investigation into the mechanical behaviour of a structured stiff clay. *Geotechnique* 57, No. 2, 153–166.
- Barenblatt, G. I., Zheltov, P. I., Kochina, I. N. (1960). Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 24 (5): 852-864.
- Blaker O.; DeGroot, J. (2020). Intact, Disturbed, and Reconstituted Undrained Shear Behavior of Low-Plasticity Natural Silt. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 146(8).
- Borges, C. R. (2014). Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília-DF, Distrito Federal, 2014. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.
- Bullock, P.; Murphy, C. P. Towards the quantification of soil structure. *Journal of microscopy*, V. 120, pp. 317-328.
- Burgos F. L. (2016). Influência da microestrutura no comportamento dos solos tropicais naturais e compactados. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF.
- Burland, J.B., Rampello, S., Georgiannou, V.N., and Calabresi, G. (1996). A laboratory study of the strength of four stiff clays. *Geotechnique*, 46: 491–514.
- Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique* 40, No. 3, 329±378.
- Burton G.; Pineda J.; Sheng D.; Airey D. (2015). Microstructural changes of undisturbed, reconstituted, compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying. *Engineering Geology*. 363-373. Doi: 10.1016/j.enggeo.2015.05.010.

- Blatz, J. A., J. Graham, and N. A. Chandler. 2002. "Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand bentonite." *Can. Geotech. J.* 39 (5): 1005–1015. <https://doi.org/10.1139/t02-056>.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Soares, J. M. D.; Dalvan, J. R. (2007). Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um nitossolo vermelho distrófico. *Revista Brasileira Ciência do solo*, 31:379-386, 2007.
- Bressani, L. A.; Vaughan, P.R. Damage to soil structure during Triaxial testint, Proc. 12. Int. conf. Soil Mech. And Foundn. Engng, Rio de Janeiro.
- Bruno, A.W.; Gallipoli D. (2019). A coupled hydromechanical bounding surface model predicting the hysteretic behaviour of unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, 110: 287–295 <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.02.025>.
- Cai, G.; Zhou, A.; Liu, Y; Xu, R.; Zhao, C. (2020). Soil water retention behavior and microstructure evolution of lateritic soil in the suction range of 0–286.7 MPa. *Acta Geotechnica*: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01011-w> .
- Camapum de C.; Pereira, J. H. F.; Guimarães, R. C. (2002). Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. in: *Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils*. Recife.
- Camapum de Carvalho, J. (1985). *Etude du comportement mécanique d'une marne compactée*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, INSA-Toulouse. 200p.
- Camapum de Carvalho, J., Mortari, D. (1994). Caracterização geotécnica de solos porosos do Distrito Federal. III Simpósio Brasileiro de Escavações Subterrâneas, Brasília. p. 109-122.
- Cardoso, F.B.F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica dos solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-026A/95, Departamento de engenharia civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139p.
- Cardoso, F.B.F. (2002). *Propriedades e Comportamento mecânico de solos do planalto Brasileiro*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.
- Carolino S. F.; Marques C., S.; Marques C., R.; Camapum De Carvalho, J.; Cordão Neto, M.; Batista O. R.; Côrtes, H. (2020) Determination of the characteristic curve and influence of macro and micropores on a residual soil profile. *Geotecnia (Lisboa)*, v. 149, p. 101-128, 2020.
- Cheng Q.; Tang, C. S.; Zeng H.; Zhu C.; Na A.; Shi, B. (2020). Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil. *Engineering Geology*. 265-270.
- Cotecchia, F. and Chandler, R. J. (1997). The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay. *Geotechnique* 47, No. 3, 523±544.
- Coop, M.R., Atkinson, J.H., and Taylor, R.N. (1995). Strength, yielding and stiffness of structured and unstructured soils. In *Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Copenhagen, Denmark, 28 May – 1 June 1995. Danish Geotechnical Institute, Copenhagen. *Bul- letin* 11, pp. 55–62.
- Collins, K. (1985). Towards characterization of tropical soil microstructure. In: *International Conference on geomechanics in tropical lateritic and saprolitic soils*. Brasília, vol. 1, 85-96.

- Cordão Neto, M.P. Lopes, B.C.F.L. Mascarenha, M.M.A. Romero, E. (2017). A Microstructural Cam Clay Model for Hydro-Mechanical Behavior of Unsaturated Soils. *Soils and Rocks*, São Paulo, 40(1): 3-16.
- Cordão Neto, M.P.; Hernández O.; Lorenzo R. R.; Borges C.; Caicedo B. (2018). Study of the relationship between the hydromechanical soil behavior and microstructure of a structured soil. *Earth Sciences Research Journal*. 91-101.
- Costa Filho, L. M.; Dobereiner L.; Campos, T. M. P.; Vargas, E. A (1989). *Engineering Properties and Design Assessment of Tropical Soils: Fabric and Properties*, XII ICMFE, Rio de Janeiro.
- Cui, Y. J. Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Geotechnique* 46, No. 2, 291–311, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>.
- Cuccovillo, T.; Coop (1999). On the mechanics of structured sands. *Geotéchnique*, London, v.49, n. 6, p. 741-760.
- Delage, P., Lefebvre, G. (1984). Study of the structure of a sensitive champlain clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnique Journal*, 21: 21–35.
- Delage, P., Audiguier M., Cui, Y. J., Howatt, M. D. (1996). Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnique Journal*, 33: 150-158.
- Duan, X.; Zeng, L.; Sun, X. (2018). Generalized stress framework for unsaturated soil: demonstration and discussion. *Acta Geotechnica*, v. 14, n. 5, p. 1459–1481, 1 out. 2018.
- Durner, W. (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. [Online] 30 (2), 211–223. Available from: [doi:10.1029/93WR02676](https://doi.org/10.1029/93WR02676).
- Embrapa, 2022. Acesso em site: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_1_2212200611535.html.
- Farias, W.M. (2012). Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação no comportamento hidromecânico de solos do planalto central. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-077A/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 263 p.
- Farias, W.M.; Martins E. S. M.; Cardoso, F. B. F.; Camapum de Carvalho, J. (2001). A Influência Do Oxi-Hidróxido De Fe Matricial No Comportamento Mecânico De Solos Tropicais Em Áreas De Disposição De Resíduos Sólidos. *Espaço & Geografia*, Vol.6, No 2 (2003), 115:131 ISSN: 1516-9375.
- Fearon, R.E; Coop, M. R. (2000). Reconstitution: what makes an appropriate reference material? *Géotechnique*. 50, n. 4, 471-477.
- Gao, Y.; Sun, D.; Zhou, A. (2016). Hydromechanical behaviour of unsaturated soil with different specimen preparations. *Can. Geotech. J.* 53: 909–917 (2016) [dx.doi.org/10.1139/cgj-2015-0381](https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0381)
- Gao Q.; Hattab, M.; Mohamad, J.; Fleureau, J. (2019). Microstructural organization of remoulded clays in relation with dilatancy/contractancy phenomena. *Acta Geotechnica* <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00876-w>
- Gao Y.; Sun D.A.; Zhu Z.C. (2018). Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range. *Acta Geotechnica*, 14(2): 417-428

