

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

CARACTERIZAÇÃO HIDRO-MECÂNICA DO FOSFOGESSO
E DAS MISTURAS SOLO-FOSFOGESSO

TUBAL HENRIQUE CÂNDIDO DE MATOS

ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc
CO-ORIENTADORA: MÁRCIA MARIA DOS ANJOS
MASCARENHA, DSc

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-197/11

BRASÍLIA / DF: SETEMBRO DE 2011

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

**CARACTERIZAÇÃO HIDRO-MECÂNICA DO FOSFOGESSO
E DAS MISTURAS SOLO-FOSFOGESSO**

TUBAL HENRIQUE CÂNDIDO DE MATOS

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

APROVADA POR:

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**GREGÓRIO LUIS SILVA ARAÚJO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ALEXANDRE BENETTI PARREIRA, DSc (EESC - USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**LILIAN RIBEIRO DE REZENDE, DSc (UFG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 09 de SETEMBRO de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

MATOS, TUBAL HENRIQUE CÂNDIDO DE

Caracterização Hidro-Mecânica do Fosfogesso e das Misturas Solo-Fosfogesso

[Distrito Federal] 2011

xix, 118 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2011)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Misturas solo-fosfogesso

2. Fosfogesso

3. Resíduo

4. Ensaio laboratoriais em geotecnia

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MATOS, T.H.C. (2011). Caracterização Hidro-Mecânica do Fosfogesso e das Misturas Solo-Fosfogesso. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-197A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Tubal Henrique Cândido de Matos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Hidro-Mecânica do Fosfogesso e das Misturas Solo-Fosfogesso.

GRAU / ANO: Mestre / 2011

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

Tubal Henrique Cândido de Matos
Avenida Vereador João Narciso, nº 49,
Apto. 202, Centro
CEP 38610-000 Unai/MG – Brasil
e-mail: tubal.matos@bol.com.br

DEDICATÓRIA

A meus pais José Silvério e Maria José.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu senhor Jesus Cristo, fonte de força, sabedoria e discernimento para a conclusão de mais essa realização pessoal.

Aos meus pais por sempre estarem ao meu lado e acreditarem em mim diante de todas as dificuldades. Aos meus irmãos pelo companheirismo e ajuda nas horas que sempre precisei.

À Keila, grande amor da minha vida! Sem você tudo seria mais difícil.

Ao professor Manoel Porfírio, que sempre esteve presente na orientação desta dissertação e por ter proporcionado grandes ensinamentos durante todo o período do mestrado.

À professora Márcia Mascarenha, minha co-orientadora que sempre esteve à disposição para me orientar neste trabalho.

À Sarah e Vitória pela ajuda na execução dos ensaios de papel filtro.

Aos colegas de pós-graduação em geotecnia que foram muito mais que colegas, foram grandes companheiros, até nas horas mais difíceis.

Aos técnicos de laboratório Vanilson, Ricardo e Tiago pela ajuda nas horas que precisei.

Aos grandes amigos de Leonardo Lacerda e Tales Moreira pelo companheirismo compartilhado, pela força e apoio em todas as fases desta dissertação.

Aos professores da UFV Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Paulo Sérgio de Almeida Barbosa pela oportunidade dos aprendizados adquiridos na área geotécnica.

Ao professor Ricardo da micropaleontologia da UnB por gentilmente ter disponibilizado o Microscópio Estereoscópico.

RESUMO

Atualmente, devido à escassez de recursos naturais para o emprego em obras de engenharia civil, seja por indisponibilidade ou por restrições ambientais, torna-se necessário a utilização de materiais alternativos que possam substituir estes recursos de forma satisfatória. Neste contexto, tem-se o resíduo fosfogesso, que é um material com potencial para utilização em obras geotécnicas. O fosfogesso é um resíduo resultante da produção do ácido fosfórico, o qual é utilizado na produção de fertilizantes fosfatados. Esse resíduo é gerado em larga escala, necessitando cada vez mais da utilização de grandes áreas para sua estocagem, fato que produz sérias degradações no meio ambiente. Visando minimizar os impactos ambientais causados pelo armazenamento do fosfogesso, esta pesquisa tem o objetivo de realizar uma caracterização hidro-mecânica deste resíduo bem como de suas misturas formadas com solo tropical para fins de utilização em obras geotécnicas. Para isso foram estudados o solo, o fosfogesso e as misturas solo-fosfogesso com teores de 10% (Mistura A), 20% (Mistura B) e 50% (Mistura C) de fosfogesso. As amostras de solo e fosfogesso di-hidratado foram coletadas nas cidades de Aparecida de Goiânia e Catalão, respectivamente, ambas situadas no Estado de Goiás. Nestas amostras foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e ensaios de compactação na energia Proctor Intermediária e, a partir das amostras compactadas, foram retirados corpos de prova para realização de ensaios de adensamento, cisalhamento direto, permeabilidade, papel filtro, inundação dos corpos de prova, microfotografias e análises químicas das amostras e da água percolada pelos corpos de prova. Os resultados mostram como o percentual de fosfogesso utilizado nas misturas interfere nos comportamentos mecânicos e hidráulicos do solo. Com base nos resultados obtidos pôde-se concluir que a mistura com 10% de fosfogesso em sua composição é a que menos interfere nas qualidades apresentadas pelo solo, possuindo inclusive melhor distribuição granulométrica e menor coeficiente de permeabilidade quando comparada ao solo. Desta forma, tem-se que a utilização da mistura com 10% de fosfogesso pode ser considerada uma alternativa viável para a inserção do fosfogesso em obras geotécnicas.

ABSTRACT

Nowadays, due to the scarcity of natural resources for utilization in civil engineering works, either because of unavailability or because of environmental restrictions, it becomes essential to use alternative materials that can replace those resources in a satisfactory way. In this context, there is the phosphogypsum waste, which is a material with potential for use in geotechnical works. The phosphogypsum is a kind of waste resulting from the production of phosphoric acid, which one is used in the production of phosphate fertilizers. This waste is generated on a large scale, requiring more and more the use of large areas for its storage; as a result, it may produce serious degradation in the environment. In order to minimize the environmental impacts caused by phosphogypsum storage, this research aims to carry out a hydromechanical characterization of this waste as well as their mixtures formed with tropical soil in order that we can observe how they be used in geotechnical works. For this, we studied the soil, the phosphogypsum, and the mixtures soil-phosphogypsum at levels of 10% (Mixture A), 20% (Mixture B), and 50% (Mixture C) phosphogypsum. Soil and phosphogypsum dihydrate samples were collected in towns Aparecida de Goiânia and Catalão, both located in the State of Goiás. In these samples were carried out characterization tests and geotechnical tests in Intermediate Proctor compaction energy, and from the compacted samples were removed specimens for compaction test, direct shear test, permeability test, filter paper test, flooding of the specimens test, and microphotographs and chemical analyses from samples and from the water percolated through the specimens. The results show how the phosphogypsum percentage used in the mixtures interferes on the mechanical and hydraulic behavior of the soil. The results point out that the mixture with 10% phosphogypsum in its composition is the one which least interferes in the qualities shown by the soil, and it has even a better particle size distribution and a lower coefficient of permeability when compared to the soil. Thus, it follows that the use of the mixture with 10% phosphogypsum can be considered a viable alternative to the insertion of phosphogypsum in geotechnical works.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ROCHAS FOSFÁTICAS	5
2.2 PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO	8
2.3 FOSFOGESSO	9
2.3.1 PROCESSOS PARA A FORMAÇÃO DO FOSFOGESSO	11
2.3.1.1 PROCESSO DI-HIDRATADO (DH).....	11
2.3.1.2 PROCESSO HEMI-HIDRATADO (HH).....	12
2.3.1.3 PROCESSO HEMI-DI-HIDRATADO (HDH)	13
2.3.1.4 PROCESSO ANIDRO	13
2.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FOSFOGESSO.....	14
2.3.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E MORFOLÓGICAS DO FOSFOGESSO	16
2.3.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO FOSFOGESSO.....	17
2.3.5 CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DO FOSFOGESSO.....	20
2.3.6 GERAÇÃO DO FOSFOGESSO, DISPOSIÇÃO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS.....	23
2.3.7 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO	25
2.3.7.1 APLICAÇÃO NA AGRICULTURA	25
2.3.7.2 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA	26
2.3.7.3 APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.3.7.4 FOSFOGESSO EM GEOTECNIA.....	27
2.4 SOLOS TROPICAIS.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 VISITA TÉCNICA.....	34

3.2	COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	35
3.2.1	FOSFOGESSO.....	35
3.2.2	SOLO	36
3.3	EXECUÇÃO DAS MISTURAS	37
3.4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	38
3.4.1	TEORES DE UMIDADE DO FOSFOGESSO E MISTURAS	38
3.4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	39
3.4.3	CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS	40
3.4.4	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	40
3.4.5	ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL.....	41
3.4.6	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	43
3.4.7	ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	46
3.4.8	ENSAIO DE CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	47
3.4.9	INUNDAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	50
3.4.10	ANÁLISE DE MICROFOTOGRAFIAS.....	50
3.4.11	ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS NO ESTADO SÓLIDO.....	51
3.4.12	ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA PERCOLADA	51
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	52
4.1	CARACATERIZAÇÃO FÍSICA	52
4.1.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	52
4.1.2	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	57
4.1.3	MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	57
4.1.4	CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS	58
4.2	COMPACTAÇÃO.....	59
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS.....	61
4.3.1	ENSAIO DE ADENSAMENTO	61
4.3.2	CISALHAMENTO DIRETO.....	64
4.4	ENSAIOS HIDRÁULICOS	70
4.4.1	PERMEABILIDADE.....	70
4.4.2	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA	71
4.4.3	INUNDAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	76
4.5	ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	79
4.5.1	APRESENTAÇÃO DE MICROFOTOGRAFIAS	79

4.5.2	ANÁLISES QUÍMICAS	85
5	ANÁLISES DOS RESULTADOS	88
5.1.1	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS	88
5.1.2	PERMEABILIDADE DAS AMOSTRAS	89
5.1.3	ANÁLISE DO ENSAIO DE ADENSAMENTO.....	93
5.1.4	ANÁLISE DO CISALHAMENTO DIRETO	97
5.1.5	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA	106
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	109
6.1	CONCLUSÕES	109
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Análises físicas de amostras de fosfogessos di-hidratados oriundos de diferentes localidades.....	15
Tabela 2.2 - Concentrações típicas dos metais pesados presentes no fosfogesso (Taha <i>et al.</i> , 1995) (modificado - Oliveira, 2005)	18
Tabela 2.3 - Análises químicas do fosfogesso originado através de diferentes processos (Kouloheris, 1980)	18
Tabela 2.4 - Análise química do fosfogesso di-hidratado de diferentes origens (Freitas, 1992)	19
Tabela 2.5 - Concentrações de radionuclídeos no fosfogesso [Bq.kg^{-1}] (modificado - Fernandes <i>et al.</i> , 2009)	22
Tabela 2.6 - Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima em corpos de prova compactados (Ortiz, 1997)	28
Tabela 3.1 - Composição das amostras estudadas.....	37
Tabela 3.2 - Avaliação dos teores de umidade presentes nas amostras	38
Tabela 4.1 - Percentuais granulométricos das amostras estudadas	53
Tabela 4.2 - Coeficientes de não uniformidade e curvatura obtidos das curvas granulométricas	56
Tabela 4.3 - Limites de Atterberg obtidos para as amostras estudadas.....	57
Tabela 4.4 - Resultados encontrados para a massa específica dos sólidos	57
Tabela 4.5 - Classificação geotécnica dos materiais	59
Tabela 4.6 - Parâmetros obtidos no ensaio de compactação para as condições ótimas	61
Tabela 4.7 - Condições iniciais dos corpos de prova	61
Tabela 4.8 - Propriedades presentes nas curvas de adensamento das amostras estudadas	63
Tabela 4.9 - Coeficientes de variação volumétrica das amostras no ensaio de adensamento ..	64
Tabela 4.10 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto.....	70
Tabela 4.11 - Coeficientes de permeabilidade a 20°C para $i = 2$ e $i = 10$	71
Tabela 5.1 - Frações granulométricas representativas do solo e fosfogesso	88
Tabela 5.2 - Frações granulométricas teóricas e obtidas através do ensaio das misturas	89
Tabela 5.3 - Parâmetros de resistência efetivos das amostras e teor de silte	101
Tabela 5.4 - Comparação entre os parâmetros de resistência obtidos para a Mistura C com diferentes tempos de adensamento do corpo de prova	105
Tabela 5.5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção.	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Depósitos de rocha fosfática potencialmente econômicos presentes no mundo (modificado - McClellan & van Kauwenbergh, 2004).	5
Figura 2.2 - Ocorrências dos depósitos fosfáticos no Brasil (modificado - Brandão, 2002).	7
Figura 2.3 - Produção de ácido fosfórico por via úmida (modificado - Morel, 1971).....	8
Figura 2.4 - Esquema de produção do ácido fosfórico e formação do fosfogesso.....	10
Figura 2.5 - Distribuição granulométrica do fosfogesso di-hidratado (Kobayashi, 2000).....	14
Figura 2.6 - Partículas de fosfogesso di-hidratado (modificado - Silvestre, 2002).....	17
Figura 2.7 - Percentuais de radionuclídeos contidos em diferentes etapas na indústria de fertilizantes (modificado - Fernandes <i>et al.</i> , 2009).	21
Figura 2.8 - Disposição do fosfogesso pela deposição a úmido (Canut, 1996).	24
Figura 2.9 - Formação de pilhas de fosfogesso di-hidratado pela deposição a seco.....	24
Figura 2.10 - Mapa das principais áreas de ocorrência dos solos lateríticos no território brasileiro (Villibor <i>et al.</i> , 2000).	31
Figura 2.11 - Perfil de solo com evidente distinção entre os horizontes A, B (laterítico) e C (saprolítico) (Marangon, 2004).	32
Figura 3.1 - Coleta do fosfogesso.....	35
Figura 3.2 - Quarteamento do solo presente nos dois pontos de coleta.	36
Figura 3.3 - Correlação de umidades para misturas solo-fosfogesso e fosfogesso.	39
Figura 3.4 - Uso do aparelho automático de compactação.	41
Figura 3.5 - Prensas de adensamento utilizadas.	42
Figura 3.6 - Gráfico de adensamento da Mistura C submetida a 400 kPa de tensão.	42
Figura 3.7 - Corpo de prova e caixa de cisalhamento direto utilizados.	43
Figura 3.8 - Adensamento da Mistura C no ensaio de cisalhamento direto no tempo de 12,5 horas.	45
Figura 3.9 - Corpo de prova da Mistura C e anéis utilizados na montagem do permeâmetro.	46
Figura 3.10 - Moldagem dos corpos de prova utilizados no método do papel filtro.	48
Figura 3.11 - Corpos de prova embalados e armazenados em vasilhames de plástico.	49
Figura 4.1 - Curvas granulométricas do solo com e sem uso de defloculante.	53
Figura 4.2 - Curvas granulométricas da Mistura A com e sem uso de defloculante.....	54
Figura 4.3 - Curvas granulométricas da Mistura B com e sem uso de defloculante.....	54
Figura 4.4 - Curvas granulométricas da Mistura C com e sem uso de defloculante.....	54
Figura 4.5 - Curvas granulométricas do fosfogesso com e sem uso de defloculante.....	55

Figura 4.6 - Comparação entre as curvas granulométricas das diferentes amostras obtidas com uso de defloculante.....	55
Figura 4.7 - Comparação entre as curvas granulométricas das diferentes amostras obtidas sem uso de defloculante.....	56
Figura 4.8 - Comparação entre as massas específicas estimadas e obtidas em ensaio para as misturas solo-fosfogesso.	58
Figura 4.9 - Curvas de compactação na energia Proctor Intermediária.	60
Figura 4.10 - Curvas de adensamento obtidas para o solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso.....	62
Figura 4.11 - Curvas de adensamento com índices de vazios normalizados.	63
Figura 4.12 - Resultados do cisalhamento direto para o solo: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	65
Figura 4.13 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura A: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	66
Figura 4.14 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura B: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	67
Figura 4.15 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura C: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	68
Figura 4.16 - Resultados do cisalhamento direto para o fosfogesso: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	69
Figura 4.17 - Curvas de retenção de água do solo: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.	72
Figura 4.18 - Curva de retenção de água da Mistura A: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.....	72
Figura 4.19 - Curva de retenção de água da Mistura B: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.	72
Figura 4.20 - Curva de retenção de água da Mistura C: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.	73