- Gao, Q. F., M. Jrad, M. Hattab, J. M. Fleureau, and L. I. Ameer. 2020. Pore morphology, porosity and pore size distribution in kaolinitic remoulded clays under triaxial loading. *Int. J. Geomech.* 20 (6): 04020057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001682).
- Gao Y.; Zeng, L.; Shi, Z. N.; Zhang, R. (2021). Evolution of Unsaturated Shear Strength and Microstructure of a Compacted Silty Clay on Wetting Paths. *Int. J. Geomech.*, 21(12): 04021233. Doi: 10.1061/(ASCE) GM.1943-5622.0002207
- Gallipoli, D. Gens, A., Sharma, R., and Vaunat, J. (2003). An elasto-plastic model for unsaturated soils incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Geotéchnique*, 53 (1): 123-136.
- Gasparre, A.; Coop, M. R. (2008). Quantification of effects of structure on the compression of stiff clay. *Can. Geotech. Journal*. 1324-1334.
- Gens, Antonio, & Alonso, E. E. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 1013–1032.
- Gigadisu, M. D. (1976). *Lateritic soil Engineering, pedogenesis and Engineering principles*. Elsevier, ISBN 0-444-41283-2.
- Guimarães, R.C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-090A/02, Dep. de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180p.
- Gutierrez, N. H. M. (2005). Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Haeri, S. M. Akbari, G. A.; Khosravi A.; Meehan C. L. (2014). Assessing the Hydro-Mechanical Behavior of Collapsible Soils Using a Modified Triaxial Test Device. *Geotechnical Testing Journal*, v. 37, n. 2, p. 20130034, mar. 2014.
- Hattab, M.; Fleureau, J. M. (2010). Experimental study of kaolin particle orientation mechanism. *Geotechnique* 60, N0. 5, 323-331, doi: 10.1680/geot.2010.60.5.323.
- Hernandez, O (2016). Análise da influência de aspectos microestruturais no comportamento de solos derivados da cinza vulcânica. Tese de Doutorado, Publicação G.TD127/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília- DF, 140 p.
- Hillel D (1971) *Soil and water: physical principles and processes*. Academic Press, New York.
- Hong, Z.-S.; Zeng, L.-L.; Cui, Y.-J; Cai Y.-Q.; Lin. C. (2012). Compression behaviour of natural and reconstituted clays. *Geotechnique* 62, No. 4, 291–301 doi: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.10.P.046>
- IUPAC. (1997). “IUPAC Compendium of Chemical Terminology” (Gold Book). Blackwell.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. (2020). Acesso pelo site: <https://portal.inmet.gov.br>
- Jiang, M.J; Zhang, F.G.; Hu, H.J.; Cui, Y.J.; Peng, J.B. (2014). Structural characterization of natural loess and remoulded loess under triaxial tests. *Eng. Geology*. 181: 249-260.
- Koliji, A.; Vulliet L.; Laloui L. (2010). Structural characterization of unsaturated aggregated soil. *Canadian Geotech.* 297-311.
- Kodikara J.; Islam T.; Sountharajah A. (2018). Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, 24-34.

- Koide, S. (1990). Hillslope Subsurface Flow Study by Finite Element Method. Tese de Doutorado, University of London, London, Inglaterra.
- Kühn, V. O.; Lopes, B. De C. F. L.; Borges, C. R.; Massocco, N. S.; Cordão Neto, M. P. (2021). Relationship Between Pore Size Distribution And Compressibility Of A Lateritic Soil. *Géotechnique Letters*, V. 11, P. 1-19, 2021.
- Kühn, V. O. (2019). Comportamento Hidromecânico de Solos Artificiais Bimodais. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-338/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- Lambe, W. (1958). The structure of compacted clay: Part1. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, SM 2 (1654), 1–34.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. Wiley. New York.
- Lee, X. & Zhang, L. M. (2009). Characteristics of dual structure pore size distribution of soil. *Can. Geotech. J.* 46, No. 2, 129– 141.
- Leroueil, S. and Vaughan, P. R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Geotechnique* 40, No. 3, 467±488.
- Liu, M.; Carter, J. (2002). A structured Cam Clay model. *Canadian Geotechnical Journal*
- Li, P.; Shao, S.; Vanapalli S. K. (2020). Characterizing and modeling the pore-size distribution evolution of a compacted loess during consolidation and shearing. *Journal of Soils and Sediments* (2020) 20:2855–2867. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02621-3>
- Li P, Xie WL, Pak RY, Vanapalli SK (2019) Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China. *Catena* 173:276–288
- Liu, W., X. Sun, and T. Zhou. (2020). Impact of drying/wetting on shear stiffness and shear-induced volume change behaviours of unsaturated silty clay. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* 44 (2): 735–743. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00322-7>.
- Liu, Z.; Liu F.; Fuli M.; Mei W.; Xong B.; Yonglai Z.; Hang Y.; Huoping Z. (2016). Collapsibility, composition, and microstructure of loess in china. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 4, p. 673–686, 2016. 1313-1332, (39).
- Lopes, B. C. F. L. (2016). Microstructural based approach to the modelling of clays and transitional soils behaviour, Distrito Federal, (2016). Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 133p.
- Lopes, B.C.F.L; Kühn, V. O.; Queiroz, A.C.G.; Caicedo, B.; Neto, M.P.C. (2022). Structure evaluation of a tropical residual soil under wide range of compaction conditions. *Géotechnique letters*, v. 12, p. 1-1, 2022.
- Ma, T.; Wei, C.; Yao, C.; Yi, P. (2020). Microstructural evolution of expansive clay during drying–wetting cycle. *Acta Geotechnica*. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00938-4>.
- Ma, S. K., M. S. Huang, P. Hu, and C. Yang. (2013). “Soil–water characteristics and shear strength in constant water content triaxial tests on Yunnan red clay.” *J. Central South Univ.* 20 (5): 1412–1419. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1629-1>.
- Maccarini, M. (1989). Estudo da quebra de cimentações de um solo artificial. Uma tentativa de modelo para solos residuais. II Colóquio de solos Tropicais e Subtropicais e duas aplicações em Engenharia Civil, Porto Alegre, pp. 82-95.
- Mahalinga-Iyer, U.; Williams, D. J. (1994) Consolidation and Shear strength Properties of lateritic soil. *Engineering Geology* 38. 53-63.

- Menendez, O. H.; Lopes, B.C.F.L; Caicedo, B.; Neto, M.P.C (2022). Microscopic and mineralogical characteristics behind the engineering properties of a compacted andesitic volcanic soil. *Journal of south american earth sciences*, v. 115, p. 103752, 2022.
- Menendez, O. H. (2016). Análise da influência de aspectos microestruturais no comportamento de solos derivados da cinza vulcânica, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 140p.
- Miao, L.; Houston, S.L.; Cui, Y.; Yuan, J. (2007) Relationship between soil structure and mechanical behaviour for an expansive unsaturated clay. *Canadian Geotech. Journal*. 126-137.
- Mitchell, J. K. (1956). The fabric of natural clays and its relation to engineering properties. *Proceedings of the Highway Research Board*, p. 693–713, 1956.
- Mitchell, J. K.; Santamarina, J. C (2005). Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 131, n. 10, p. 1222–1233, out. 2005.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- Muñoz-Castelblanco, J. A.; Pereira J.; Delage P.; Cui Y. (2012). The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France. *Géotechnique*, v. 62, n. 2, p. 95–106, fev. 2012. Doi: 10.1680/geot.9. P.084
- Musso, G., A. Azizi, and C. Jommi. (2020). A microstructure-based elastoplastic model to describe the behaviour of a compacted clayey silt in isotropic and triaxial compression. *Can. Geotech. J.* 57 (7): 1025– 1043. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0176>
- Monroy R, Zdravkovic L, Ridley A (2010) Evolution of microstructure in compacted London Clay during wetting and loading. *Geotechnique* 60(2):105–119. <https://doi.org/10.1680/geot.8. P.125>.
- Nagaraj, T.S; Pandian, N.S.; Narashima,Raju, P.S.R. (2000). Compressibility behaviour of soft cemented soils. *Géotechnique*, London, v.50, n. 3, p. 297-300.
- Ng, C. W. W., Sadeghi, H., Hossen, S. K. B., Chiu, C. F., Alonso, E. E., & Baghbanrezvan, S. (2016). Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(8), 1258–1269. doi:10.1139/cgj-2015-0364.
- Ng, C. W. W.; Mu, Q. Y.; Zhou, C. (2017). Effects of soil structure on the shear behaviour of an unsaturated loess at different suctions and temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 2, p. 270–279, fev. 2017.
- Ng, C. W. W., Cheng, Q., & Zhou, C. (2018). Thermal effects on yielding and wetting-induced collapse of recompacted and intact loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8), 1095–1103.
- Ng CWW, Akinniyi DB, Zhou C, Chiu CF (2019) Comparisons of weathered lateritic, granitic and volcanic soils: compressibility and shear strength. *Eng Geol* 249:235–240
- Ng, C. W. W.; Sadeghi, H.; Jafarzadeh, F.; Sadeghi, M.; Zhou, C.; Baghbanrezvan, S. (2020a). Effect of microstructure on shear strength and dilatancy of unsaturated loess at high suctions. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 57, n. 2, p. 221–235, fev. 2020.
- Ng, C. W. W.; Akinniyi, D. B.; Zhou, C. (2020b) Influence of structure on the compression and shear behaviour of a saturated lateritic clay. *Acta Geotechnica*, v. 15, n. 12, p. 3433–3441, 1 dez. 2020.

- Ng C.W.W., Owusu ST, Zhou C, Chiu A.C.F. (2020c) Effects of sesquioxide content on stress-dependent water retention behaviour of weathered soils. *Eng Geol* 266:105-455.
- Ng, C. W. W.; Akinniyi, D. B.; Zhou, C. (2020d) Experimental study of the hydromechanical behaviour of a compacted lateritic sandy lean clay. *Acta Geotechnica*, v. 15, n. 12, p. 3433–3441, 1 dez. 2020.
- Ng C.W.W.; Peprah-Manu, D. (2023) Influence of aggregate structure on the compressibility of an unsaturated compacted silty sand, *Engineering Geology*, Volume 314, 2023, 107007, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107007>.
- Nunes, G. B.; Oliveira, O. M. ; Massocco, N. S.; Higashi, R. A. (2021). Study of the influence of suction profile seasonal variations in the global sliding safety factor of a granite residual soil slope. *Bulletin of engineering geology and the environment (internet)*, v. 80, p. 7253-7267, 2021.
- Ngien, S. K., Rahman, N. A., Ahmad, K., Lewis, R. W. (2012). A review of experimental studies on double-porosity soils. *Scientific Research and Essays*, 7 (38): 3243-3250.
- Mascarenha, M. M. A. (2008). Influência da microestrutura no comportamento hidromecânico de uma argila siltoso não saturada incluindo pequenas deformações. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158p.
- Mendonza, C.; Farias, M. M. (2020). Critical State model for structured soil. *Rock and Soil Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.006>
- Mitchell, J. K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior (Third)*. New Jersey: John Wiley & Sons, INC., 577p.
- Mu Q.Y.; Zhou C.; Ng C.W.W. (2020). Compression and wetting induced volumetric behavior of loess: Macro- and micro-investigations. *Transportation Geotechnics*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100345>
- Oliveira, O. M. (2004) Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 361p.
- Okewale, I.A. Compressibility and the Effects of Structure of Tropical Clay in Incremental Loading Oedometer Tests. *Geotech Geol Eng* 38, 5355–5371 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01369-4>
- Ovando S., E., Rodríguez R., J.F.; Valderrama V., Y.V. Geotechnical Characteristics of Natural and Reconstituted Lacustrine Mexico City Clays. *Geotech Geol Eng* 38, 1471–1484 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01103-9>
- Otálvaro, I.F. (2013). Comportamento hidromecânico de um solo tropical compactado. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-082/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122 p.
- Otálvaro, I. F., Cordão Neto, M. P., Caicedo, B. (2015). Compressibility and microstructure of compacted laterites. *Transportation Geotechnics*, 5: 20–34.
- Otálvaro, I. F., Cordão Neto, M. P., Delage, P., Caicedo, B. (2016). Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil. *Engineering Geology*, 205: 73–80.
- Prakash, K; Sridharan, A.; Prasanna, A. H. (2021). Engineering Behavior of Compacted and Reconstituted Soils: A Comparative study. *Indian Geotech journal*.

- Prapaharan, S., Altschaeffl, A. G., Dempsey, B. J. (1985). Moisture curve of a compacted clay: mercury intrusion method. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (9): 1139–1143
- Prietto, (2004). Resistência e dilatância de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental. Tese de doutorado – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 230p.
- Queiroz, A.C.G. (2015). Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados, Distrito Federal. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-104/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, BrasíliaDF, 108p.
- Reis, R. M. (2004). Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de Gnaiss. Tese de doutorado-Universidade de São Paulo.
- Roscoe, K. H.; Schofield, A. N.; Wroth, C. P. (1958). On The Yielding of Soils. *Géotechnique*, v. 8, n. 1, p. 22–53, mar. 1958.
- Romero, E. (1999). Characterisation and Thermo Hydro-mechanical Behaviour of Unsaturated Boom Clay: An Experimental Study. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Romero, E. & Simms, P. (2008). Microstructure investigations in unsaturated soils. a review with special attention to mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotech. Geol. Eng.*, No. 6, 705–772.
- Romero E, Vecchia GD, Jommi C (2011) An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Geotechnique* 61(4):313–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.4.313>
- Rui, J.; Lei, H.; Li, K. (2020). Compressibility and Microstructure Evolution of Different Reconstituted Clays during 1D Compression. *Int. J. Geomech.*, 2020, 20(10): 04020181.
- Sangrey, D. A. (1972). Naturally cemented sensitive soils. *Geotechnique*, Vol 22, nº 1, pp 139-152, 1972.
- Sandroni, S. S. (1985). Stress Relief Effects in Gneissic Saprolitic Soils. 1st. Int conf. Geomechanics in Tropical soils, vol. 3, Brasília, 1985.
- Silva, M. T. M. G. (2009). Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos não Saturados Utilizando Ensaios com Umidade Conhecida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- Silva, A. R. C. S.; Cordão-Neto, M. P.; Massocco, N. S.; Oltávaro, I. F.; Morais, L. P. (2022). Influência da estrutura na resistência ao cisalhamento de um solo tropical. *Cobramseg 2022*, São Paulo.
- Sun, D.; You, G.; Annan, Z.; Daichao S. (2015). Soil–water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* .(2016) 75:781–791.
- Shipton, B.; Coop, M. R. (2012). On the compression behaviour of reconstituted soils. *Soil and Foundations*. 668-681.
- Sheng, D.; Zhou, A.; Fredlund, D. G. (2011). Shear strength criteria for unsaturated soils. *Geotech. Geol. Eng.* 29:145-159.
- Tang, L.; Sang, H.; Jiang, L; Sun, Y. (2016). New Progress in the Study of Intergranular Suction and Shear Strength of Unsaturated Soil. *Sains Malaysiana* 45(1)(2016): 141–156.

- Tarantino, A. (2011). Unsaturated soils: Compacted versus reconstituted states. In *Unsaturated soils*. Edited by E.E. Alonso and A. Gens. CRC Press, Barcelona, Spain. pp. 113-136.
- Tarantino, A., and de Col, E. (2008). Compaction behaviour of clay. *Geotechnique*, 58(3): 199–213. doi:10.1680/geot.2008.58.3.199.
- Terzaghi, K. (1925) *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Vienna: [s.n.].
- Vargas, M. (1953). Some Engineering Properties of residual clays soils occurring in Southern Brazil. *Proceedings of the 3rd International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich*. 1, pp. 67-71.
- Vargas, M. (1973). Structurally unstable soils in Southern Brazil. *Proceedings of 8 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow*, 2, 239-246.
- Vargas, M. (1985). The concept of tropical soils. In: *Intl Conf. On Geomech. In Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, 1, ISSMFE, Vol. 3, pp. 101-134, Brasília.
- Vaughan, P.R. (1985). Mechanical and hydraulic Properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particular as related to their structure and mineral components. *First International conference in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília*.
- Vaughan, P.R; Maccarini, M.; Mokhtar, S. M. (1988) Indexing the Engineering properties of residual soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Bath, UK*, vol. 21, n.1, p. 69-84.
- Vanapalli, S. K. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, n. 3, p. 379–392, 2 jul. 1996.
- Vilar, O. M. A. (2006) simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43, n. 10, p. 1088–1095, 1 out. 2006.
- Wang, J. D.; Li, P.; Ma, Y.; Vanapalli, S. K. (2018). Evolution of pore-size distribution of intact loess and remolded loess due to consolidation. *Journal of Soils and Sediments*. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2136-7>
- Wang, Y.; Hui Y.; Xu, J. (2020). Structural Characteristics of natural loess in Northwest China and its effect on shear behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*. Doi: 10.1007/s10706-020-01420-4.
- Warren, J. E., Root, P. J. (1963). The Behavior of Naturally Fractured Reservoir. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3 (3): 245-255.
- Wei, X.; Hattab, M.; Fleureau, J. (2013). Micro–macro-experimental study of two clayey materials on drying paths. *Bulletin eng. Geol. Environment*. 72:495-508.
- Wen, B. P., Yan, Y. J. (2014). Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China. *Engineering Geology*, 168: 46–58.
- Werk S. M. S. (2000). Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos. *Dissertação de mestrado*. Porto Alegre, RS.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S., & Buisson, M. S. R. (2003). Coupling of hydraulic hysteresis and stress–strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), 41-54.
- Wu, S., Zhou, A., Shen, S.-L., & Kodikara, J. (2020). Influence of different strain rates on hydro-mechanical behaviour of reconstituted unsaturated soil. *Acta Geotechnica*. doi:10.1007/s11440-020-01026-3.