Figura 4.21 - Curva de retenção de água do fosfogesso: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.....	73
Figura 4.22 - Curvas de retenção de água das amostras estudadas em função do grau de saturação.....	74
Figura 4.23- Curvas de retenção de água das amostras estudadas em função do teor de umidade.	74
Figura 4.24 - Valores da massa de fungo para as Misturas A, B e C relacionadas aos graus de saturação das amostras.	75
Figura 4.25 - Curvas de retenção de água da Mistura B referentes à sucção total e matricial.	76
Figura 4.26 - Corpos de prova antes da inundação: (a) solo; (b) Mistura A; (c) Mistura B; (d) Mistura C; (e) fosfogesso.	77
Figura 4.27 - Corpos de prova imersos por 6 minutos: (a) solo; (b) Mistura A; (c) Mistura B; (d) Mistura C; (e) fosfogesso.	77
Figura 4.28 - Corpos de prova ao final da avaliação: (a) solo após 18 horas; (b) Mistura A após 24 horas; (c) Mistura B após 18 horas; (d) Mistura C após uma hora; (e) fosfogesso após uma hora.	78
Figura 4.29 - Microfotografia do solo natural.....	79
Figura 4.30 - Microfotografia do solo adensado.	80
Figura 4.31 - Microfotografia da Mistura A natural.	80
Figura 4.32 - Microfotografia da Mistura A adensada.	81
Figura 4.33 - Microfotografia da Mistura B natural.....	81
Figura 4.34 - Microfotografia da Mistura B adensada.....	82
Figura 4.35 - Microfotografia da Mistura C natural.....	82
Figura 4.36 - Microfotografia da Mistura C adensada.	83
Figura 4.37 - Orientação das partículas presentes na Mistura C natural.....	83
Figura 4.38 - Microfotografia do fosfogesso natural.	84
Figura 4.39 - Microfotografia do fosfogesso adensado.....	84
Figura 4.40 - Microfotografia do fosfogesso adensado.....	85
Figura 5.1 - Coeficientes de permeabilidade em distintos gradientes hidráulicos.	90
Figura 5.2 - Propriedades das amostras <i>versus</i> teor de fosfogesso: (a) C_U ; (b) índice de vazios.	90
Figura 5.3 - Coeficientes de permeabilidade obtidos através do ensaio oedométrico.	91
Figura 5.4 - Gráficos de adensamento para obtenção do c_v da Mistura C submetida a uma tensão de 50 kPa: (a) método de Taylor; (b) método de Casagrande.....	92

Figura 5.5 - Coeficientes de permeabilidade corrigidos obtidos através do ensaio oedométrico.	93
Figura 5.6 - Curvas de adensamento normalizadas das amostras estudadas.....	94
Figura 5.7 - Deslocamentos verticais dos corpos de prova submetidos a tensão de 400 kPa: (a) solo; (b) fosfogesso.	95
Figura 5.8 - Deformações obtidas no ensaio oedométrico.	96
Figura 5.9 - Coeficientes de adensamento vertical obtidos através do k_{corr}	97
Figura 5.10 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 50 kPa.....	98
Figura 5.11 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 100 kPa.....	99
Figura 5.12 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 200 kPa.....	99
Figura 5.13 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 400 kPa.....	100
Figura 5.14 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de fosfogesso: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.....	102
Figura 5.15 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de silte: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.....	102
Figura 5.16 - Variação do intercepto de coesão efetiva com o teor de silte: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.....	103
Figura 5.17 - Consolidação da Mistura C em função do tempo.....	103
Figura 5.18 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura C, submetida a 12,5 horas de consolidação: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica <i>versus</i> deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.	104
Figura 5.19 - Relação entre tensão de cisalhamento e deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto cíclico.....	106
Figura 5.20 - Variação dos índices de vazios das misturas com os teores de umidade.	107
Figura 5.21 - Curvas de retenção ajustadas pela equação de Romero (1999) para as amostras de fosfogesso, solo e misturas solo-fosfogesso.....	108

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

%	Porcentagem
#	Peneira número
°C	Graus Celsius
a	Valor da sucção para umidade higroscópica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	Prata
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
As	Arsênio
ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials
B	Boro
Ba	Bário
BaO	Óxido de bário
Bq	Bequerel
Bq.kg ⁻¹	Bequerel por quilograma
c	Coesão
c'	Intercepto de coesão efetiva
C	Comprimento
C ₁	Constante
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca ₁₀ (PO ₄ CO ₃) ₆ (OH) ₂	Carbonato-hidroxiapatita
Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ F ₂	Fluroapatitas
Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂	Hidroxiapatita
Ca _{10-x-y} Na _x Mg _y (PO ₄) _{6-z} (CO ₃) _z F _{0.4z} F ₂	Francolita
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CaSO ₄ nH ₂ O	Fosfogesso
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CBR	California Bearing Ratio

C_c	Índice de compressão
C_C	Coefficiente de curvatura
C_d	Índice de descompressão
Cd	Cádmio
CD	Consolidado e drenado
cm^2	Centímetro quadrado
cm^3/g	Centímetro cúbico por grama
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C_r	Índice de recompressão
Cr	Cromo
CTC	Capacidades de troca catiônica
C_U	Coefficiente de não uniformidade
Cu	Cobre
c_v	Coefficiente de adensamento vertical
D_{10}	Diâmetro de 10% passando
D_{30}	Diâmetro de 30% passando
DH	Di-hidratado
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
ep	Espessura
F	Flúor
Fe	Ferro
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FIPR	Florida Institute of Phosphate Research
G	Densidade dos grãos
g	Gramas
Gy	Gray
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico

g/l	Grama por litro
h	Hora
H	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
ha	Hectares
Hg	Mercúrio
HDH	Hemi-di-hidratado
HF	Ácido Fluorídrico
HH	Hemi-hidratado
h _s	Altura ideal de sólidos
i	Gradiente hidráulico
ICC	Indústria Carboquímica Catarinense
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IG	Índice de grupo
I _p	Índice de plasticidade
IRM	Institute for Recyclable Materials
J	Joule
k	Coefficiente de permeabilidade
K	Potássio
⁴⁰ K	Potássio 40
k ₂₀	Coefficiente de permeabilidade a 20°C
K ₂ O	Óxido de potássio
k _{corr}	Coefficiente de permeabilidade corrigido
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kPa	Quilopascal
L	Largura
LCPC	Laboratoire Central des Pontset Chaussées
LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
ln	Logaritmo neperiano
LTDA	Limitada

LVDT	Linear Variable Differential Transformer
l/s.m ²	Litro por segundo ao metro quadrado
m	Metro
m, n e α	Parâmetros para curva característica (van Genuchten,1980)
m ² /g	Metro quadrado por grama
m/s	Metro por segundo
mg/dm ³	Miligrama por decímetro cúbico
mg/kg	Miligrama por quilograma
mg/l	Miligrama por litro
Mfm	Massa seca de fungo presente no papel filtro utilizado na determinação da sucção matricial
Mft	Massa seca de fungo presente no papel filtro utilizado na determinação da sucção total
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
min	Minuto
ML	Silte de baixa compressibilidade
mm	Milímetro
Mn	Manganês
mR/h	Miliroentgen por hora
mSv/h	Milisievert por hora
m _v	Coefficiente de variação volumétrica
n	Número de moléculas de água presente na composição do fosfogesso
n°	Número
Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NBR	Normas Brasileiras
P	Fósforo
²¹⁰ Po	Polônio 210
P ₂ O ₅	Anidrido fosfórico
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Parte por milhão

R	Roentgen
R ²	Coefficiente de determinação
²²⁶ Ra	Rádio 226
S	Enxofre
Se	Selênio
SI	Sistema Internacional de Unidades
SiO ₂	Óxido de silício
SO ₃	Anidrido sulfúrico
SO ₄	Sulfato
S _r	Grau de saturação
S _{r0}	Grau de saturação inicial
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
Sv	Sievert
t ₅₀	Tempo correspondente a 50% do adensamento
t ₉₀	Tempo correspondente a 90% do adensamento
t ₁₀₀	Tempo em segundos para que ocorra 100% de adensamento
t _f	Tempo requerido para ruptura
TiO ₂	Óxido de titânio
²³² Th	Tório 232
²³⁸ U	Urânio 238
u _a	Poropressão de ar
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
u _w	Poropressão de água
w	Teor de umidade
w _f	Teor de umidade do papel filtro
w _L	Limite de liquidez
w _{ot}	Teor de umidade ótima
w _p	Limite de plasticidade
w _{sat}	Teor de umidade do solo quando saturado
Zn	Zinco

ε_v	Deformação volumétrica
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo
γ_w	Peso específico da água
μm	Micrometro
$\mu Sv/h$	Microsievert por hora
ρ_s	Massa específica dos sólidos
σ'_p	Tensão de pré-adensamento
τ_f	Resistência ao cisalhamento de pico
τ_R	Resistência ao cisalhamento residual
ψ	Sucção das amostras

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de atender à grande demanda do mercado interno e externo por minérios e a presença de reservas significativas de alguns destes, faz com que o Brasil seja um grande produtor mineral. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2007), há pelo menos 55 minerais sendo explorados no Brasil e cada qual com uma dinâmica de mercado específica. O grande investimento de capital nacional e estrangeiro, aliada à aplicação de alta tecnologia nas minas, ajuda a compreender o crescimento da produção mineral brasileira.

Neste contexto, o Estado de Goiás possui consideráveis reservas de rocha fosfática e, por consequência, abriga uma indústria que se utiliza da matéria prima obtida desta rocha para a produção de fertilizantes fosfatados. Como resultado desta produção é gerado um resíduo sólido industrial, conhecido como fosfogesso, gesso químico ou gesso agrícola.

Sfar Felfoul *et al.* (2002) descrevem de modo simplificado que o fosfogesso é resultante do ataque à rocha fosfática pelo ácido sulfúrico, resultando neste resíduo e em ácido fosfórico, que é a matéria prima para a produção de fertilizantes.

O descarte final do fosfogesso pode ser feito de duas maneiras: através de empilhamento em grandes áreas próximas às fábricas, ou, mais raramente, descarregando-o em rios ou oceanos, ambas causando variáveis graus de impacto ao meio ambiente (Freitas, 1992). Dessa forma, sérios problemas ambientais podem ser gerados a partir deste armazenamento, como por exemplos: necessidade de grandes áreas para este ser estocado ou depositado em lagoas de sedimentação, contaminação de corpos d'água e águas subterrâneas e poluição visual produzida pela formação de enormes áreas degradadas.

Outra preocupação relacionada ao fosfogesso diz respeito às consequências negativas que este pode trazer à saúde humana. De acordo com Oliveira (2005), o resíduo em seu estado natural pode conter uma grande quantidade de metais pesados e de impurezas tais como resíduos de ácido fosfórico e sulfúrico. Hull & Burnett (1996) relatam ainda que a rocha fosfática apresenta elementos radioativos que estão em equilíbrio, sendo estes ativados durante a reação do ácido sulfúrico com a rocha e parte depositada no fosfogesso obtido.

1.1 MOTIVAÇÃO

O fosfogesso encontrado no Brasil é estocado de duas formas, em enormes depósitos que ficam a céu aberto ou em lagoas de deposição, ambas ocupando um espaço físico considerável, o que pode ser um problema para a expansão das indústrias produtoras de fertilizantes fosfáticos.

Com relação à unidade produtora do Estado de Goiás, somente no ano de 2009 foram gerados 680 mil toneladas do resíduo fosfogesso. Esta geração de resíduo, em relação ao ano de 2003, representou um aumento de quase 60%, o que se pode concluir que este elevado acúmulo de resíduos pode trazer uma série de danos ambientais dentre outros.

Além disso, com os aspectos do desenvolvimento sustentável se tornando cada vez mais comuns no dia-a-dia, surge a necessidade de se buscarem novas alternativas que possam substituir em parte ou em sua totalidade as matérias primas obtidas de jazidas ou áreas de empréstimo.

Portanto, a possibilidade de reutilização do fosfogesso deve ser verificada e a engenharia geotécnica possui um grande potencial para esse fim, pois podem ser dados destinos nobres a este tipo de resíduo, como na execução de camadas de pavimento rodoviário (reforço de subleito, sub-base e base), na construção de aterros rodoviários, entre outras aplicações geotécnicas de interesse.

Em suma, verifica-se que há um grande problema ambiental sendo gerado devido à produção excessiva de fosfogesso, entretanto, há também um potencial de aplicação desse resíduo. Além disso, como Catalão é grande produtor de fosfogesso, há uma motivação por parte da empresa produtora e dos órgãos municipais em se dar um destino ambientalmente correto para este resíduo. Desta forma, o estudo das propriedades mecânicas e hidráulicas do fosfogesso e da mistura deste com solo são fatores essenciais e complementares para a realização de análises técnico-econômicas aplicáveis. Vale ressaltar que este trabalho dará continuidade às pesquisas desenvolvidos na Universidade Federal de Goiás (UFG) por Mesquita (2007), Rufo (2009) e Metogo (2010).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da adição do resíduo fosfogesso nas características mecânicas e hidráulicas do solo de estudo, tendo em vista o comportamento do fosfogesso e das misturas resultantes quando empregados em obras geotécnicas.

Para alcançar o objetivo descrito anteriormente se fazem necessários os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o fosfogesso produzido no Estado de Goiás, bem como algumas misturas resultantes com o solo de Aparecida de Goiânia;
- Determinar a permeabilidade em diferentes gradientes nas amostras de solo, fosfogesso e misturas;
- Avaliar a capacidade de armazenamento de água em amostras compactadas de solo, fosfogesso e mistura solo-fosfogesso;
- Avaliar os riscos de contaminação ambiental.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi elaborado na forma de dissertação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia, estando dividido em 6 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta os aspectos gerais da geração do fosfogesso, a motivação e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica. Neste capítulo buscou-se relatar os aspectos do resíduo fosfogesso e do solo que são fundamentais para auxiliar na execução dos ensaios de laboratório e na análise dos resultados.

O Capítulo 3 descreve os materiais utilizados e a metodologia adotada na execução dos ensaios laboratoriais.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios de laboratório.

O Capítulo 5 apresenta a análise dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 6 discorre a respeito das principais conclusões obtidas e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROCHAS FOSFÁTICAS

Straaten (2002) descreve que o termo rocha fosfática é um pouco impreciso, mas é aceito globalmente para descrever qualquer ocorrência de material geológico que contenha um ou mais minerais de fosfato para uso comercial.

Silva & Giuliatti (2010) relatam que os concentrados apatíticos, resultantes do processo de beneficiamento mineral de fosfatos, são comercialmente conhecidos no setor de fertilizantes como rocha fosfática.

As reservas de rocha fosfática mundiais são advindas de diferentes origens sob o ponto de vista geológico. Straaten (2002) e Canut (2006) descrevem que estas rochas são provenientes de depósitos de origem ígnea, sedimentar, metamórfica e de depósitos biogénéticos. Cabe destacar ainda que os depósitos de origem ígnea e sedimentar são os mais importantes do ponto de vista econômico.

Na Figura 2.1, que exibe a localização e a origem das principais jazidas de rocha fosfática presentes no mundo, verifica-se que, tanto Marrocos, China e Estados Unidos principalmente na região da Flórida, a rocha fosfática em sua grande maioria é de origem sedimentar.

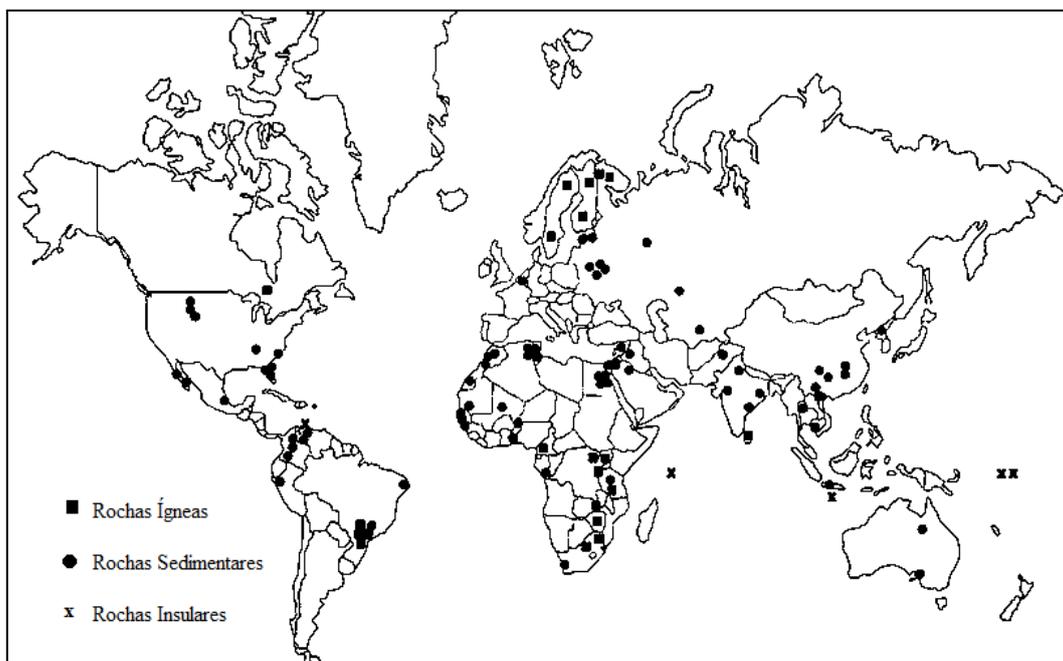


Figura 2.1 - Depósitos de rocha fosfática potencialmente econômicos presentes no mundo (modificado - McClellan & van Kauwenbergh, 2004).

De acordo com o DNPM (2008), os países com as maiores reservas de rochas fosfáticas são Marrocos (42,3%), China (26,2%) e Estados Unidos (6,9%), sendo estes também os três maiores produtores de fosfato. Neste cenário, o Brasil ocupa a sexta posição em termos de produção e conta com uma reserva em torno de 0,6% do total de 50 bilhões de toneladas presentes no mundo.

De acordo com Lima (1989) citado por Oliveira (2005), os depósitos de origem ígnea são responsáveis por 15% a 20% da produção mundial de rocha fosfática e os de origem sedimentar, por 80% a 85%.

O Brasil, devido aos derrames e intrusões ocorridos no período terciário, possui em sua maioria depósitos ígneos concentrados nas regiões sudeste e centro-oeste. Cerca de 80% das jazidas de fosfatos naturais brasileiras são de origem ígnea, e apresentam teores de anidrido fosfórico (P_2O_5) bastante variáveis, em média 12%, enquanto que em termos mundiais as jazidas de fosfato são de origem sedimentar apresentando em média teores de 17% em P_2O_5 (Saueia, 2006).

Os exemplos de depósitos fosfáticos de origem ígnea no Brasil são: Araxá e Tapira (MG), Ipanema e Serrote (SP), Anitápolis (SC) e Maicuru (PA). Essas ocorrências, incluindo as de Jacupiranga (SP) e Catalão (GO), são de idades geológicas mesosóicas (Jurássico-Cretáceo), não sofrendo nenhuma modificação após a intrusão vulcânica, a não ser a alteração superficial e a erosão (Cekinski *et al.*, 1990).

De acordo com Guerra (1979) citado por Oliveira (2005), os principais depósitos de rocha sedimentar estão concentrados no estado de Pernambuco e na região do município de Patos de Minas localizado no estado de Minas Gerais. Nestes casos de ocorrência cabe destacar a fosforita, que é um fosfato tricálcio, amorfa, proveniente de organismos marinhos, ocorrendo geralmente associada a carbonatos de cálcio e de magnésio, óxidos de ferro e de alumínio e traços de urânio e de tório.

Conforme o DNPM (2008), as maiores reservas brasileiras estão localizadas nos estados de Minas Gerais (67%), Goiás (14%) e São Paulo (6%). A Figura 2.2 apresenta um esquema da distribuição dos depósitos fosfáticos no Brasil bem como indícios da presença destes.



Figura 2.2 - Ocorrências dos depósitos fosfáticos no Brasil (modificado - Brandão, 2002).

Segundo Cekinski *et al.* (1990) as rochas brasileiras por apresentarem baixa concentração de P_2O_5 , são beneficiadas de modo a se elevar o teor de fósforo a níveis adequados para a produção de ácido fosfórico e fertilizantes.

Lapido-Loureiro & Melamed (2009) relatam que os concentrados apatíticos, por apresentarem alto teor de fósforo em sua composição, são utilizados quase que exclusivamente, cerca de 90%, para a produção de ácido fosfórico, e os 10% restantes destinados a outras aplicações.

Esses concentrados são constituídos principalmente pelos minerais portadores de fósforo - fluorapatita, hidroxiapatita e carbonato-apatita - e em menor quantidade, pelos minerais portadores de ferro, alumínio, sílica, magnésio, lantanídeos, entre outros (Silva & Giulietti, 2010). Straaten (2002) detalha a ocorrência destes minerais da seguinte forma:

- fluoroapatitas ($Ca_{10}(PO_4)_6F_2$), encontrada principalmente nas rochas ígneas e metamórficas;
- hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), encontrada nos depósitos ígneos, ambientes metamórficos e biogênicos;
- carbonato-hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4CO_3)_6(OH)_2$), presente principalmente nas ilhas e cavernas sob forma de excrementos de aves e morcegos; e

- francolita ($\text{Ca}_{10-x-y}\text{Na}_x\text{Mg}_y(\text{PO}_4)_{6-z}(\text{CO}_3)_z\text{F}_{0.4z}\text{F}_2$), encontrada em maior parte nos depósitos marinhos.

As apatitas apresentam sistema cristalino hexagonal (divisão hexagonal) e pertencem à classe cristalina bipiramidal-hexagonal. De modo geral, os cristais apresentam hábito cristalino prismático longo, mas podem apresentar-se, também, como prismáticos curtos ou tabulares (Silva & Giulietti, 2010).

2.2 PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO

Kulaif (1999) cita que existem dois processos para a produção de ácido fosfórico (H_3PO_4): por via úmida e por via térmica, sendo que este último fornece um ácido fosfórico com maior teor de P_2O_5 . Os dois processos de produção de ácido fosfórico são descritos a seguir.

No processo de via úmida, segundo Morel (1971), a rocha fosfática, após a extração, é transportada para um setor de refinação e depois atacada com ácido sulfúrico em maior proporção para produzir o super fosfato normal. Depois de uma filtração, se obtém um ácido fosfórico bruto contendo de 28% a 30% de anidrido fosfórico. Ainda pode haver a concentração do ácido fosfórico a 40% de P_2O_5 para a produção de fosfato de amônia, 54% para demais comercializações e 72% que constitui o chamado ácido super fosfórico. Este processo é mostrado em forma de esquema na Figura 2.3. De acordo com Cekinski *et al.* (1990) cerca de 85% da produção mundial é obtido a partir deste método.

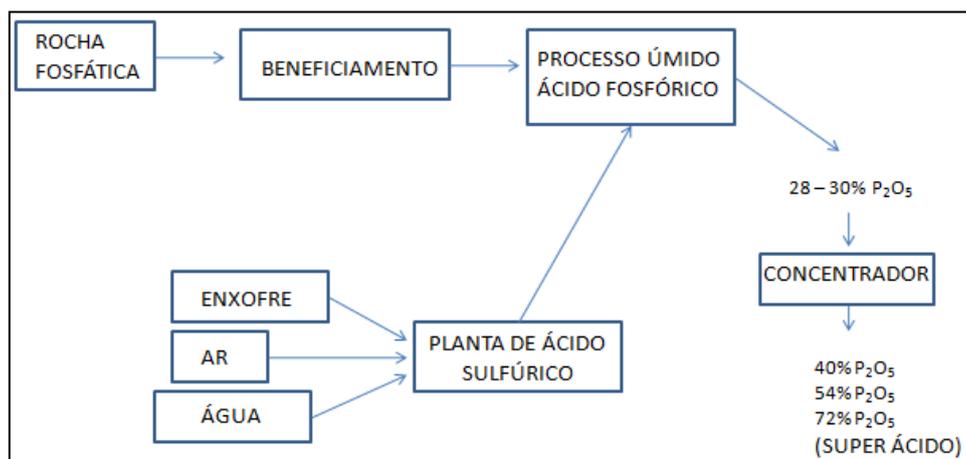


Figura 2.3 - Produção de ácido fosfórico por via úmida (modificado - Morel, 1971).

No meio industrial existem outras formas de se produzir ácido fosfórico através da via úmida, sendo o modo mais difundido mundialmente denominado de rota sulfúrica. No entanto, a

substituição do rota sulfúrica pela rota nítrica ou clorídrica, segundo Araújo *et al.* (2004) e Lapidou-Loureiro & Melamed (2009), resultam na obtenção de subprodutos de maior valor comercial, o que dilui custos e reduz impactos ambientais na produção de fertilizantes fosfatados. Apesar de possuírem como inconvenientes um maior custo e maior complexidade do processo e de manuseio dos ácidos, estas rotas podem trazer uma redução drástica no volume de fosfogesso. Atualmente, estes processos se encontram em fase de maiores estudos laboratoriais e de viabilidade técnica e econômica.

Na via térmica, o concentrado de rocha fosfática é carregado em fornos elétricos com coque e sílica, em proporções adequadas, obtendo-se o fósforo líquido. Este é então queimado em uma câmara de combustão na presença de ar, onde os gases, ao se resfriarem, se transformam, por hidratação, em ácido fosfórico (Kulaif, 1999). Segundo Santos (2002), este processo fornece ácido fosfórico de maior pureza, porém é responsável por um alto consumo de energia elétrica. O ácido fosfórico proveniente deste processo é destinado à manufatura nos setores farmacêutico e alimentar.

No Brasil, a produção anual de ácido fosfórico já ultrapassa a marca de 1,2 milhão de toneladas de P_2O_5 , representando mais de 77% da produção da América Latina e pouco mais de 3% da produção mundial (Silva & Giulietti, 2010).

2.3 FOSFOGESSO

Chang *et al.* (1989) e Hull & Burnett (1996) definem o resíduo fosfogesso como um subproduto resultante da reação química que ocorre entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico para a obtenção do ácido fosfórico. Este último é largamente utilizado na indústria de fertilizantes fosfatados como matéria prima principal.

Como denominação de seu nome, “fosfo” indica sua origem industrial, e “gesso” o seu componente predominante (Ghafoori & Chang, 1993), pois esse subproduto é sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e, portanto, apresenta a mesma composição que o gesso natural. Devido à abundância e sua larga distribuição geográfica, o gesso tem um valor mineral baixo e, em muitos casos, seu valor no solo antes da exploração é considerado praticamente zero. Em face da competição econômica com o gesso, o uso prático do fosfogesso requer pesquisas inovadoras e contínuas (Oliveira, 2005).

Na Figura 2.4 é mostrado um esquema da associação de matérias primas na fabricação do ácido fosfórico e da obtenção do fosfogesso encontrado no Brasil. Pode-se verificar que após extração do ácido fosfórico da polpa produzida, o fosfogesso é acumulado em pilhas de estocagem ou bombeado para lagoas de sedimentação.

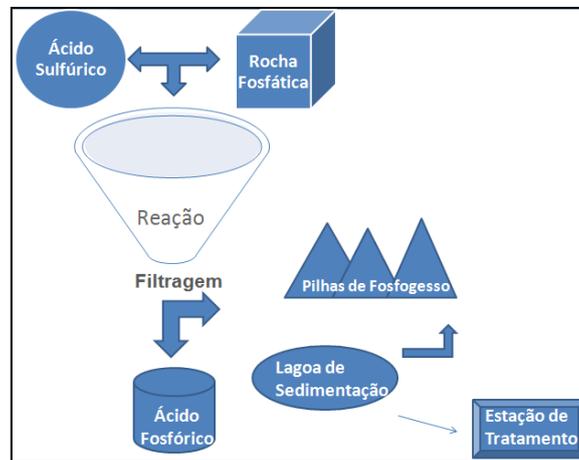
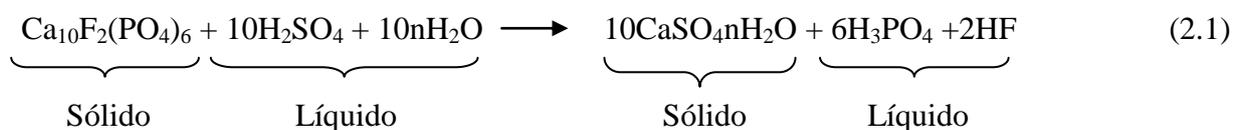


Figura 2.4 - Esquema de produção do ácido fosfórico e formação do fosfogesso.

Apesar de conter a mesma composição do gesso natural (CaSO_4), o resíduo fosfogesso se diferencia deste por apresentar um maior teor de impurezas. Diversos autores como Kouloheris (1980), Freitas (1992) entre outros, descrevem que na produção do ácido fosfórico são transferidas para o fosfogesso todas as impurezas insolúveis contidas nas rochas fosfáticas, tais como metais pesados, fluoretos e radionuclídeos.

De acordo com Hull & Burnett (1996) e Lapiro-Loureiro & Nascimento (2009) o processo químico para obtenção do resíduo fosfogesso é dado pela seguinte equação:



Em que:

- $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$: Fluorapatita;
- H_2SO_4 : Ácido Sulfúrico;
- H_2O : Água;
- $\text{CaSO}_4\text{nH}_2\text{O}$: Fosfogesso;
- H_3PO_4 : Ácido Fosfórico; e
- HF : Ácido Fluorídrico.

Na equação anterior, o coeficiente “n” é função da temperatura empregada durante o processo de obtenção do ácido fosfórico, podendo este assumir valor nulo para fosfogesso anidro, $\frac{1}{2}$ para fosfogesso hemi-hidratado e 2 para fosfogesso di-hidratado.

2.3.1 PROCESSOS PARA A FORMAÇÃO DO FOSFOGESSO

O ácido fosfórico pode ser obtido a partir de diferentes temperaturas na reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfática. Assim, em função desta temperatura o sulfato de cálcio pode apresentar-se em três diferentes formas: di-hidratado, hemi-hidratado e anidro.

Ortiz (1997) relata que as diferenças básicas entre os três processos são as concentrações de ácido fosfórico resultante, a velocidade de dissolução da rocha fosfática e o processo de filtração. Os processos hemi-hidratado e anidro geram maiores concentrações de anidrido fosfórico (P_2O_5) presentes no ácido fosfórico (H_3PO_4). Porém, as elevadas temperaturas empregadas durante o processo de produção expõem os equipamentos industriais ao efeito de corrosão, além de requerer um elevado nível de energia para produção com relação ao processo di-hidratado.

2.3.1.1 PROCESSO DI-HIDRATADO (DH)

As principais indústrias de fertilizantes fosfatados do Brasil utilizam o processo di-hidratado para a obtenção do ácido fosfórico. De acordo com Kouloheris (1980), devido a sua relativa simplicidade em relação aos demais processos, este é o mais difundido em todo o mundo e o mais utilizado nos Estados Unidos. O ácido fosfórico produzido possui uma concentração de 28% a 30% de P_2O_5 .

Neste processo, o fosfogesso formado será dihidrato ($CaSO_4 \cdot nH_2O$), apresentando duas moléculas de água em sua composição ($n = 2$). Para isso são utilizadas temperaturas entre $70^\circ C$ a $80^\circ C$ na reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfática, reação esta que origina uma polpa. Da etapa de reação, a polpa segue para a seção de filtração e lavagem, composta de três etapas. Primeiramente é feita a 1ª filtração, sendo este 1º filtrado enviado para estocagem (H_3PO_4 a 28-30% de P_2O_5). Na segunda etapa, composta da 1ª lavagem e 2ª filtração é produzido o 2º filtrado, que é reciclado no reator (H_3PO_4 fraco, 20% de P_2O_5). E finalmente, na terceira etapa é feita a 2ª lavagem e a 3ª filtração. O 3º filtrado segue para realizar a 1ª lavagem e o subproduto sólido separado, denominado fosfogesso, é enviado para área de armazenamento ou deposição (Cekinski *et al.*, 1990).