- Yu, C.Y., Chow, J.K., Wang, Y.H., (2016). Pore-size changes and responses of kaolinite with different structures subject to consolidation and shearing. *Eng. Geol.* 202, 122–131. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.007>
- Yuan, S.; Liu X.; Buzzi O. (2019). A microstructural perspective into soil collapse. *Géotechnique*. Doi: 10.1680/jgeot.18. p.256.
- Zhai, Q.; Rahardjo, H.; Satyanaga, A.; Dai, G. L; Zhao, X. L. (2019a). The role of pore-size distribution function on the estimation of engineering properties of unsaturated soil. 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (AP-UNSAT2019). Japanese Geotechnical Society Special Publication.
- Zhai, Q.; Rahardjo, H.; Satyanaga, A.; Dai, G. L; Zhao, X. L. (2019b). Estimation of unsaturated shear strength from soil-water characteristic curve. *Acta Geotechnica*.
- Zhang T.; Cui Y.; Lamas-Lopez, F.; Calon, N.; Costa D'Aguiar, S. (2018). Compacted soil behaviour through changes of density, suction, and stiffness of soils with remoulding water content. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Zhang, J. W.; Um, Q. Y.; Garg, A.; Liu, F. L.; Cao, J. (2020). Shear behavior of unsaturated intact and compacted loess: a comparison study. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8820-0>.
- Zhang, J.; Niu, G.; Li, X.; Sun, D. (2019). Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00874-y>
- Zheng, L.L.; Hong Z. S.; Cui Y. J.; Liu, M. (2017). A compression reference of soil structure evaluation with reconstituted clays at different initial water contents. *Marine Georesources & Geotechnology*. 1521-0618.

APÊNDICE A – ÍNDICES DE VAZIOS EM RELAÇÃO À UMIDADE: AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS

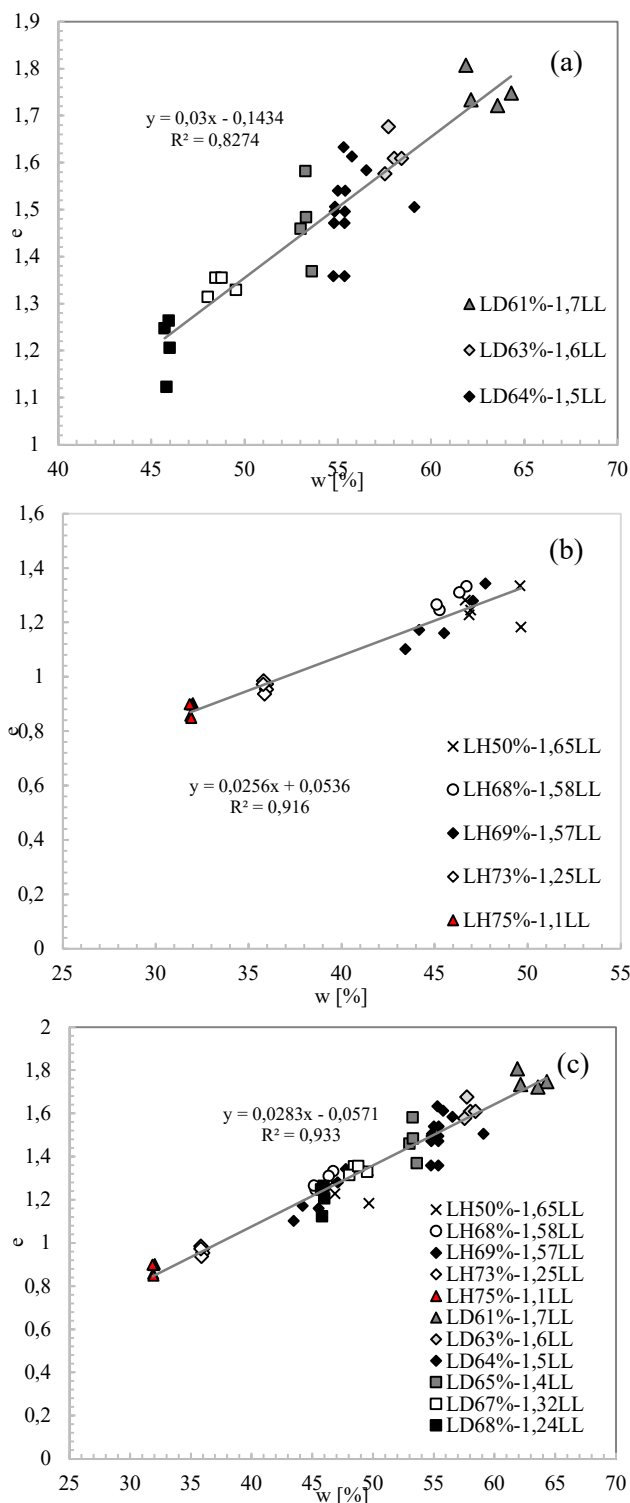


Figura A. 1 – Índice de vazios x umidade em diferentes concentrações. (a) Água destilada (b) Concentração de hexametáfosfato (c) Com todas as amostras reconstituídas.

APÊNDICE B – SOFTWARE LABVIEW

Sistema de Aquisição - narayana 4.vi

D:\Nara\Documents\DOCTORADO\AQUISITOR DE SINAIS\LABVIEW\Sistema de aquisição narayana\Sistema de Aquisição - narayana 4.vi

Last modified on 31/08/2021 at 18:18

Printed on 20/02/2023 at 17:28

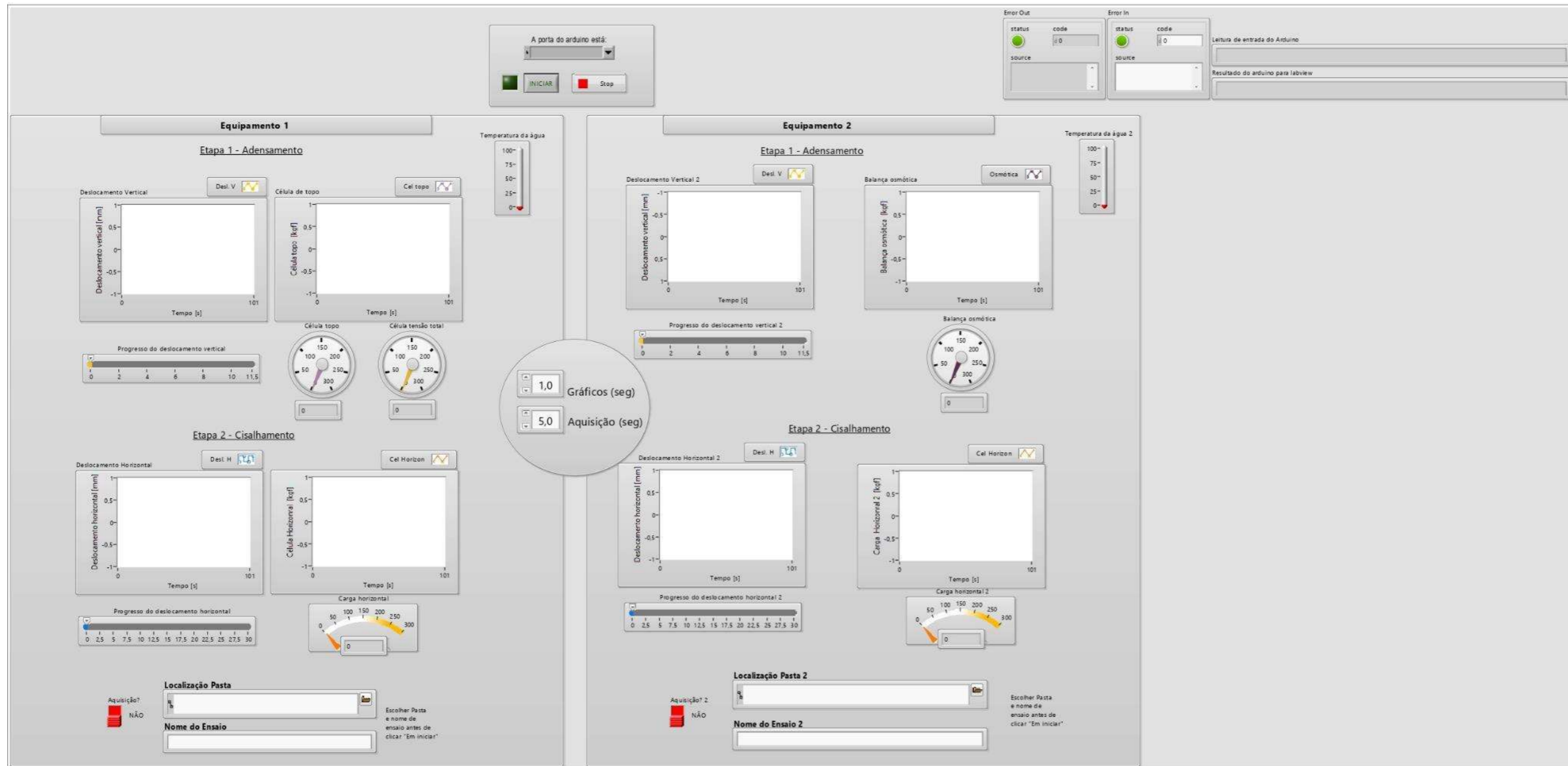


Figura B. 1 – Interface visual desenvolvida a partir do *software* Labview

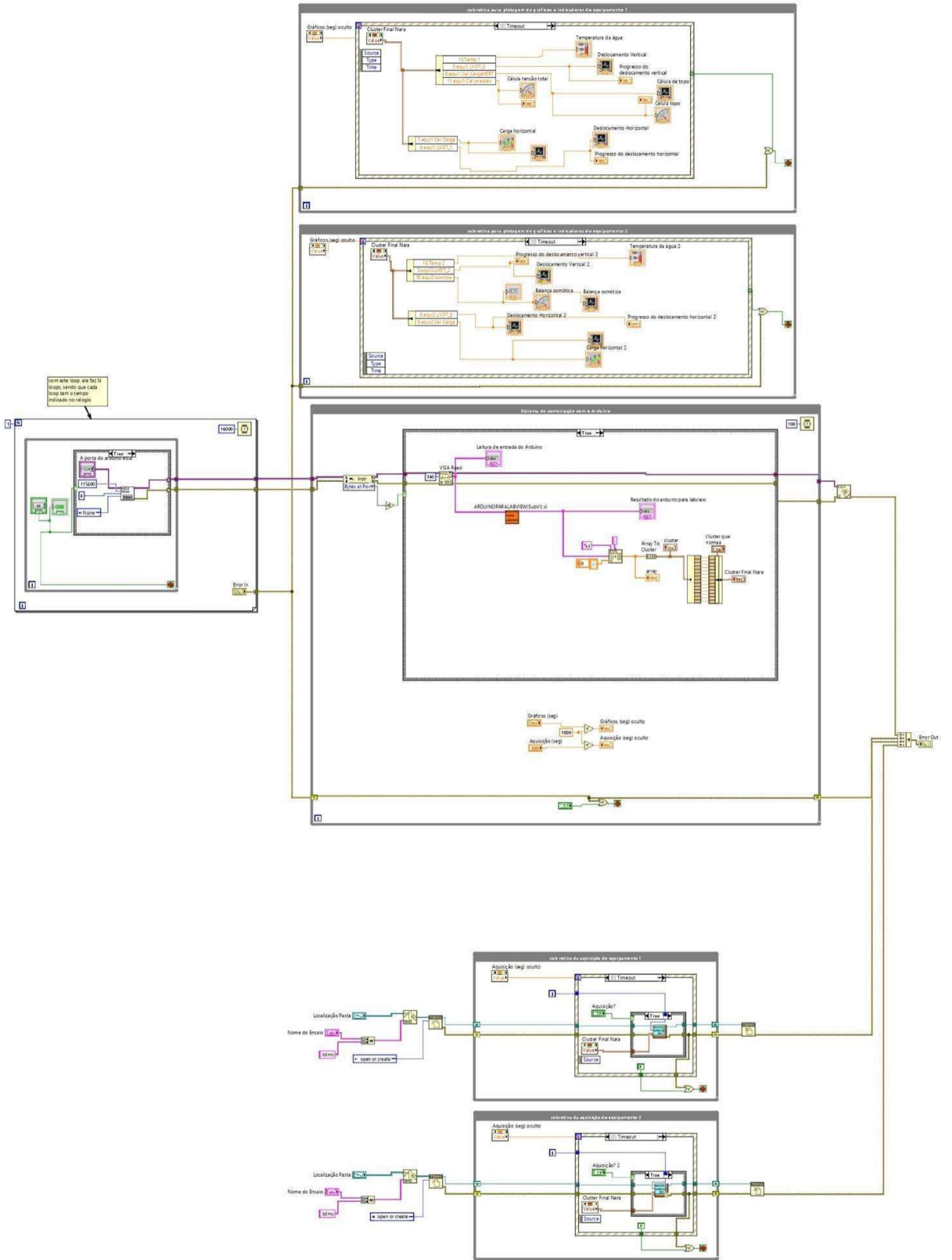


Figura B. 2 – Código desenvolvido a partir do Labview

APÊNDICE C – CURVAS DE ADENSAMENTO: RAIZ DO TEMPO X DESLOCAMENTO

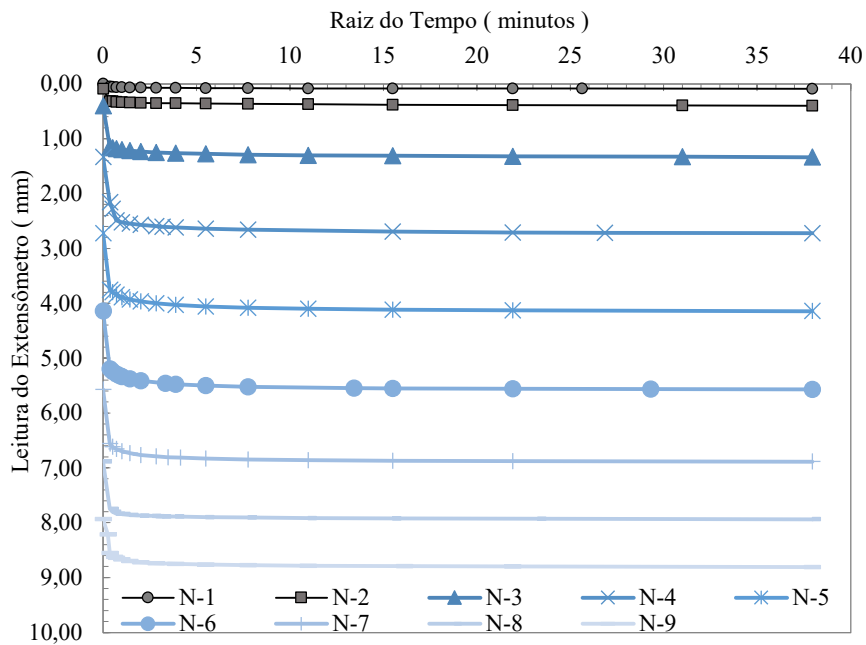


Figura C. 1 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra N

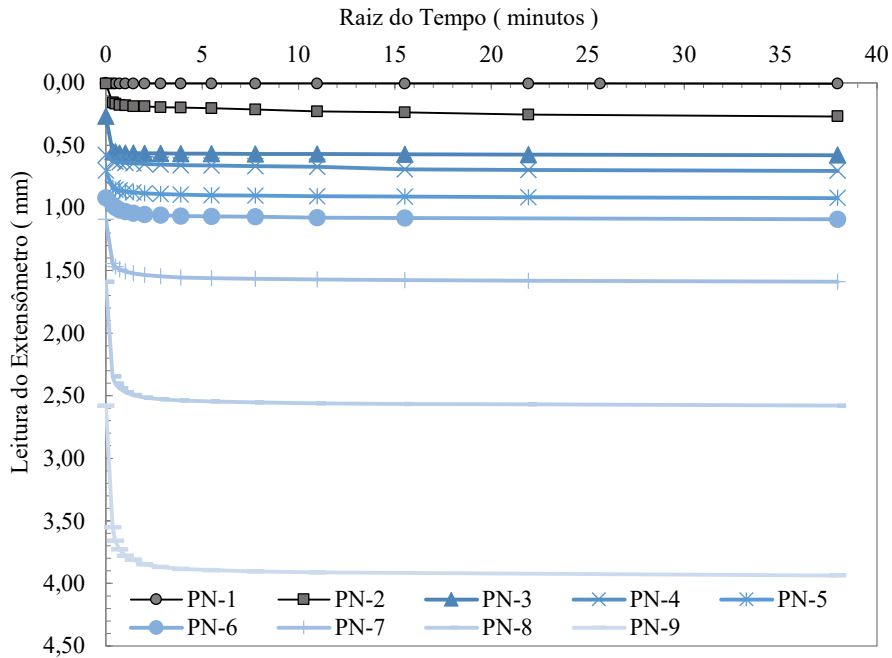


Figura C. 2 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra PN

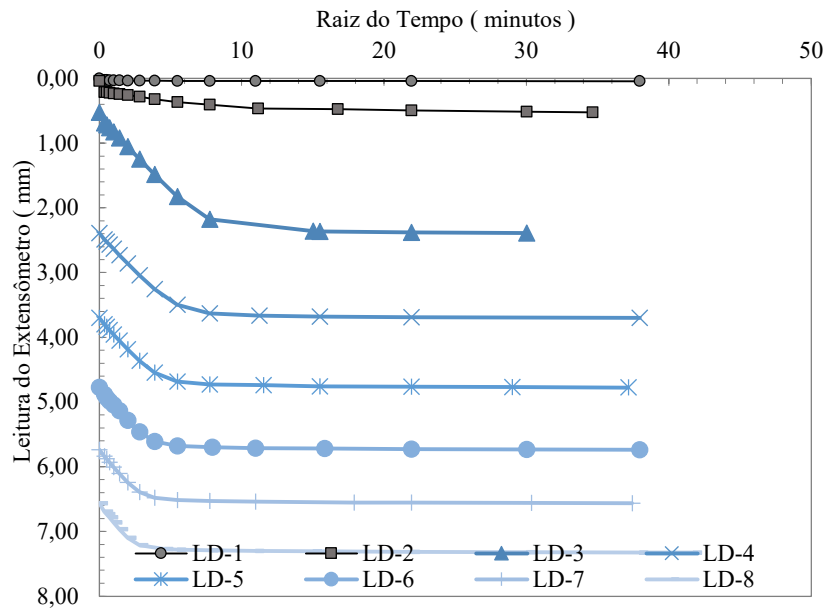