Segundo Kouloheris (1980) o processo di-hidratado apresenta como vantagens o baixo custo de implantação do sistema, o baixo custo de produção e a flexibilidade de permitir a utilização de diferentes tipos de rocha fosfática, sejam elas de origem ígnea, sedimentar ou orgânica. Ainda como vantagem este processo permite extrair o urânio existente nas rochas fosfatadas. As desvantagens de obtenção de fosfogesso di-hidratado estão ligadas ao menor rendimento de produção do ácido fosfórico e às grandes quantidades de impurezas presentes no fosfogesso obtido, tais como resíduos de ácido fosfórico e sulfúrico e de metais pesados, que podem poluir o meio ambiente. Para cada tonelada de P_2O_5 produzido são geradas 4,9 toneladas de fosfogesso di-hidratado. De acordo com Trichês & Maccarini (1988), o fosfogesso di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) apresenta coloração clara à acinzentada e possui característica ácida.

2.3.1.2 PROCESSO HEMI-HIDRATADO (HH)

O processo hemi-hidratado (HH), segundo Oliveira (2005) é empregado na África, Europa e Japão, sendo este desenvolvido em temperaturas que variam de $93^\circ C$ a $132^\circ C$, o qual produz ácido fosfórico com concentrações de 38% a 42% de P_2O_5 . O fosfogesso resultante possui $1/2$ molécula de água e apresenta-se como hemihidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$).

Dentre as vantagens oferecidas pelo processo hemi-hidratado, quando comparado com o processo di-hidratado, pode-se citar como as mais importantes: elevada concentração do ácido fosfórico, rápida dissolução da rocha fosfatada e rápido processo de filtração (Ortiz, 1997). Pode-se dizer também que o fosfogesso hemi-hidratado possui menor quantidade de impurezas oriundas da própria rocha fosfática e do ácido sulfúrico.

Quanto às desvantagens, há uma maior demanda por energia, já que o processo é realizado a altas temperaturas, destacando-se que o maior problema ocorre na etapa de filtração. De acordo com Schrodter (1991) citado por Ortiz (1997), na etapa de filtragem existem pequenas quantidades de partículas di-hidratadas, que fazem com que as partículas em condições hemi-hidratadas sejam reidratadas novamente. Logo para se evitar esta possível reidratação, é recomendável a utilização de temperaturas maiores durante o processo.

Estima-se que para cada tonelada de ácido fosfórico produzido são gerados 4,3 toneladas de fosfogesso hemi-hidratado.

2.3.1.3 PROCESSO HEMI-DI-HIDRATADO (HDH)

Este processo é uma combinação de duas técnicas de obtenção do ácido fosfórico, os processos di-hidratado e o hemi-hidratado. De acordo com Kouloheris (1980), este procedimento utiliza parte da simplicidade do processo di-hidratado e gera um resíduo com uma menor quantidade de impurezas, semelhante ao fosfогesso hemi-hidratado. Algumas indústrias presentes na Europa e principalmente no Japão utilizam este processo. Atualmente o processo hemi-di-hidratado é bastante atrativo do ponto de vista econômico, pois combina as vantagens de se obter concentrações de 40% a 52% de P_2O_5 com a geração de um fosfогesso mais limpo.

Temperaturas variando de 90°C a 100°C são utilizadas na reação entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico. A razão da produção entre o fosfогesso e o ácido fosfórico é igual a do processo hemi-hidratado, ou seja, para cada tonelada de ácido fosfórico são obtidas 4,3 toneladas de fosfогesso. A economia de energia também é uma característica desse processo, entretanto, os custos de manutenção dos equipamentos são maiores do que no processo DH (Oliveira, 2005).

2.3.1.4 PROCESSO ANIDRO

Este é um processo pelo qual o fosfогesso obtido está em condições anidras, logo não há a presença de moléculas de água em sua composição. O valor de n da equação de formação do resíduo é nulo, logo o fosfогesso obtido é representado quimicamente por $CaSO_4$.

Segundo Oliveira (2005) este processo é desenvolvido no intervalo de temperaturas de 120°C a 130°C, sendo este o que gera a menor quantidade de resíduo, pois para produzir uma tonelada de ácido fosfórico são gerados cerca de 3,5 toneladas de fosfогesso anidro.

Apesar de produzir menor quantidade de fosfогesso, poucas fábricas no mundo adotam o processo anidro, em decorrência dos elevados custos de produção provocados pela corrosão acelerada de máquinas e equipamentos industriais e pelo alto consumo de energia durante sua operação. Atinge-se aproximadamente uma concentração de 50% de P_2O_5 no ácido fosfórico produzido por este método (Mesquita, 2007).

2.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO FOSFOGESSO

Quanto à distribuição granulométrica do fosfogesso, os trabalhos de Chang *et al.* (1989); Ghafoori & Chang (1993); Ortiz (1997) e Canut (2006) evidenciam que o resíduo pode apresentar diferentes distribuições, sendo em sua maior parte um material com alto percentual de partículas siltosas.

Segundo Ghafoori & Chang (1993), a distribuição granulométrica do fosfogesso depende do processo de produção de ácido fosfórico e do grau de moagem da rocha fosfática utilizada. Por exemplo, as partículas maiores são constituídas de areias siltosas e de fragmentos não-reativos de rocha fosfática que não foram processados na reação com o ácido sulfúrico. De um modo geral, a maioria das dimensões das partículas de fosfogesso está compreendida entre 0,02 a 0,5 mm, com mais de 75% do total das partículas passando na peneira n°. 200 (0,074 mm).

A Figura 2.5 apresenta a distribuição granulométrica do fosfogesso di-hidratado obtido na região de Uberaba – MG utilizado por Kobayashi (2000) para a avaliação da expansibilidade em misturas fosfogesso-cimento.

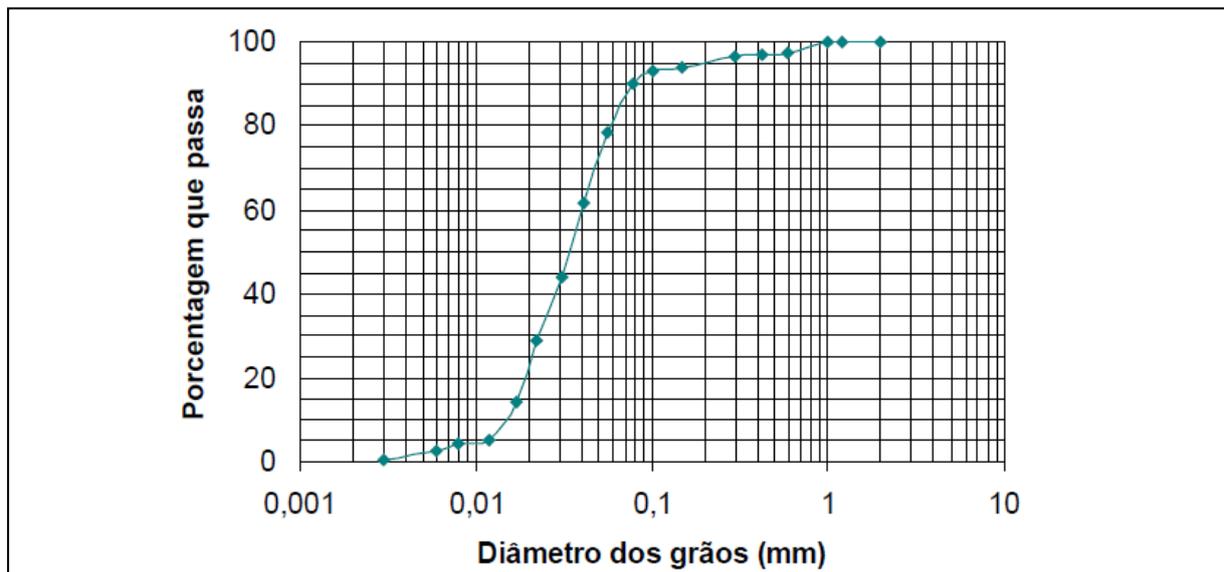


Figura 2.5 - Distribuição granulométrica do fosfogesso di-hidratado (Kobayashi, 2000).

Observando a figura anterior, é possível verificar que em termos de granulometria, este fosfogesso situa-se na classe dos siltes, com cerca de 90% de partículas passando na peneira n° 200 (0,074 mm).

Sfar Felfoul *et al.* (2002) verificou em seu trabalho que o valor da massa específica dos grãos de fosfogesso é ligeiramente superior ao do gesso natural, o que pode ser explicado pela presença de impurezas no fosfogesso.

A Tabela 2.1 apresenta os valores de massa específica dos sólidos para fosfogesso di-hidratados de diversas regiões. A variação desses valores justifica-se pelo fato dos fosfogessos serem originados de diferentes rochas fosfáticas.

Tabela 2.1 - Análises físicas de amostras de fosfogessos di-hidratados oriundos de diferentes localidades

Autor	Chang <i>et al.</i> (1989)	Oliveira (2005)	Degirmenci <i>et al.</i> (2007)
Localização	Florida USA	Minas Gerais Brasil	Bandirma Turquia
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,39	2,53	2,96
Partículas passantes na # 200 (%)	51,0	89,0	79,9

Degirmenci *et al.* (2006) descreve que o fosfogesso é um material que apresenta pouca ou nenhuma plasticidade, sendo classificado no sistema unificado como um silte inorgânico de baixa plasticidade (ML). Na classificação AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) o fosfogesso é classificado como material A-4, ou seja, silte com mais de 35% das partículas passando pela peneira n° 200.

Canut (2006) obteve algumas propriedades físicas na realização de ensaios de laboratório. Em ensaios de adsorção e dessorção de nitrogênio foi obtida área superficial específica de 17,50 m²/g e volume total de poros da ordem de 0,05 cm³/g. Realizando o ensaio de porosimetria de mercúrio foi possível verificar que o diâmetro médio dos poros para o resíduo estudado foi de 0,18 µm.

Quanto a solubilidade do fosfogesso, Sfar Felfoul *et al.* (2002) afirma que esta depende do valor do PH da solução em que o mesmo se encontra imerso, como por exemplo, em uma água desmineralizada esta solubilidade está na ordem de 2,40 g/l. Em seu trabalho é mostrado que a solubilidade é inversamente proporcional ao pH, ou seja, a medida que o valor do pH se torna baixo a solubilidade aumenta.

Outro fator que afeta a solubilidade do fosfogesso é a salinidade do meio. De acordo com Freitas (1992) a solubilidade do fosfogesso na água do mar é de 3,5 g/l, maior que a

solubilidade em água doce na ordem de 2,3 g/l. Com o objetivo de investigar tal fenômeno Papanicolaou *et al.* (2009) realizou um estudo teórico experimental de modo a avaliar os parâmetros físico-químicos que afetam a solubilidade do fosfogesso. Foi verificado que o aumento da solubilidade do resíduo em soluções salinas é basicamente atribuído aos efeitos das forças iônicas, e que mudanças de temperatura tem refletido em pequenas mudanças.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E MORFOLÓGICAS DO FOSFOGESSO

Canut (2006) mostra que análises mineralógicas obtidas por difratometria de raios X revelam que a microestrutura do fosfogesso caracteriza-se pela presença de fases cristalinas, originando, assim, picos bem definidos do mineral gipsita, um sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

De acordo com Mangin (1978) citado por Oliveira (2005) a morfologia do fosfogesso apresenta quatro formas características de cristais, dependentes do mineral e do processo usado na produção do H_3PO_4 , a saber:

- cristais aciculares, com comprimento (C) variando de 80 μm a 500 μm , largura (L) na faixa de 20 μm a 100 μm e espessura (ep) entre 20 μm a 100 μm ;
- cristais tabulares, com dimensões variando de - C: 40 μm a 200 μm ; L: 30 μm a 150 μm ; ep: 5 μm a 10 μm ;
- cristais compactos, que são os cristais tabulares nos quais a espessura atinge dezenas de microns; e
- agregados policristalinos, que são um conjunto de cristais em forma de “ouriço”, apresentando forma esférica com 50 μm a 100 μm de diâmetro.

O tipo e o tamanho dos cristais formados são muito importantes do ponto de vista econômico, pois estas características determinam a quantidade de ácido fosfórico retida no fosfogesso durante a operação industrial de filtração no processo úmido.

Gutti *et al.* (1996) descreve que a estrutura cristalina do fosfogesso obtido através da via úmida consiste geralmente em forma tabular, com os seus cristais entrelaçados uns aos outros.

A Figura 2.6 apresenta uma microfotografia com aumento de 500 vezes feita a partir das partículas do fosfogesso. A partir desta figura as partículas do fosfogesso são identificadas na sua forma tabular.

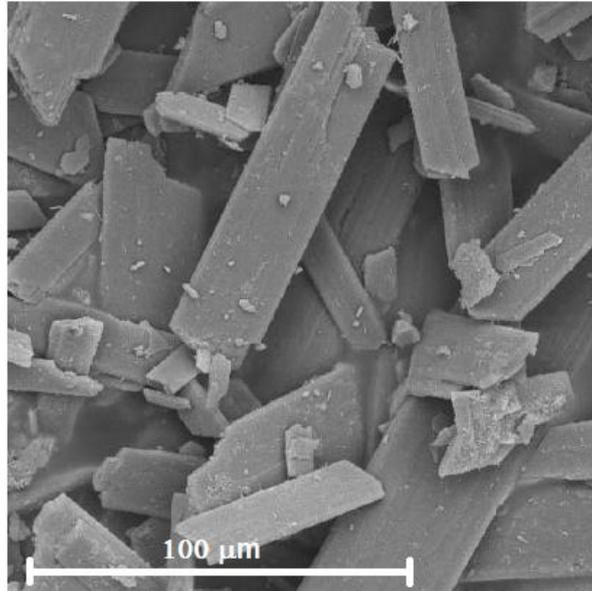


Figura 2.6 - Partículas de fosfogesso di-hidratado (modificado - Silvestre, 2002).

2.3.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO FOSFOGESSO

Segundo Ghafoori & Chang (1993), o fosfogesso encontrado no estado americano da Flórida é constituído em quase sua totalidade por sulfato de cálcio (CaSO_4), algo em torno dos 90%, podendo sofrer pequenas variações. O restante se deve a uma combinação de impurezas tais como areia, fosfato, fluoretos e substâncias orgânicas.

Segundo Oliveira (2005) as impurezas encontradas no fosfogesso podem ser formadas por vários elementos químicos, tais como: arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selênio (Se) e prata (Ag), também conhecidos como metais pesados. Adicionalmente são encontrados elementos radioativos como o urânio (^{238}U), tório (^{232}Th), rádio (^{226}Ra) entre outros, sendo que uma abordagem mais ampla sobre estes radionuclídeos será feita no item 2.3.5.

Conforme apresentado na Tabela 2.2, Taha *et al.* (1995) citado por Oliveira (2005) apresenta concentrações típicas dos metais pesados encontrados na composição do fosfogesso bruto do estado americano da Louisiana.

Tabela 2.2 - Concentrações típicas dos metais pesados presentes no fosfogesso (Taha *et al.*, 1995) (modificado - Oliveira, 2005)

Elementos	Concentração
As	1 a 5
Ba	50
Cd	0,3 a 0,4
Cr	2 a 5
Pb	2 a 10
Hg	0,02 a 0,05
Se	1
Ag	0,1 a 0,2
SO ₄	NA

Observação: NA = Não avaliado

Apesar de conter o sulfato de cálcio como constituinte principal, este que também é o principal composto do gesso, o fosfogesso não pode ser usado em muitas aplicações como um substituto do gesso natural, sem antes passar por um processo de purificação. Kouloheris (1980) cita que existem numerosos processos patenteados de limpeza para o fosfogesso, permitindo o seu uso em algumas substituições ao gesso e em indústrias cimenteiras.

No processo úmido, particularmente, a definição da composição química do fosfogesso está relacionada aos processos de reação química entre suas matérias-primas e do grau de filtragem usado na separação entre o ácido fosfórico e o fosfogesso (Oliveira, 2005). Na Tabela 2.3 é apresentado um comparativo das análises químicas realizadas para os fosfogessos oriundos das rochas sedimentares americanas formados através de diferentes processos.