Figura C. 3 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra LD

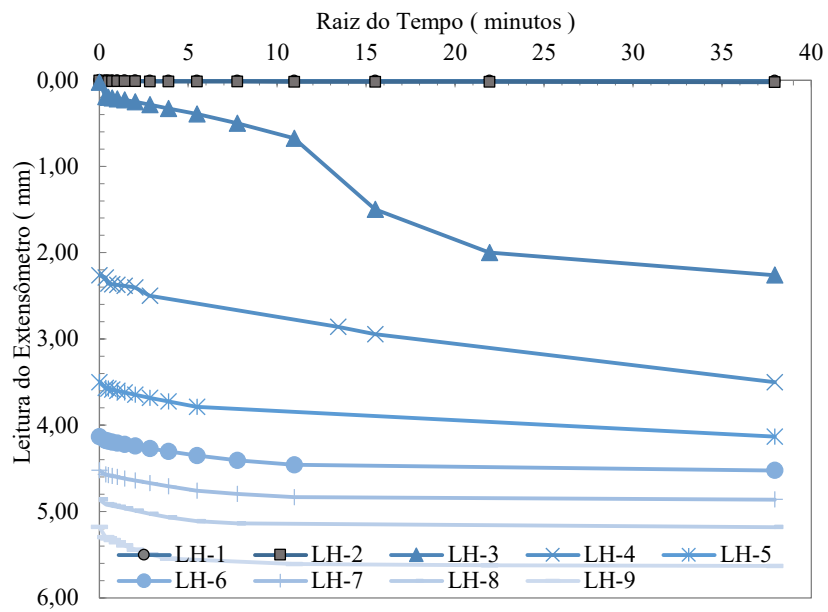


Figura C. 4 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra LH

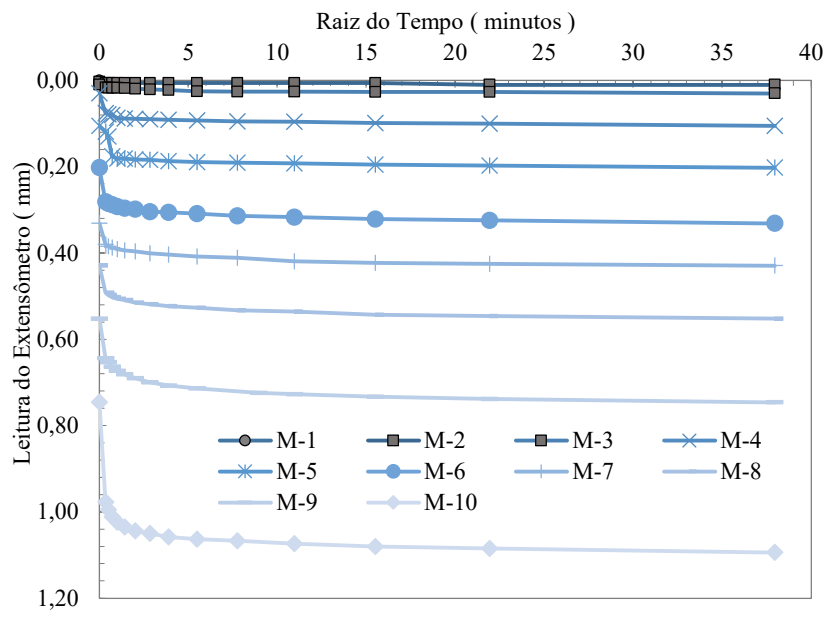


Figura C. 5 – Deslocamento vertical x Raiz do tempo: amostra M

APÊNDICE D – AMOSTRAS CISALHADAS



 <p>NC1-10kPa</p>	 <p>NC2-70kPa</p>
 <p>NC3-100kPa</p>	 <p>NC4-170kPa</p>
 <p>NC5-300kPa</p>	 <p>NC6-500kPa</p>
 <p>NC7-1000kPa</p>	 <p>NC8-30kPa</p>
 <p>NC9-70kPa</p>	 <p>NC10-170kPa</p>
 <p>NC20-300kPa</p>	 <p>NC21-70kPa</p>

Tabela D. 1 – Amostras cisalhadas condição: Intacta (N)

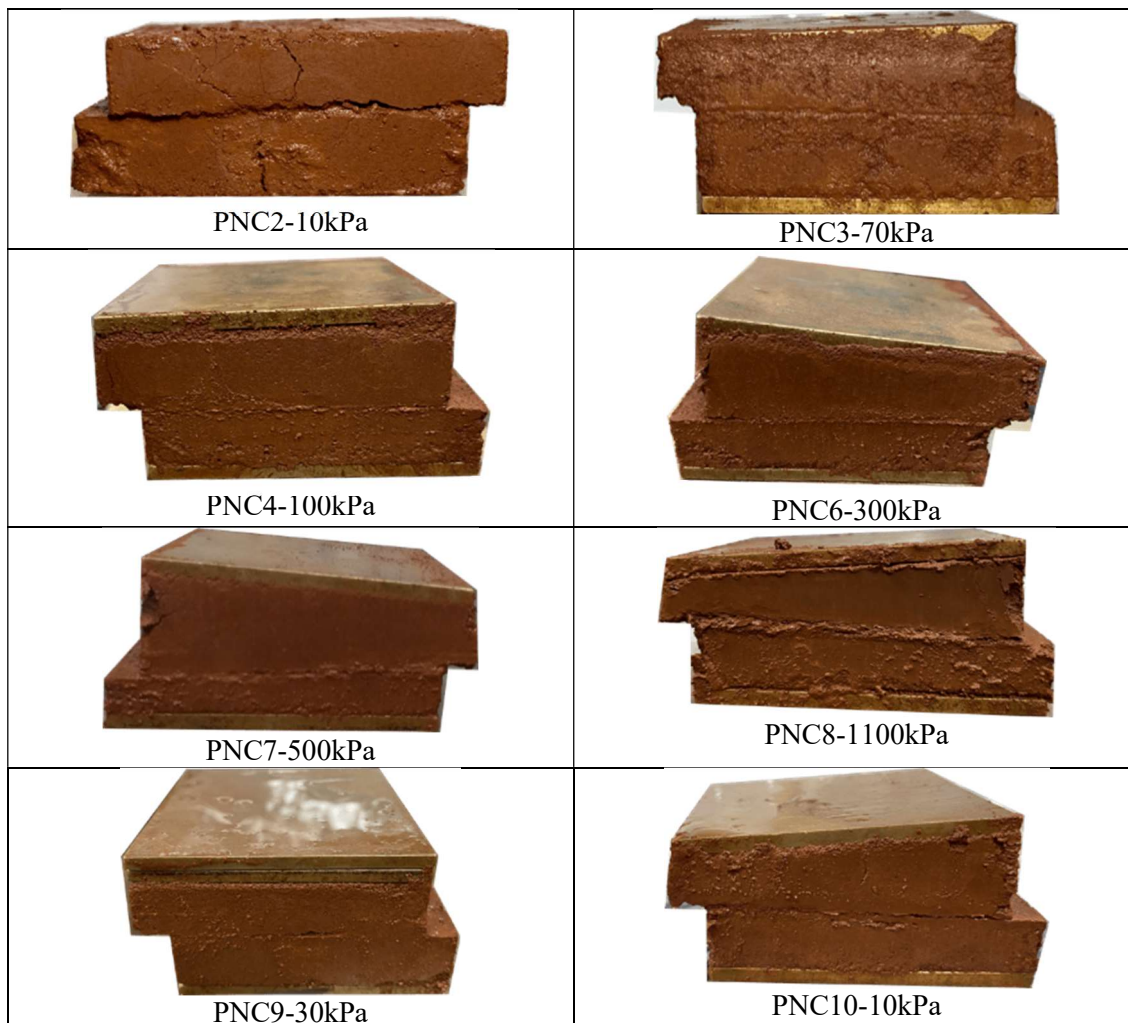
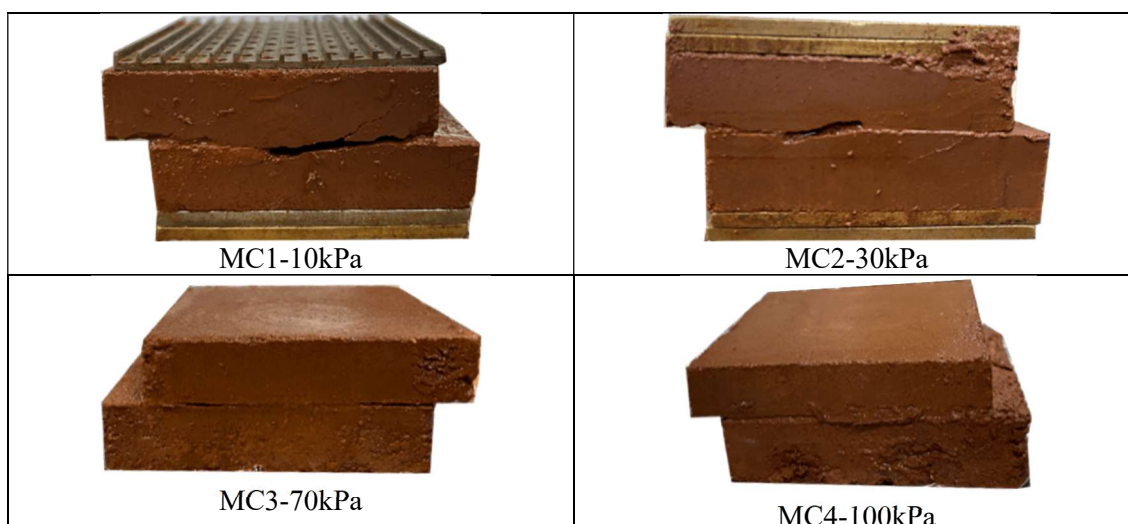


Tabela D. 2 - Amostras cisalhadas condição: Proctor normal (PN)



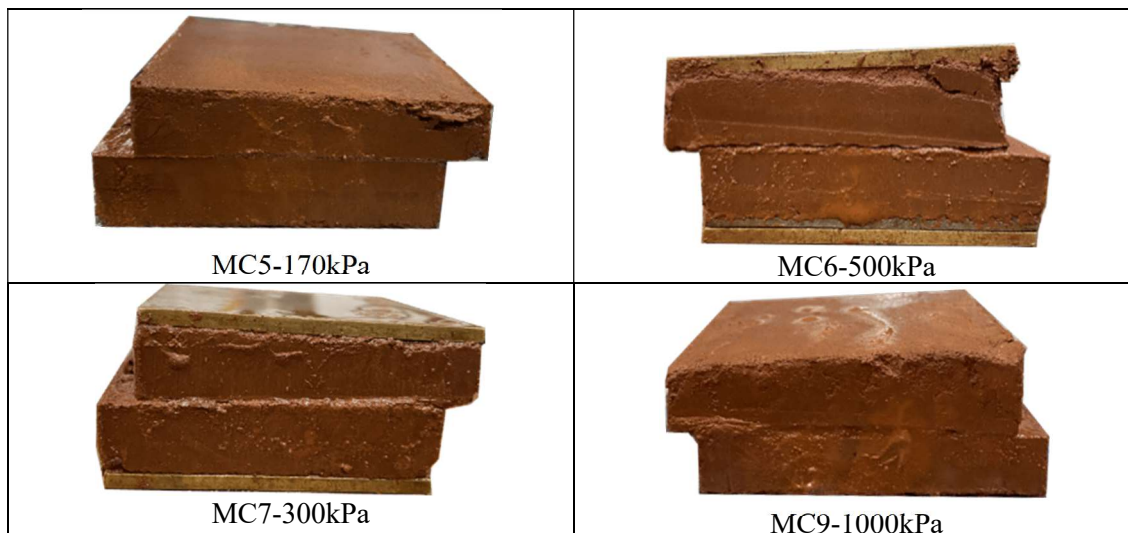


Tabela D. 3 - Amostras cisalhadas condição: Proctor Modificado (M)



Tabela D. 4 - Amostras cisalhadas condição: Lama com água destilada (LD)



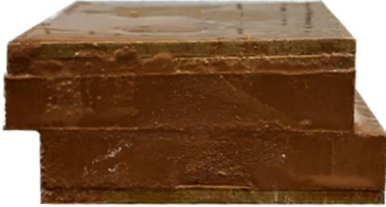


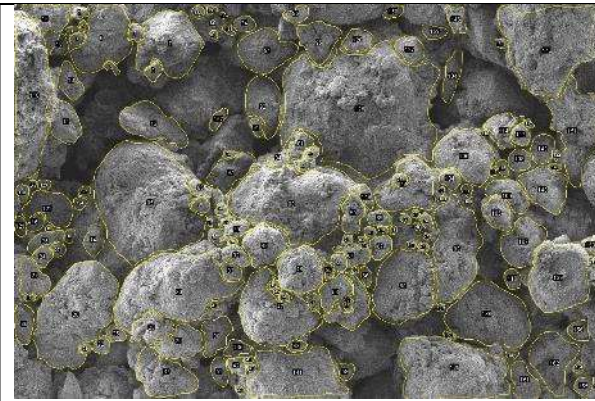
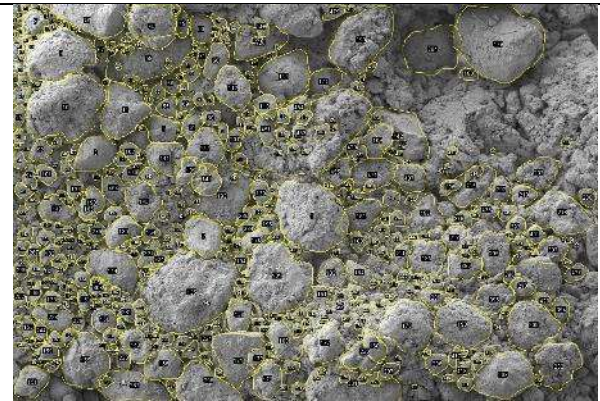
 <p>LHC1-10kPa</p>	 <p>LHC2-30kPa</p>
 <p>LCH3-70kPa</p>	 <p>LHC4-100kPa</p>
 <p>LHC5-300kPa</p>	