Tabela 2.3 - Análises químicas do fosfogesso originado através de diferentes processos (Kouloheris, 1980)

Composição (%)	Fosfogesso di-hidratado (DH)	Fosfogesso hemi-hidratado (HH)	Fosfogesso hemi-dihidratado (HDH)
CaO	32,50	36,90	32,20
SO ₃	44,00	50,30	46,50
P ₂ O ₅	0,65	1,50	0,25
F	1,20	0,80	0,50
SiO ₂	0,50	0,70	0,40
Fe ₂ O ₃	0,10	0,10	0,05
Al ₂ O ₃	0,10	0,30	0,30
MgO	0,10	-	-
H ₂ O cristalizada	19,00 (aproxim.)	9,00 (aproxim.)	20,00 (aproxim.)

Pode-se verificar que além dos metais pesados citados anteriormente, no fosfogesso estão presentes os seguintes compostos químicos: sílica (SiO_2), os óxidos de ferro (Fe_2O_3), de alumínio (Al_2O_3) e de magnésio (MgO).

No Brasil, Freitas (1992) apresentou as características químicas do fosfogesso di-hidratado coletado na Indústria de Fertilizante Fosfótil localizada no estado de Minas Gerais, na Indústria Carboquímica Catarinense (ICC) presente no estado de Santa Catarina, na empresa Ultrafótil no estado de Goiás e no estado norte-americano da Flórida (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Análise química do fosfogesso di-hidratado de diferentes origens (Freitas, 1992)

Componente	Teor (%)			
	Tapira (Fosfótil)	Araxá (ICC)	Catalão (Ultrafótil)	Flórida
CaO	31,96	30,28	31,71	32,50
SO ₃	44,00	40,50	44,89	44,00
P ₂ O ₅	0,78	1,26	0,56	0,65
Fe ₂ O ₃	0,17	0,59	0,35	0,10
Al ₂ O ₃	0,04	0,17	0,12	0,10
SiO ₂	1,58	0,34	0,92	0,50
TiO ₂	0,13	0,08	0,38	-
BaO	-	-	0,10	-
K ₂ O	0,03	-	-	-
MgO	-	0,09	0,01	0,10
Na ₂ O	0,05	-	0,06	-
F	0,26	0,58	0,57	1,20

Comparando os resultados das análises químicas apresentadas nas duas tabelas anteriores, pode-se observar que as composições do fosfogesso variam de acordo com os processos de geração bem como com as diferentes rochas fosfáticas utilizadas no processo de formação do ácido fosfórico.

Mesquita (2007) realizou ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos no fosfogesso conforme as normas técnicas NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004 respectivamente. O fosfogesso apresentou concentrações de chumbo, cobre e cromo total maior do que o permitido pela NBR 10004/2004. Entretanto, tais concentrações estavam com valores bem próximos e até abaixo dos mesmos encontrados para o solo estudado. Com base nas análises o fosfogesso foi classificado como material Classe II A – Não perigoso e não inerte.

Gadalla *et al.* (1990) citado por Silvestre (2002) realizaram uma série de análises químicas em diversos depósitos de fosfogesso e chegaram a conclusão que os depósitos mais antigos

abrigavam um fosfogesso menos ácido. Tal fato pode ser explicado pelos processos naturais do intemperismo, pois ao longo do tempo vão sendo eliminados por meio da lixiviação os ácidos fosfórico e sulfúrico, as impurezas solúveis em água, as substâncias voláteis e os metais pesados.

As rochas nacionais, usadas nas fábricas brasileiras de ácido fosfórico, geralmente apresentam teores de metais pesados, fluoretos, radioatividade e outras impurezas menores do que as rochas de outros países. As análises de fosfogesso indicaram teores abaixo dos limites permitidos para o uso agrícola (Freitas, 1992).

Em relação ao pH, segundo Ghafoori & Chang (1993), no estado americano da Flórida o fosfogesso é ácido, algo da ordem de 3,0 a 5,5, podendo ser altamente corrosivo não somente para os metais, mas também para as estruturas de concreto. Os valores de pH dos fosfogessos brasileiros estudados por Rabelo *et al.* (2001) e Parreira *et al.* (2003) variam de 6 a 4,25 respectivamente.

2.3.5 CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DO FOSFOGESSO

É verificado que há uma série de conceitos por trás das unidades que quantificam a radiação. Com relação às unidades radiológicas Bruckmann & Fries (2002) mostram que estas podem ser divididas em dois grupos:

Grupo 1: Tratam da caracterização da fonte radioativa quantificando sua taxa de radiação. Encontra-se neste grupo a unidade de “Atividade” (A) que estabelece a razão da variação do número de eventos ionizantes na unidade de tempo e que é dada em: Bequerel (Bq) - unidade SI, sendo $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegração/segundo}$.

Grupo 2: Tratam dos efeitos produzidos pela radiação (ionização e/ou dano) no meio onde ela incide. Encontram-se neste grupo as unidades de:

- a) energia (eV), onde $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (J = Joule);
- b) exposição (R), dada em Roentgen (R) ou (r);
- c) dose absorvida, que é a grandeza medida pelo quociente da energia transferida pela radiação ionizante (fótons e/ou partículas) em um elemento de volume pela matéria contida neste volume e que é dada em: Gray (Gy) - unidade SI; e

d) equivalente de dose, que é a quantidade de qualquer radiação que, absorvida pelo homem, produz o mesmo efeito que a absorção de 1 R de raios X ou radiação gama e que é dada em: Sievert (Sv) - unidade SI.

Hull & Burnett (1996) descrevem que a rocha fosfática apresenta concentrações de radionuclídeos que, de um modo geral, já chegaram ao equilíbrio com o passar dos anos. Porém, com a utilização do processo úmido para produção de ácido fosfórico, estes elementos são reativados durante a reação com ácido sulfúrico, onde parte é depositada no fosfogesso obtido. Além disso, segundo UNSCEAR (2008), Villaverde (2008) e Fernandes *et al.* (2009), a rocha fosfática e o fosfogesso apresentam radionuclídeos das séries naturais do urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e seus produtos de decaimento, como o rádio (^{226}Ra), potássio (^{40}K) sendo este um isótopo estável, entre outros.

Ainda segundo Hull & Burnett (1996), os radionuclídeos contidos no fosfogesso se apresentam em proporções diferentes dos contidos na rocha fosfática do qual este se originou. Dependendo da concentração do H_3PO_4 estas diferentes proporções podem ser passivas de variações, conforme os dados de Fernandes *et al.* (2009) apresentados na Figura 2.7.

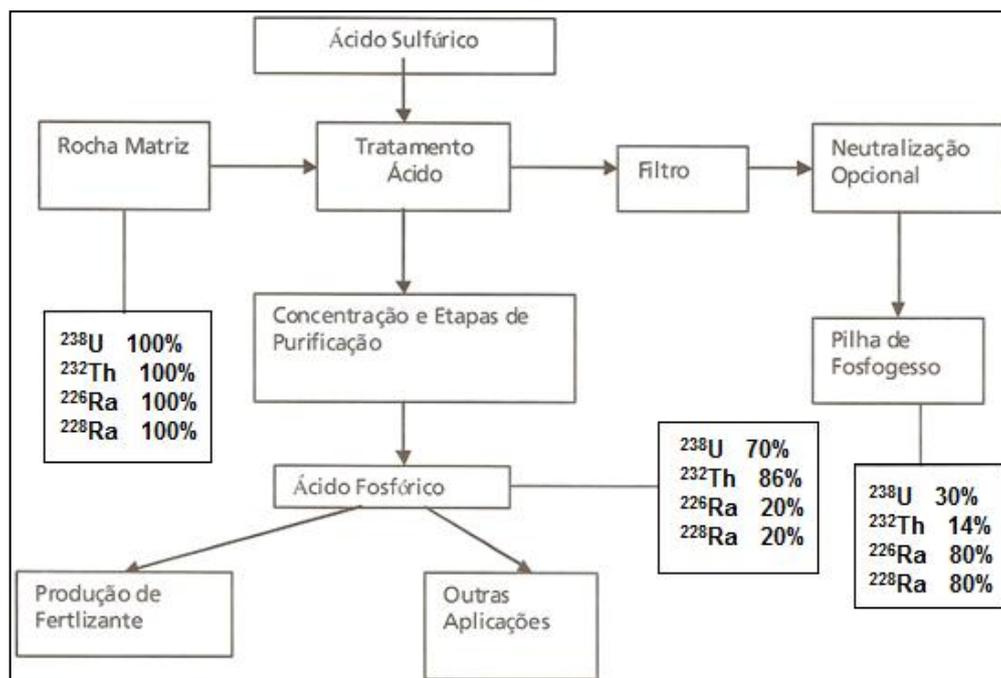


Figura 2.7 - Percentuais de radionuclídeos contidos em diferentes etapas na indústria de fertilizantes (modificado - Fernandes *et al.*, 2009).

Segundo Saueia (2006) o *International Commission on Radiological Protection* – ICRP estabelece uma diferenciação entre a radiação natural normal (NORM – *Naturally Occurring*

Radioactive Material) e a radiação natural tecnologicamente aumentada (TENORM – *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*). Para este autor a indústria de fosfatos torna-se uma fonte potencial para o aumento de dose devido a radiação tecnologicamente aumentada (TENORM), pelas suas atividades industriais que podem causar a liberação de efluentes contendo material radioativo, seja na produção de ácido fosfórico como pelo uso do fosfogesso.

De acordo com a UNSCEAR (2008) o minério proveniente da rocha fosfática de origem sedimentar possui uma maior concentração do nuclídeo da família do urânio, diferentemente da rocha de origem magmática que possui menor concentração deste nuclídeo e maior concentração do nuclídeo da família do tório, mas em menor atividade total do que os minerais sedimentares.

A Tabela 2.5 corrobora com as informações descritas anteriormente, pois os EUA apresentam uma elevada concentração de nuclídeos da família do urânio, já que a sua rocha fosfática é em sua grande maioria de origem sedimentar, ao contrário da África do Sul que possui rocha de origem ígnea.

Tabela 2.5 - Concentrações de radionuclídeos no fosfogesso [Bq.kg^{-1}] (modificado - Fernandes *et al.*, 2009)

País	^{226}Ra	^{238}U	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th
EUA	270 a 1358	22 a 451	348 a 1853	355 a 1765	11
Europa	15 a 1700	500	1300	900	10
África do Sul	45 a 48	64 a 73	76 a 132	-	205 a 284
Austrália	280 a 350	10 a 24	320 a 440	150 a 360	4 a 7

Mesquita (2007) realizou leituras da taxa de exposição em diferentes pontos da pilha de fosfogesso de Catalão - GO e depois realizou a mesma medida em misturas solo-fosfogesso. Como resultado, foi encontrado valor de 0,09 mR/h nas pilhas de fosfogesso, valor este classificado como dentro das normas de segurança estabelecidas. Nas misturas foram encontrados valores nulos, mostrando baixa emanção de radiação dos materiais.

Metogo (2010) também estudou o fosfogesso da região de Catalão e aplicou-o misturado com solo e cal como material de sub-base rodoviária. Foi verificado que a radiação emitida por misturas com 20% (0,08 a 0,13 $\mu\text{Sv/h}$) e 11% (0,06 a 0,09 $\mu\text{Sv/h}$) de fosfogesso ficaram levemente acima dos valores medidos nos trechos sem o uso do resíduo fosfogesso (0,04 a

0,08 $\mu\text{Sv/h}$) , chegando-se a conclusão que as taxas de doses não é suficiente para exceder a dose anual permitida para a população (5 mSv/h), a qual é descrita pela norma de Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica da CNEN (2005).

2.3.6 GERAÇÃO DO FOSFOGESSO, DISPOSIÇÃO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

A maior região produtora de fertilizantes fosfatados no mundo está localizada no estado da Flórida, nos EUA. Desta forma, esta região é responsável pela geração de enormes quantidades de fosfogesso. Hull & Burnett (1996) relatam que esta região está prestes a abrigar uma quantidade recorde de fosfogesso, algo em torno de 10^9 toneladas, distribuídos em 18 locais específicos para a disposição.

Na região da Romênia se encontram estocados cerca de três milhões de m^3 de fosfogesso em uma área de 40 ha (Komnitsas *et al.*, 1999). Assim como na Romênia, no restante da Europa enormes áreas são destinadas à deposição do fosfogesso, pois, segundo Dueñas *et al.* (2010) somente no sudoeste da Espanha, na cidade de Huelva, cerca de 1200 hectares (ha) são utilizados, decorrentes de 40 anos de exploração.

No Brasil a empresa Fosfértil, uma das principais produtoras de fertilizantes localizada em Uberaba – MG, produz dois milhões de toneladas de fosfogesso por ano, possuindo 25 milhões de toneladas de fosfogesso estocado em sua área de disposição (Parreira *et al.*, 2003). Segundo Lapido-Loureiro & Nascimento (2009) até o ano de 1991, o país possuía acumulado 29 milhões de toneladas de fosfogesso, sendo estimado que nos dias atuais esse valor deva ultrapassar a quantia de 70 milhões de toneladas.

O resíduo fosfogesso pode ser descartado de três diferentes formas, sendo estas ditadas por aspectos econômicos, hidrogeológicos, questões ambientais e condições climáticas. Wissa & Fuleihan (1980) e Freitas (1992) descrevem métodos de descarte, os quais serão descritos a seguir:

- bombeamento para rios e oceanos;
- formação de pilhas a úmido; e
- formação de pilhas a seco.

O bombeamento para rios e oceanos, segundo Lloyd Jr (1985) e Freitas (1992) não é uma prática muito comum, mas pode ser uma alternativa técnica e economicamente vantajosa. Porém, exigências do tratamento dos efluentes por parte dos órgãos de controle ambiental podem contribuir para a elevação do custo, além do mais, esta prática vem a contribuir para o assoreamento e mudança da qualidade das águas.

Segundo Bartl & Albuquerque (1992), a deposição a úmido (Figura 2.8) é o descarte do fosfogeno com a água residual na forma de polpa, com um teor de sólidos variando de 5 a 20%, através de bombeamento para lagoas de sedimentação, onde ele é decantado, e depois de seco é acumulado em pilhas.



Figura 2.8 - Disposição do fosfogeno pela deposição a úmido (Canut, 1996).

Na segunda forma, denominada de deposição a seco (Figura 2.9), o fosfogeno é descartado na forma de torta, sendo transportado por correias ou caminhões para a área de deposição final, onde é acumulado em pilhas.



Figura 2.9 - Formação de pilhas de fosfogeno di-hidratado pela deposição a seco.

Desta forma sérios problemas ambientais podem ser gerados a partir deste armazenamento, como por exemplo: necessidade de grandes áreas para este ser estocado ou depositado em lagoas de sedimentação, contaminação de corpos d'água e águas subterrâneas e poluição visual produzida pela formação de enormes áreas degradadas.

Além disso, o processo de lixiviação gera uma água altamente ácida que pode conter níveis elevados de contaminantes diversos, como o flúor e o fósforo (Wissa & Fuleihan, 1980).

Atualmente nos Estados Unidos é desenvolvido com ajuda financeira do *Florida Institute of Phosphate Research* (FIPR) um amplo programa de estudos para o uso benéfico do fosfogesso com foco no desenvolvimento sustentável, conservação dos recursos e aplicabilidade dos resíduos.

2.3.7 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO

A necessidade de áreas cada vez maiores para a estocagem e as pilhas geradas devido ao descarte do fosfogesso levaram, a partir das três últimas décadas, ao início de vários estudos sobre as possíveis aplicabilidades deste resíduo.

No Brasil, como não há nenhuma especificação técnica sobre as diversas formas de utilização do fosfogesso, tornam-se necessários estudos nas mais variadas áreas de aplicação, de modo a se conhecer melhor o resíduo e aplicá-lo sem prejudicar o meio ambiente e a saúde humana.

Segundo Freitas (1992), existem várias áreas para aplicação do fosfogesso, dentre as principais estão: a agricultura, a indústria do cimento, construção civil e a área geotécnica, que é objeto de estudo deste trabalho.

2.3.7.1 APLICAÇÃO NA AGRICULTURA

Lapido-Loureiro & Nascimento (2009) referem-se ao fosfogesso como um material que possui as propriedades de fertilizante e corretivo de solos, possuindo um maior potencial de consumo na prática da agricultura e pecuária (formação de pastagens). Segundo estes autores o fosfogesso contém cerca de 15 a 16% de enxofre e 19 a 27% de cálcio na forma de sulfato de cálcio. A água da chuva ou de irrigação infiltrando-se no solo transporta estes elementos até as camadas mais profundas favorecendo uma absorção eficiente dos nutrientes, crescimento das raízes e redução da saturação de alumínio, permitindo assim ganhos de produção.

Malavolta (1992) cita que são vários os usos do fosfogesso na prática agrícola, dentre eles:

- fonte de Ca e S;
- melhorador do ambiente radicular (diminuição da toxidez do alumínio);
- correção de solos sódicos; e
- redução nas perdas de nitrogênio na fermentação do esterco.

Mishra (1980) utilizou fosfogesso na recuperação de solos salinizados, pois um terço das áreas irrigadas do mundo é atingida por salinidade, afetando negativamente a produção agrícola e restringindo o aproveitamento econômico de solos das regiões áridas e semi-áridas tropicais. Os solos salinos da região estudada possuem pH alto, alto teor de sódio trocável e em alguns casos alta condutividade elétrica. A diminuição do pH com a aplicação do fosfogesso aumenta a solubilidade do carbonato de cálcio do solo, o que resulta na substituição do sódio trocável, melhorando assim a fertilidade do solo

Costa Silva (1997) citado por Fernandes *et al.* (2009) investigou o uso do fosfogesso como insumo agrícola no Brasil e verificou que não haveria restrição do ponto de vista radiológico, do uso de fosfogesso na agricultura.

2.3.7.2 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA

Bartl & Albuquerque (1992) descrevem que grande parte do enxofre utilizado na produção do ácido fosfórico fica retido no fosfogesso. Segundo este autor, para cada 6 toneladas de resíduo, estão presentes uma tonelada de enxofre recuperável, fato que pode se tornar atrativo, principalmente nos países carentes de reservas naturais desta matéria prima.

Sfar Felfoul *et al.* (2002) descrevem que o fosfogesso pode ser utilizado na indústria cimenteira como agente retardador do tempo de pega, substituindo o gesso comum, uma vez que, segundo Petrucci (1987), o gesso comum também é constituído basicamente de sulfato de cálcio geralmente acrescido de uma certa quantidade de impurezas, como SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e carbonatos de cálcio e de magnésio.

2.3.7.3 APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Erlenstadt (1980) o processamento do fosfogesso por calcinação em materiais de construção contendo gesso é um tipo bem susceptível de utilização. No entanto, as impurezas contidas no fosfogesso (fluoretos e componentes orgânicos, compostos de alumínio e sais

solúveis) apresentam-se como um problema, pois podem afetar a qualidade do material construído com gesso, mesmo que suas proporções sejam baixas. Os vários fosfatos afetam a qualidade do gesso, principalmente no comportamento do fosfogesso calcinado.

Para Canut (2006), entender e conhecer a microestrutura do fosfogesso, bem como de produtos derivados, é importante chave para a compreensão das propriedades físicas, químicas e mecânicas na produção de materiais. Este autor estudou a viabilidade técnica e econômica da fabricação de materiais de construção civil a partir da substituição total e parcial do gesso natural. Para a caracterização dos materiais empregados (fosfogesso di-hidratado e misturas de fosfogesso e gesso natural), foram realizadas análises térmicas, granulometria, adsorção física, porosimetria de mercúrio, ensaios de dureza e compressão axial, entre outros. Como conclusão, foi verificada a possibilidade de utilização do fosfogesso na fabricação de blocos de alvenaria, divisórias, painéis acartonados, rebaixo de tetos etc.

Rabelo (2001) avaliou a influência da adição de fosfogesso ao cimento na fabricação de concretos. Diversas relações água/cimento e percentuais de adição de fosfogesso ao cimento foram analisadas. Foi observado que com o aumento do percentual de fosfogesso adicionado, a resistência a compressão simples do concreto foi reduzida significativamente, fato que já era esperado, pois parte da água responsável pela hidratação do cimento é absorvida pelo fosfogesso. Também se observou que a resistência dos corpos de prova com fosfogesso ficaram entre 30% a 50% da resistência dos corpos de prova sem fosfogesso. Apesar da diminuição da resistência do concreto a adição de fosfogesso ao cimento na fabricação de concreto é viável, porém devem-se ter mais estudos sobre esta mistura.

Sfar Felfoul (2002) relata que o fosfogesso pode ser utilizado para a fabricação por prensagem de blocos de construção, porém deve-se evitar o contato destes com a água em estruturas que estão na parte exterior.

2.3.7.4 FOSFOGESSO EM GEOTECNIA

Alguns autores como Gutti *et al.* (1996), Kobayashi (2000), Parente (2002) e Silvestre (2002) estudaram a influência da adição de cimento no fosfogesso, com o objetivo de avaliar a expansibilidade e as propriedades mecânicas da mistura. Basicamente os estudos mostraram que há pouca influência da energia de compactação na expansibilidade das misturas e que a imersão em água dos corpos de prova provocou quedas na resistência mecânica em

comparação com os não imersos. Foi verificado também que misturas de fosfogesso e cimento podem ser utilizadas na construção de bases rodoviárias.

Trichês & Maccarini (1988) realizaram um estudo preliminar de viabilidade do uso em camadas de sub-base e base de rodovias das misturas de fosfogesso e cinzas volantes. Foi avaliada a resistência à tração de corpos de prova compactados com esta mistura, obtendo-se elevadas resistências para misturas a seco, ou seja, sem imersão em água. Foi notado que a imersão provoca logo nos primeiros dias uma queda de resistência a tração da ordem de 60%, com estabilização após este período. Esta queda de resistência é explicada pelo efeito desagregador que foi notado quando os corpos de prova foram imersos em água. Esta desagregação foi eliminada quando confinada por uma camada de solo.

Ortiz (1997) analisou o comportamento em termos de resistência à compressão simples de misturas solo e fosfogesso anidro com tempo de cura de 3, 7, 28 e 84 dias. O fosfogesso utilizado em seu trabalho era do tipo di-hidratado, porém, como corpos de prova compactados com este não apresentaram estabilidade frente à ação da água, o fosfogesso foi submetido a uma temperatura de 130°C, sendo transformado para condições anidras. Misturas de solo argiloso com fosfogesso em diferentes percentuais foram compactadas, acarretando em uma diminuição da massa específica seca máxima à medida que o percentual de fosfogesso era aumentado, conforme pode ser visto na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Massa específica seca máxima e teor de umidade ótima em corpos de prova compactados (Ortiz, 1997)

TEOR DE FOSFOGESSO ANIDRO (%)	MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA (g/cm ³)	TEOR DE UMIDADE ÓTIMO (%)
0	1,635	25,50
20	1,610	26,10
40	1,545	26,00
60	1,470	24,80
80	1,385	26,00
100	1,350	27,00

Ainda segundo esse autor, as misturas solo-fosfogesso obtiveram resultados satisfatórios quando comparadas com o comportamento de algumas misturas estabilizadas de uso corrente, como solo-cal e solo-cimento. A adição de quantidades crescentes de fosfogesso anidro ao

solo conduz a um ganho significativo de resistência. No entanto, a imersão em água produz decréscimo na resistência quando comparadas às amostras ensaiadas sem imersão. Para misturas com 60% e 20% de fosfogesso e sem imersão o tempo de cura teve efeito no ganho de resistência até os primeiros sete dias, sendo que após este período houve estabilização e até uma ligeira diminuição da resistência.

Uma área que possui um grande potencial para destinação final do fosfogesso é a pavimentação rodoviária e urbana. Grandes volumes de fosfogesso poderiam ser utilizados como material de construção de bases e sub-bases de pavimentos, surgindo daí a necessidade de se avaliar a sua resistência, deformabilidade e o seu comportamento expansivo. Diversos estudos têm sido desenvolvidos neste sentido, sendo que a maior parte das pesquisas têm sido conduzidas pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) na França, pelo IRM (*Institute for Recyclable Materials*) e pelo FIRP (*Florida Institute of Phosphate Research*), ambos localizados nos Estados Unidos (Kobayashi, 2000).

Com o objetivo de utilizar materiais alternativos para fins de pavimentação, Faria (2007), Mesquita (2007), Rufo (2009) e Metogo (2010) realizaram estudos laboratoriais com misturas contendo solo tropical fino do estado de Goiás, cal e fosfogesso di-hidratado produzido no município de Catalão – GO em misturas com diferentes percentuais.

Mesquita (2007) realizou ensaios de caracterização, CBR, triaxial dinâmico e ensaios ambientais (lixiviação e solubilização) de misturas compactadas de solo e fosfogesso nos percentuais de 20%, 50% e 80% de resíduo. Assim como mencionado por Ortiz (1997), Parreira *et al.* (2003), Degirmenci *et al.* (2007) entre outros, não foi possível a execução dos limites de Atterberg para o fosfogesso, classificando-o como material não plástico. Com relação à capacidade de suporte, embora o fosfogesso compactado tenha tido um péssimo resultado, a mistura composta por 20% de fosfogesso apresentou um ganho significativo em relação ao valor encontrado para o solo, apresentando viabilidade de uso em reforços de subleito, sub-bases e até bases rodoviárias.

Rufo (2009) verificou a influência que a adição de certas misturas (fosfogesso, cal e fosfogesso-cal) em dois solos diferentes provoca na resistência mecânica e na expansão. Esta autora observou que em um dos solos estabilizado com fosfogesso e cal houve a formação do mineral etringita que foi responsável pela elevada plasticidade e expansão do material, o que inviabilizaria a sua utilização em camadas de pavimento. Nas misturas de solo e fosfogesso,

foi observado que as características apresentadas viabilizam as misturas para serem utilizadas em pavimentação. Adicionalmente foi verificado que o risco de ocorrer contaminação do subsolo ou do lençol freático em obras rodoviárias com misturas de solo-fosfogesso é mínimo.

De modo a avaliar melhor o comportamento da mistura solo-fosfogesso, Metogo (2010) construiu uma pista experimental com um subtrecho executado com a mistura composta por 80% solo + 20% fosfogesso, compactados na energia Proctor Intermediária. Adicionalmente o autor realizou ensaios de laboratório e de campo visando avaliar as propriedades mecânicas da mistura. De modo semelhante ao encontrado por Mesquita (2007) houve melhora na capacidade de suporte quando o solo foi estabilizado com fosfogesso, acarretando em leve expansão da ordem de 0,30%.

Vale destacar o efeito da estabilização química na mistura, a qual proporcionou um aumento de 261% no valor de resistência à compressão simples em amostra com 49 dias de cura quando comparado ao resultado obtido sem cura.

Degirmenci *et al.* (2007), visando melhorar as propriedades mecânicas de dois solos, utilizaram misturas de fosfogesso, cinzas volantes e cimento e executaram ensaios para determinação dos limites de Atterberg, compactação e compressão não confinada. Em comparação aos dois solos estudados, algumas misturas apresentaram uma diminuição do índice de plasticidade e aumento do peso específico seco máximo devido à adição de fosfogesso. A resistência á compressão dos corpos de prova não estabilizados foram menores do que os estabilizados.

Com o objetivo de investigar as propriedades do fosfogesso produzido na Florida, Ghafoori & Chang (1993) realizaram ensaios de compressão triaxial em corpos de prova compactados na umidade ótima. Foram utilizadas pressões de confinamento de 68,9 kPa, 137,8 kPa e 206,7 kPa, resultando em um valor nulo de coesão e ângulo de atrito igual a 49°.

2.4 SOLOS TROPICAIS

Villibor & Nogami (2009) descrevem que as condições climáticas predominantes e os solos mais frequentes encontrados no Brasil, podem ser englobados, genericamente, como do tipo “tropical úmido”. De acordo com o *Committee on Tropical Soils of ISSMFE* (1985) citado por Nogami & Villibor (1995) os processos geológicos e ou pedológicos típicos das regiões de

clima quente e regime de chuvas moderada ou intensas são responsáveis pelas propriedades e comportamento de uma determinada classe de solos, definida como solos tropicais.

Solos tropicais são aqueles que apresentam propriedades geotécnicas particulares diferentes daquelas características dos solos de regiões temperadas. Segundo Nogami & Villibor (1995) um determinado solo para que seja considerado como tropical não basta necessariamente ter sido formado entre os trópicos ou em regiões de clima tropical úmido, mas é indispensável que este apresente peculiaridades de interesse geotécnico.

De acordo com Vargas (1985), os solos tropicais apresentam duas porções com comportamentos geotécnicos distintos: A porção superficial com intensa evolução pedogenética e estágio avançado de laterização, constituindo-se no solo laterítico e a porção profunda que apresenta estruturas reliquias da rocha e se constitui no solo saprolítico.

O Brasil por ser um país de clima tropical úmido, caracterizado por altas temperaturas médias anuais, geralmente superiores a 20°C, e elevada pluviosidade, apresenta a sua cobertura formada essencialmente por solos tropicais. Apresenta-se na Figura 2.10, as principais áreas de ocorrência dos solos lateríticos e saprolíticos no território brasileiro, segundo Villibor *et al.* (2000).

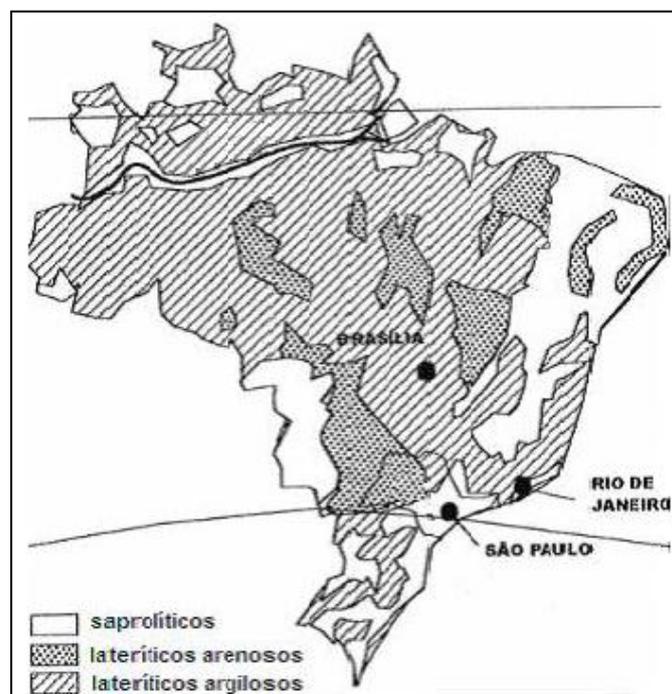


Figura 2.10 - Mapa das principais áreas de ocorrência dos solos lateríticos no território brasileiro (Villibor *et al.*, 2000).

Solo laterítico é definido pelo Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMFE) como aquele que pertence aos horizontes A (camada mineral com enriquecimento de matéria orgânica) e B (apresenta máxima expressão de cor, estrutura e/ou que possuem materiais translocados), de perfis bem drenados, desenvolvido sob atuação de clima tropical úmido. De acordo com Nogami *et al.* (1985) citados por Marangon (2004), os solos lateríticos possuem sua fração argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio o que confere à estrutura poros e agregações altamente estáveis.

A Figura 2.11 mostra um perfil de solo em corte onde é possível identificar com clareza a distinção entre os horizontes A, B (lateríticos) e C (saprólítico), sendo os dois primeiros pouco espessos.



Figura 2.11 - Perfil de solo com evidente distinção entre os horizontes A, B (laterítico) e C (saprólítico) (Marangon, 2004).

Por outro lado o solo saprólítico corresponde a camada mais profunda do perfil de solo tropical, apresentando predominância de argilominerais diferentes dos encontrados nos solos lateríticos, como a ilita e a montmorilonita, e minerais primário principalmente na zona menos intemperizada (Camapum de Carvalho, 2009). Ainda segundo este mesmo autor, no saprólito é praticamente inexistente a presença de matéria orgânica e os argilominerais não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Do ponto de vista da pavimentação, segundo Villibor e Nogami (2009) os solos lateríticos são os tipos mais importantes dentre os solos tropicais em camadas de sub-base de pavimentos. Estes solos têm tendência a possuírem uma grande parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro e em alguns locais podem apresentar, inseridos em sua constituição, pedregulhos lateríticos denominados de laterita, que são massas consolidadas, maciças ou porosas, de mesma mineralogia dos solos lateríticos (Marangon, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrita a visita técnica ocorrida na indústria fornecedora do resíduo utilizado nesta pesquisa, o procedimento de coleta dos materiais empregados e os métodos utilizados na execução dos ensaios de laboratório.