Tabela D. 5 - Amostras cisalhadas condição: Lama com Hexametáfosfato

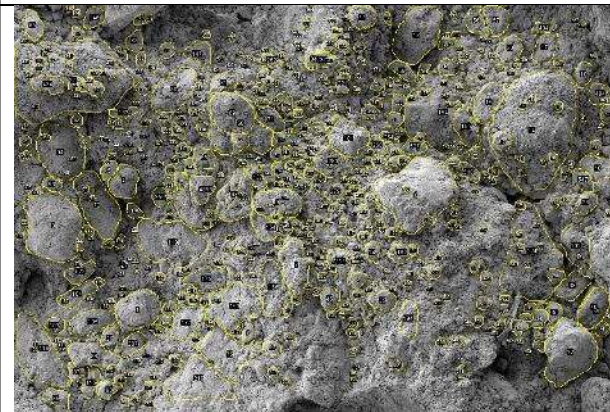
APÊNDICE E – IMAGENS DE MEV DELIMITADAS



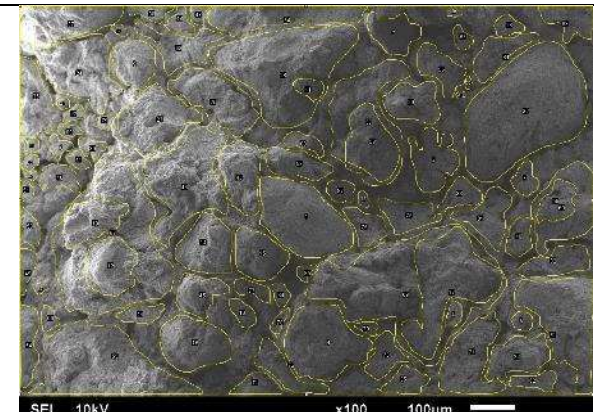
N-0 kPa



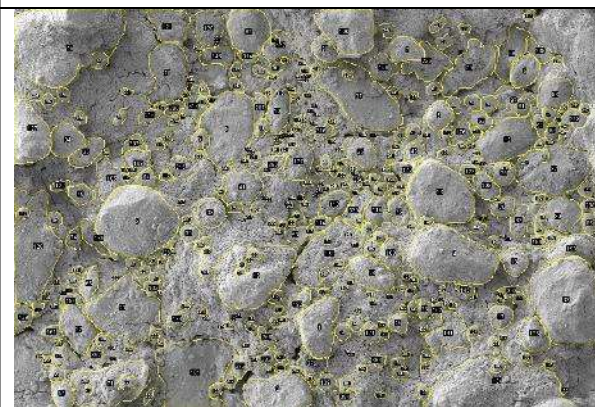
N-70 kPa



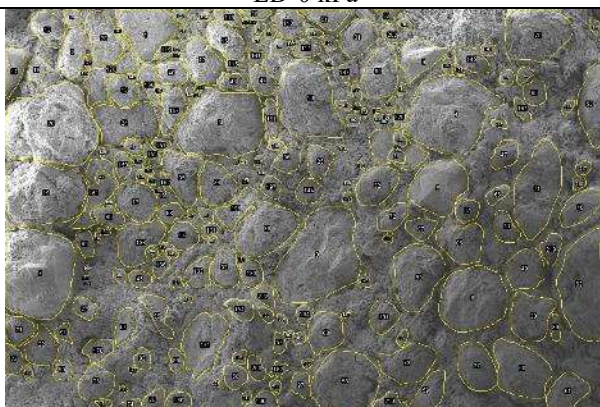
N- 300kPa



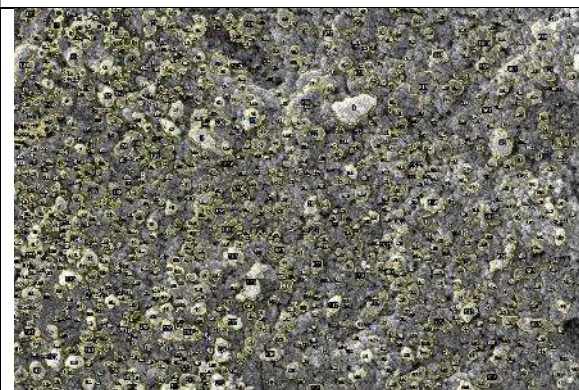
LD-0 kPa



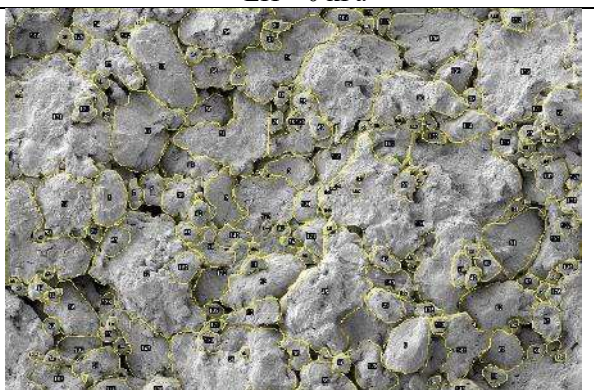
LD-70 kPa



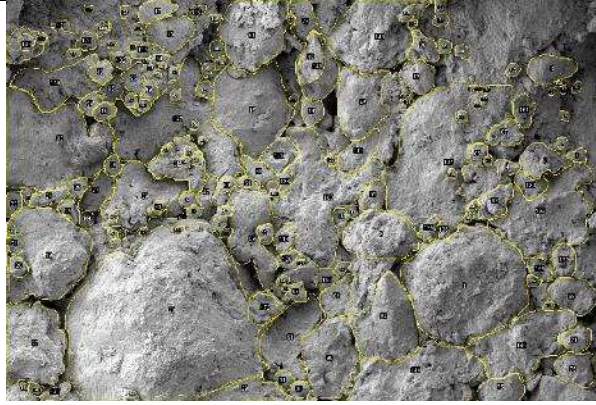
LH - 0 kPa



M - 0 kPa



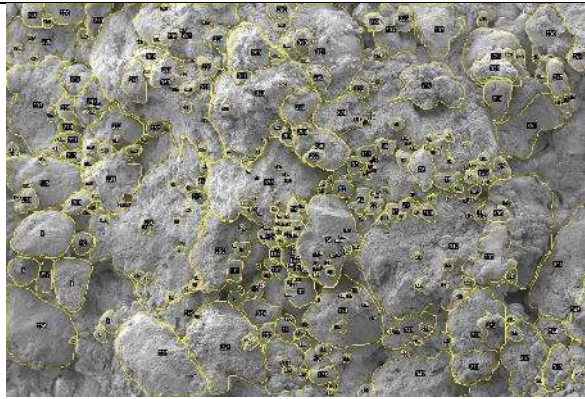
M- 70 kPa



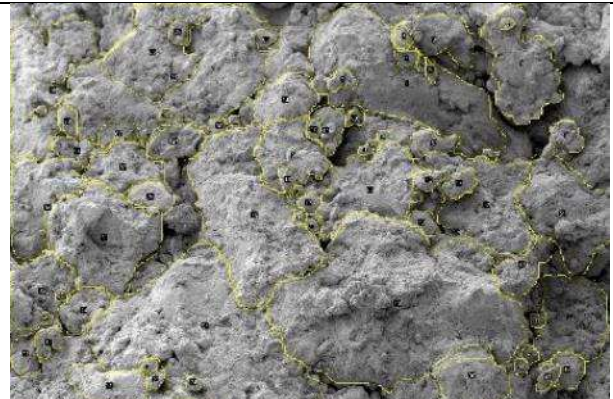
M – 70 kPa



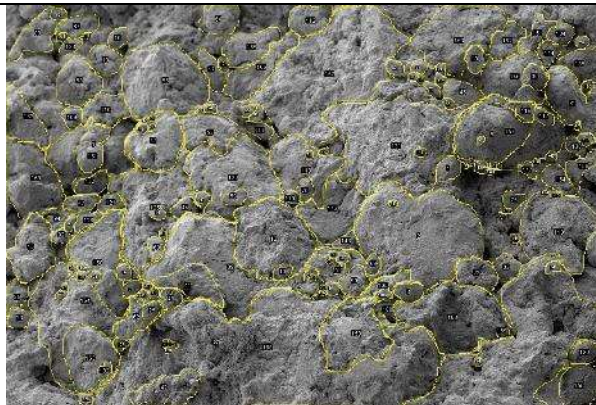
PN – 0 kPa



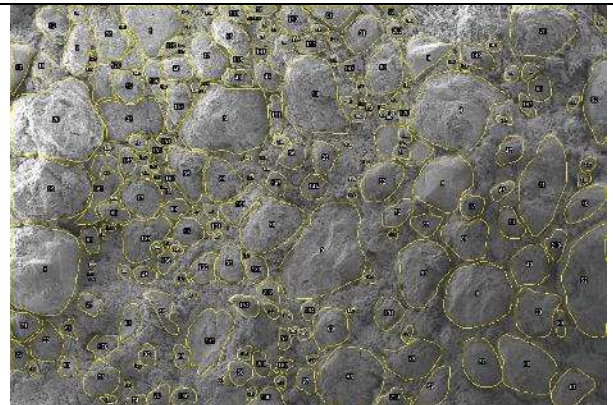
PN – 70 kPa



PN – 300 kPa



PN – 300 kPa



LH – 0 kPa