3.1 VISITA TÉCNICA

De modo a acompanhar todo o processo de formação e deposição do resíduo em estudo, foi realizada no período de 17 a 19 de agosto de 2010 uma visita técnica à empresa Anglo American – Copebrás, responsável pela mineração da rocha fosfática e produção de fertilizantes. A unidade responsável pela fabricação de fertilizantes fosfatados está localizada no município de Catalão – GO. As reservas de rochas fosfáticas estão localizadas no município vizinho de Ouidor, também no Estado de Goiás, de onde esta é extraída e beneficiada, sendo transportada por 8 km através de mineroduto para a unidade de processamento em Catalão.

Durante o período de visita, todos os procedimentos da empresa, desde a extração da rocha até a deposição final do resíduo fosfático em pilhas de estocagem foram conhecidos. Adicionalmente foi possível verificar os dados de produção anuais e as políticas adotadas pela empresa com relação à administração dos depósitos de fosfático.

Atualmente, a Anglo American – Copebrás é uma das maiores fabricantes de fertilizantes fosfatados do Brasil, sendo que somente a unidade de Catalão possui uma capacidade de produção anual de 150 mil toneladas de ácido fosfórico, quantidade que acarreta na geração de 680 mil toneladas de fosfático. A indústria possui três unidades de operação, sendo a mina e a unidade de beneficiamento situadas em Ouidor, e duas unidades de processamento situadas em Catalão e Cubatão – SP. Esta última unidade utiliza a mesma rocha extraída de Ouidor, que é transportada através de vagões ferroviários.

Na unidade de Catalão, o H_3PO_4 é obtido através da rota sulfúrica por via úmida, gerando o resíduo fosfático na sua forma di-hidratada. Após a filtração, a formação das pilhas de fosfático é a seco. O resíduo é movimentado através de correias transportadoras até caminhões, que o levam para as pilhas de estocagem a céu aberto. A administração dos depósitos de fosfático está a cargo de uma empresa terceirizada, responsável pela formação das pilhas e seus monitoramentos.

3.2 COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 FOSFOGESSO

A coleta do fosfogesso utilizado nesta pesquisa foi realizada na unidade industrial de Catalão no último dia da visita técnica. Esta foi feita nas pilhas de estocagem controladas por uma empresa terceirizada. O fosfogesso estudado é do tipo di-hidratado com deposição a seco.

Foram coletados cerca de 700 kg de resíduo (Figura 3.1), o qual apresentava um teor de umidade natural de aproximadamente 12%. Após a coleta o material foi encaminhado até o Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da UFG onde foi deixado cerca de 200 kg e, posteriormente, o restante foi levado para o Laboratório de Geotecnia da UnB.



Figura 3.1 - Coleta do fosfogesso.

Em ambos os laboratórios, o material foi colocado em sacos de 50 kg, etiquetado e armazenado em local apropriado. De acordo com a NBR6457/1986 (Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização), o material foi quarteado de modo a se obter quantidades representativas para a execução dos ensaios e colocado em bandejas para secar ao ar. Durante o período de secagem, partes do fosfogesso sempre eram revolvidas no intuito de obter um material homogêneo com relação à umidade higroscópica.

3.2.2 SOLO

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado em 10 de abril do ano de 2010 na mesma jazida utilizada por Metogo (2010) em Aparecida de Goiânia - GO. A escolha desse solo é devido à construção de uma pista experimental executada com solo e fosfogesso nesta região. Para maior representatividade do solo local foram utilizados dois pontos de coleta com 300 kg de solo cada um, separados 80 m entre si. Dias antes da coleta, para abertura de nova estrada no local, foi utilizada uma máquina moto niveladora que retirou toda a cobertura vegetal presente na superfície. O solo foi coletado a uma profundidade de 0,8 m a 1,2 m da superfície do terreno no horizonte residual laterítico. Amostras do solo coletado foram colocadas em sacos plásticos para posterior determinação do teor de umidade natural, o qual se situou em torno de 25%.

O solo coletado foi denominado Solo Aparecida de Goiânia, sendo este acondicionado em sacos plásticos de 50 kg. Parte do solo foi deixada no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da UFG e o restante do solo foi encaminhado para o Laboratório de Geotecnia da UnB. Em ambos os laboratórios, o solo dos dois pontos foi misturado entre si em iguais proporções, sendo em seguida quarteado com o auxílio do repartidor de amostras conforme é mostrado na Figura 3.2. De modo semelhante ao utilizado pelo fosfogesso o solo foi colocado em bandejas para secar ao ar, destorroado, e acondicionado em sacos plásticos de 25 kg.



Figura 3.2 - Quarteamento do solo presente nos dois pontos de coleta.

O solo utilizado apresenta coloração avermelhada típica dos solos lateríticos ricos em óxido e hidróxido de ferro e alumínio. Estes sais se encontram, geralmente, recobrindo agregações de partículas argilosas (Pinto, 2002).

3.3 EXECUÇÃO DAS MISTURAS

Nesta etapa do trabalho, procurou-se seguir os procedimentos utilizados por Mesquita (2007), Rufo (2009) e Metogo (2010), uma vez que nesta pesquisa foi utilizado um resíduo de mesma origem que em suas pesquisas.

Mesquita (2007) concluiu que, do ponto de vista mecânico, seria recomendado utilizar um percentual menor que 30% de fosfogesso nas misturas com solos tropicais finos. Como o objetivo desta pesquisa é avaliar não somente as características mecânicas, mas também a influência que a adição do resíduo provoca no solo, neste trabalho foram estudadas misturas com teores variados de fosfogesso. A Tabela 3.1 apresenta as descrições das amostras e as composições em percentagem das misturas solo-fosfogesso. A escolha das proporções entre os valores de fosfogesso e solo são explicadas a seguir.

Tabela 3.1 - Composição das amostras estudadas

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	DESCRIÇÃO
1	100% Solo	Solo Aparecida de Goiânia
2	90% Solo + 10% Fosfogesso	Mistura A
3	80% Solo + 20% Fosfogesso	Mistura B
4	50% Solo + 50% Fosfogesso	Mistura C
5	100% Fosfogesso	Fosfogesso

A Mistura A foi escolhida para se ter uma mistura que tenha grande predominância do comportamento do solo em relação ao comportamento do fosfogesso. A decisão de ensaiar a Mistura B foi porque esta mistura apresentou maiores valores de CBR (*California Bearing Ratios*) e compressão simples nos trabalhos desenvolvidos por Mesquita (2007) e Rufo (2009), mesmo com a utilização de diferentes solos. Além disso, essa mistura foi utilizada na construção da pista experimental avaliada por Metogo (2010). A Mistura C foi escolhida por ser a mais adequada para verificar a influência da adição em grandes proporções do fosfogesso no solo em suas características hidro-mecânicas. Neste caso, o objetivo seria dar destino nobre às maiores quantidades do resíduo.

As quantidades de solo e fosfogesso de cada mistura foram calculadas em relação à massa seca e, de modo a obter misturas homogêneas, essas quantidades de solo e fosfogesso foram misturadas em betoneira por cerca de 10 min. As misturas resultantes foram colocadas em

sacos plásticos e deixadas em repouso por um período de aproximadamente 24 horas, onde era obtida nova umidade higroscópica das amostras.

3.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

São apresentados os procedimentos e técnicas utilizadas na execução dos ensaios de caracterização, compactação, cisalhamento direto, adensamento, permeabilidade, papel filtro, avaliação da inundação dos corpos de prova e demais ensaios complementares, como: obtenção de microfotografias e execução das análises químicas.

Os corpos de prova utilizados na avaliação do comportamento mecânico e hidráulico do solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso se encontravam na umidade ótima e peso específico seco máximo.

3.4.1 TEORES DE UMIDADE DO FOSFOGESSO E MISTURAS

A temperatura da estufa na secagem do fosfogesso é um fator importante na determinação dos teores de umidade, considerando que altas temperaturas provocam a desidratação do fosfogesso di-hidratado, alterando sua estrutura através da evaporação de sua água molecular. Temperaturas maiores que 70°C tendem a gerar o fosfogesso hemi-hidratado e anidro com ½ e nenhuma molécula de água respectivamente.

Desta forma, foi realizada uma avaliação preliminar com amostras de solo, fosfogesso e Mistura C com teores de umidade correspondentes a ótima. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos através do uso de estufas com temperaturas iguais a 110°C, conforme prescreve a NBR 6457/86, e correspondente a 65°C aproximadamente. Observa-se que a diferença de temperatura empregada provocou a desidratação do fosfogesso de Catalão.

Tabela 3.2 - Avaliação dos teores de umidade presentes nas amostras

Material	Temperatura (°C)	Tempo (h)			
		24	48	72	96
Teor de umidade (%)					
Solo	65	22,9	22,9	22,9	23,0
Solo	110	23,5	23,7	23,6	23,8
Mistura C	65	23,3	23,5	23,3	23,3
Mistura C	110	36,6	37,3	37,4	37,5
Fosfogesso	65	21,9	22,4	22,6	23,0
Fosfogesso	110	47,6	48,7	49,2	49,0

Após obtidas as umidades correspondentes às diferentes condições impostas, foi possível constatar que as determinações dos teores de umidade para o fosfogesso e misturas não poderiam ser de acordo com a metodologia presente na NBR6457/86, devido às alterações ocorridas na estrutura do fosfogesso di-hidratado utilizado na presente pesquisa. Para as amostras anteriormente citadas, observa-se que o período mínimo de 48 horas é suficiente para determinação dos teores de umidade. Para o solo se verifica que para as duas temperaturas analisadas os teores de umidades são similares, concluindo-se que não haveria problema em se obter o teor de umidade das misturas em estufa com temperatura igual a 65°C.

Pelo fato da pesquisa ter sido iniciada com determinações dos teores de umidade das amostras em temperaturas iguais a 110°C, foi necessária a obtenção de uma correlação para converter os valores de umidade do fosfogesso e misturas para temperaturas a 65°C. A Figura 3.3 traz essa correlação obtida nos mais variados teores de umidade para todas as amostras, exceto para o solo.

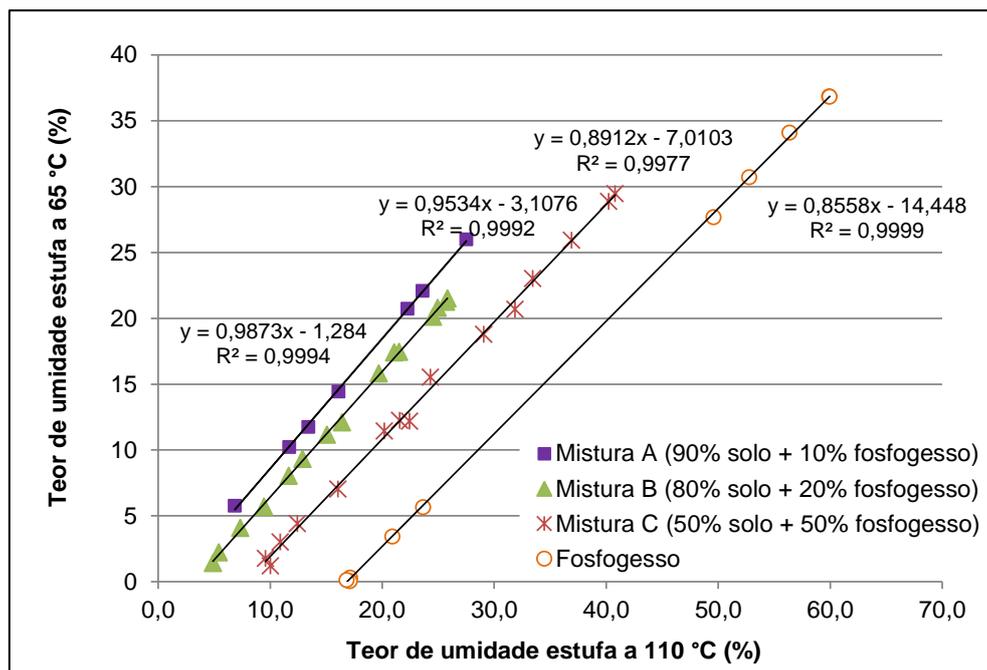


Figura 3.3 - Correlação de umidades para misturas solo-fosfogesso e fosfogesso.

3.4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para a caracterização geotécnica dos materiais, as amostras foram preparadas conforme prescreve a NBR 6457/1986. A seguir, são mencionados os ensaios realizados e as normatizações técnicas utilizadas:

- massa específica dos sólidos (γ_s): NBR 6508/1984 (Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica);
- granulometria: NBR 7181/1984 (Solo – Análise Granulométrica);
- limite de liquidez (w_L): NBR 6459/1984 (Solo – Determinação do Limite de Liquidez), e
- limite de plasticidade (w_P): NBR 7180/1984 (Solo – Determinação do Limite de Plasticidade).

No ensaio de granulometria, em adição ao procedimento prescrito em norma foram realizados ensaios sem o uso de defloculante visando evidenciar os pacotes agregados de argila presentes nos materiais.

Os ensaios de determinação da massa específica dos sólidos e granulometria foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UnB e no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Engenharia Civil da UFG foram determinados os Limites de Atterberg.

3.4.3 CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Com base nos resultados obtidos através da caracterização foram realizadas classificações geotécnicas das amostras conforme o Sistema Unificado e Classificação de Solos (SUCS) e o sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

3.4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A preparação das amostras para a realização dos ensaios de compactação foi realizada de acordo com a NBR 6457/1986 e a compactação seguiu as prescrições da NBR 7182/1986 (Solo – Ensaio de Compactação). As amostras foram compactadas na energia Proctor Intermediária no Laboratório de Engenharia Rodoviária da UnB (LER) e, a partir dos dados de compactação de Mesquita (2007) e Metogo (2010) com esta mesma energia, foi possível obter uma boa estimativa das umidades ótimas.

Após a realização da homogeneização dos materiais umedecidos, os mesmos foram acondicionados em sacos plásticos devidamente fechados e deixados em repouso por um período de 24 horas em local protegido da luz solar.

Com o objetivo da obtenção de corpos de prova mais uniformes, foi utilizado o *Automatic Soil Compactor* que permite a programação da quantidade de golpes, altura de queda do soquete e o controle das rotações do cilindro no processo de compactação (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Uso do aparelho automático de compactação.

Os corpos de prova foram compactados sem reuso do material de modo a não gerar a quebra excessiva dos grãos ou pacotes de argilas.

Após compactados, os corpos de prova eram retirados do compactador automático, rasados com o auxílio da régua biselada e pesados. Em seguida, os mesmos eram extraídos do molde, embalados por filme plástico fino, identificados e guardados em sacos plásticos pequenos fechados por fita adesiva.

Para melhor acondicionamento dos corpos de prova, estes foram colocados em caixas de isopor e mantidos em câmara úmida.

3.4.5 ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

O ensaio de adensamento tem por finalidade determinar para um corpo de prova confinado lateralmente, as deformações verticais resultantes da aplicação de um dado carregamento. Com os resultados é possível determinar propriedades como, coeficiente de adensamento vertical (c_v), tensão de pré-adensamento (σ'_p), entre outros. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB de acordo com a NBR12007/1990 (Solo - Ensaio de adensamento unidimensional).

Os corpos de prova foram moldados usando anéis metálicos indeformáveis possuindo 20 mm de altura e 75 mm de diâmetro que eram cravados nas amostras compactadas na energia Proctor Intermediária, possuindo umidade ótima e peso específico seco máximo. Em seguida, os corpos de prova eram rasados para se retirar uma porção de amostra para determinação do teor de umidade. Logo após obtenção dos corpos de prova, estes foram colocados na célula de

adensamento e levados para a prensa de aplicação de carga para serem saturados. Inicialmente, foi feito um carregamento de 5 kPa (Figura 3.5) e, diante da estabilização das leituras, foi feita a inundação. Para o próximo carregamento foi aguardado a estabilização das leituras e um período mínimo de 24 horas.



Figura 3.5 - Prensas de adensamento utilizadas.

Inicialmente, foram realizados ensaios oedométricos para o solo e Mistura C conforme prescritos em norma, com tempo de adensamento igual a 24 horas para cada estágio de carregamento. No entanto, o intervalo de 24 horas não foi suficiente para a estabilização das leituras de deslocamento vertical, como pode ser verificado na Figura 3.6. Nesta figura é mostrada a ausência de estabilização dos deslocamentos verticais para a Mistura C submetida a 400 kPa de tensão.

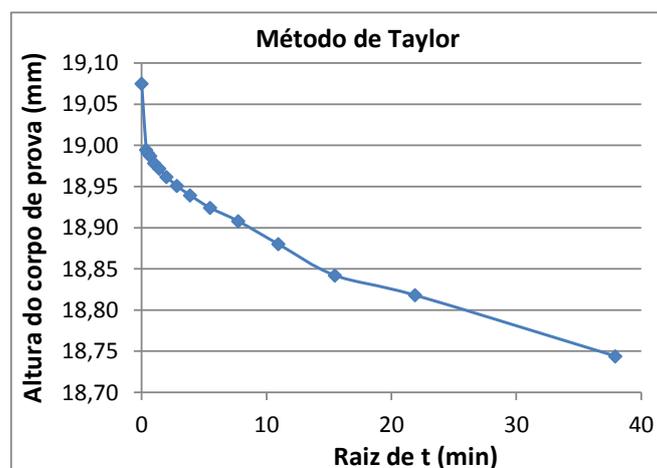


Figura 3.6 - Gráfico de adensamento da Mistura C submetida a 400 kPa de tensão.

Diante do comportamento observado, foi idealizado um acréscimo no tempo de adensamento em que fosse possível a execução dos ensaios. Carregamentos de 13,5 kPa; 32 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa; 800 kPa e 1000 kPa foram realizados sucessivamente para todas as amostras em um intervalo de 48 horas entre um estágio de carregamento e outro. As leituras dos tempos foram realizadas conforme prevê a norma do ensaio, sendo acrescentadas as leituras de 36 e 48 horas. Ao final da aplicação de 1000 kPa foi realizado o descarregamento sucessivo para cada valor de tensão atuante, sendo respeitadas as estabilizações de leituras.

Terminado o ensaio, as células de adensamento foram desmontadas, sendo os anéis secos superficialmente e pesados, bem como os corpos de prova retirados para determinação do teor de umidade após imersão.

3.4.6 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto tem como objetivo determinar a resistência ao cisalhamento do solo, por meio da determinação da coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). A metodologia utilizada para este ensaio foi a preconizada pela norma internacional da ASTM D3080 – 04 “*Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*”, devido à falta de normatizações brasileiras.

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram obtidos por moldes metálicos (Figura 3.7) com 20 mm de altura e 60 mm de lado e área igual a 36 cm², que eram cravados nas amostras compactadas na energia Proctor Intermediária, possuindo umidade ótima e peso específico seco máximo.

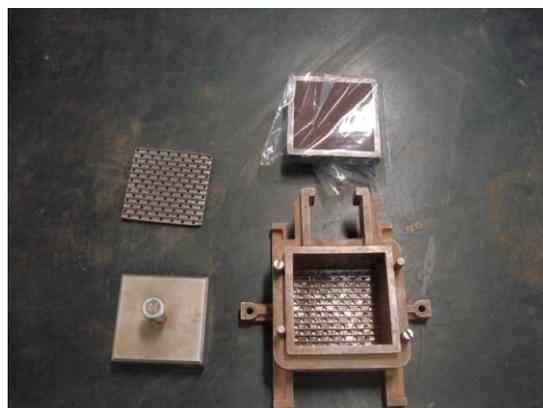


Figura 3.7 - Corpo de prova e caixa de cisalhamento direto utilizados.

Imediatamente após a moldagem dos corpos de prova, estes foram transferidos para a caixa de cisalhamento e levados para a saturação na máquina de cisalhamento direto. Os ensaios foram do tipo consolidado e drenado (CD), utilizando uma velocidade de cisalhamento sem geração de pressões neutras.

De forma a diminuir a interferência dos diferentes equipamentos de cisalhamento direto disponíveis no Laboratório de Geotecnia da UnB, foi utilizado o mesmo equipamento em todos os ensaios realizados. A máquina de cisalhamento utilizada possui todo o seu sistema automatizado, dispondo de dois LVDT's "*Linear Variable Differential Transformer*" que medem deslocamentos horizontais e verticais e uma célula de carga para medição da força de cisalhamento, sendo estas medidas enviadas para um sistema de aquisição de dados integrado a um sistema computacional.

No processo de saturação dos corpos de prova foi aplicada uma pequena carga de 5 kPa e em seguida adicionada água destilada de forma lenta. Após a estabilização dos deslocamentos verticais ou passado um tempo mínimo de 90 minutos, os corpos de prova eram submetidos a um nível de tensão normal que era mantido constante por 12,5 horas, tempo suficiente para a estabilização dos deslocamentos verticais da primeira amostra ensaiada (solo), permitindo assim o início do cisalhamento.

De modo a assegurar um ensaio em condições drenadas, ou seja, sem geração de poropressão, foi adotada uma velocidade lenta de cisalhamento igual a $3,16 \cdot 10^{-7}$ m/s, a qual foi fornecida pelo *software* responsável pelas leituras dos deslocamentos verticais. Em adição a este procedimento, por meio da Equação 3.1 apresentada por Gibson & Henkel (1954) citados por Head (1982), em que se calcula o tempo requerido para a ruptura, foi possível obter a velocidade máxima necessária para que o cisalhamento ocorra sem geração de poropressões.

$$t_f = 12,7 * t_{100} \quad (3.1)$$

onde, t_f é o tempo requerido para ruptura e o t_{100} é o tempo em segundos para que ocorra 100% de adensamento.

Considerando-se um deslocamento relativo entre as partes da caixa de cisalhamento de 8 mm e utilizando os dados de adensamento do solo e da Mistura A, obteve-se uma velocidade máxima corresponde ao t_f de $6,56 \cdot 10^{-7}$ m/s. Portanto, o valor adotado de $3,16 \cdot 10^{-7}$ m/s foi suficiente para garantir um ensaio do tipo drenado. Esta mesma velocidade de cisalhamento

também foi utilizada nas outras amostras. Isto porque elas apresentam coeficientes de permeabilidade maiores que o solo e a Mistura A, como será visto no item 4.4.1 do próximo capítulo.

Para a determinação da envoltória de resistência, os ensaios foram realizados em quatro níveis de tensão normal: 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. A determinação dos quatro pontos da envoltória de resistência para obtenção dos parâmetros de intercepto de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') efetivos foi por meio da análise das tensões cisalhantes máximas e residuais para cada ensaio realizado.

Os ensaios de cisalhamento para a Mistura C e fosfogesso foram executados normalmente, conforme metodologia descrita anteriormente, porém conforme pode ser observado na Figura 3.8 foi avaliado que diante da aplicação das tensões normais, o período de 12,5 horas que estava sendo destinado ao adensamento das amostras saturadas não seria suficiente para a estabilização das leituras de deslocamento vertical. A Figura 3.8 mostra o gráfico do deslocamento vertical em função do tempo para a Mistura C submetida a uma tensão normal de 100 kPa.

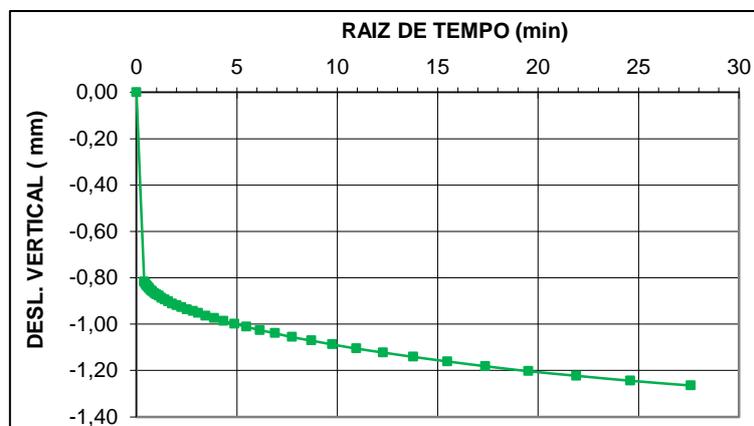


Figura 3.8 - Adensamento da Mistura C no ensaio de cisalhamento direto no tempo de 12,5 horas.

Diante do fato constatado, foi adotada uma sistemática viável para a execução dos ensaios de cisalhamento direto. Para a realização de cada ponto do ensaio das amostras de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso foi estabelecido dois dias de duração. Logo, o novo tempo destinado para a consolidação das amostras passou a ser de 37 horas, pois o tempo restante era destinado à inundação do corpo de prova e a fase de cisalhamento.

3.4.7 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a propriedade que o material apresenta ao permitir a passagem de algum fluido através de si mesmo. O conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, principalmente na estimativa da vazão que percolará através do maciço e da fundação de barragens de terra, em obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, dentre outros.

Com base nas informações presentes na literatura consultada, foi possível prever que todas as amostras apresentariam uma permeabilidade menor que 10^{-5} m/s, portanto, tem-se que a metodologia utilizada para este ensaio é regida pela NBR 14545/2000 (Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável). Os corpos de prova utilizados no ensaio foram compactados na energia Proctor Intermediária, possuindo umidade ótima e peso específico seco máximo. Os equipamentos utilizados no ensaio foram os correspondentes ao método B da referida norma, conforme é mostrado na Figura 3.9.

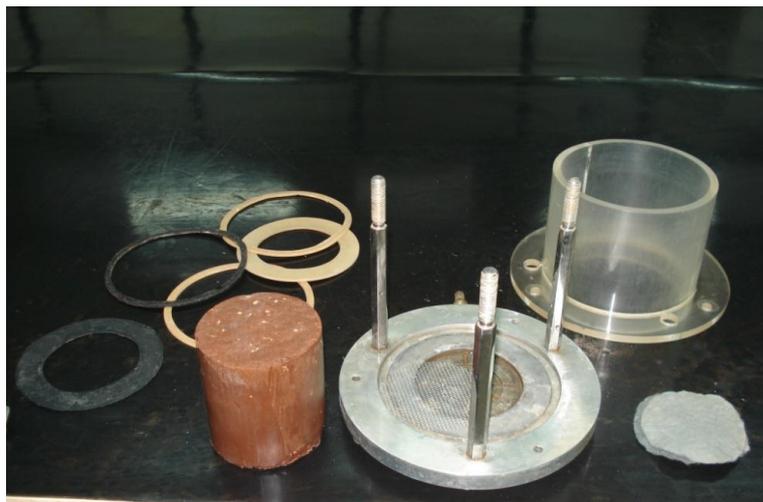


Figura 3.9 - Corpo de prova da Mistura C e anéis utilizados na montagem do permeômetro.

Na montagem do conjunto o corpo de prova foi medido, pesado e envolto em suas laterais por parafina. O espaço entre as paredes do permeômetro e o corpo de prova foi preenchido por argila bentonítica, cujo coeficiente de permeabilidade é aproximadamente 10^{-14} m/s. Com o permeômetro montado, este foi colocado para saturação ascendente em coluna d'água, sendo aplicado um gradiente igual a 2.

Após saturação dos corpos de prova, foram utilizados dois gradientes distintos para medição da permeabilidade, um com o mesmo valor utilizado na fase de saturação e outro igual a 10.

Esses dois gradientes distintos foram utilizados para avaliar como seria a sua influência na concentração de metais pesados contidos nas águas coletadas. Medidos os tempos, a temperatura e o volume de água que foi percolado pelos corpos de prova foi possível a obtenção do coeficiente de permeabilidade a 20°C (k_{20}). Adicionalmente, a água percolada foi coletada para realização de análises químicas. Terminado o ensaio, o permeâmetro foi desmontado e parte da amostra foi retirada para a determinação do teor de umidade.

3.4.8 ENSAIO DE CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Com o intuito de complementar o entendimento do comportamento hidráulico do solo, do fosfogesso e das misturas solo e fosfogesso foram determinadas as curvas de retenção de água desses materiais. Os ensaios foram realizados por meio do método do papel filtro, proposto por Marinho (1994).

A técnica de medição de sucção por meio do papel filtro consiste basicamente em manter o papel filtro em contato com a amostra para absorver certa umidade presente nas amostras, até que todo o sistema se encontre em equilíbrio de sucção. Caso o contato do papel filtro com a amostra seja diretamente, será medida a sucção matricial, uma vez que o equilíbrio de sucção se dará por fluxo de água devido à ação da capilaridade. Caso o papel filtro esteja separado da amostra por um anel espaçador, o equilíbrio de sucção se dará por fluxo de vapor e o valor medido será de sucção total.

As amostras utilizadas na realização dos ensaios de papel filtro foram compactadas no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Essas amostras foram compactadas na mesma energia de compactação e umidade ótima definidos nos ensaios de compactação realizados para este trabalho. No processo de obtenção dos corpos de prova foram utilizados anéis de moldagem, anteriormente pesados e medidos. O processo de moldagem é apresentado na Figura 3.10. Logo após as moldagens, os corpos de prova eram pesados.

Para esta pesquisa, os ensaios de papel filtro foram realizados em trajetória de umedecimento, na qual os corpos de provas moldados na umidade ótima foram secados ao ar até a umidade higroscópica e, a partir desta umidade, foi adicionada água destilada por meio de gotejamento nos corpos de prova para se atingir os vários níveis de umidade até a máxima saturação possível.



Figura 3.10 - Moldagem dos corpos de prova utilizados no método do papel filtro.

Após o corpo de prova atingir a umidade desejada, os papéis filtro foram colocados em contato com esse, para a determinação da sucção matricial, e separados desse por um espaçador, para a determinação da sucção total. O papel filtro utilizado foi o Quanty, papel filtro quantitativo JP 42 Faixa Azul de procedência Alemã, que é um papel filtro de baixo custo, com 80 g/m² e permeabilidade ao ar de 3,0 l/s.m².

Como as curvas de retenção foram realizadas utilizando o papel filtro de baixo custo Quanty, as curvas de calibração utilizadas foram as propostas por Borges *et al.* (2010), obtidas a partir das curvas de calibração utilizadas para o papel Whatman n° 42. As equações destas curvas de calibração são apresentadas a seguir:

$$\text{Para } w_f > 55 \quad \psi = e^{\left[\left(161,44 - w_f \right) / 24,07 \right]} \quad (3.2)$$

$$\text{Para } w_f \leq 55 \quad \psi = e^{\left[\left(79,782 - w_f \right) / 6,26 \right]} \quad (3.3)$$

onde ψ é a sucção das amostras e w_f a umidade do papel filtro.

Conforme discutido por Mascarenha (2008), o papel filtro requer um manuseio muito delicado, para não haver interferências externas nos resultados. Além disso, na realização de todos os ensaios, o papel filtro deve estar na condição seca ao ar, sendo este armazenado em condições secas, arejadas e retirado diretamente de sua embalagem para a execução do ensaio.

Para evitar a contaminação do papel filtro utilizado para a medição da sucção matricial com partículas dos materiais, foram utilizados três papéis filtro, sendo o intermediário de menor diâmetro.

Após montagem dos conjuntos corpos de prova, espaçadores e papéis filtro, as amostras foram devidamente seladas com filme plástico fino, embaladas e protegidas por papel alumínio. Conforme ilustra a Figura 3.11, as amostras foram identificadas e acondicionadas em distintos vasilhames de plásticos. Essas foram guardadas em caixa de isopor, com condição de variação de temperatura nula, por um período de 15 dias, para a ocorrência de equilíbrio de sucção entre o papel filtro e o material ensaiado.



Figura 3.11 - Corpos de prova embalados e armazenados em vasilhames de plástico.

Após o período de equilíbrio, os corpos de prova embalados foram abertos e, com o auxílio de uma pinça, os papéis filtros intermediários e superior foram pesados em uma balança de precisão de 0,0001 g. Registrados os valores, os papéis filtro foram levados à estufa com temperatura de aproximadamente 105° C para secagem e obtenção da massa seca. Visando garantir que a remoção do papel filtro do ambiente de equilíbrio e da estufa ocorresse sem variação significativa de umidade no papel filtro, a mensuração da massa em ambos os sistemas foi realizado o mais rápido possível.

Por fim, foram realizados ensaios de balança hidrostática nos corpos de prova para a obtenção dos índices de vazios e massas específicas dos corpos de prova, o que possibilitou a geração das curvas de retenção de água das amostras estudadas em relação ao grau de saturação.

3.4.9 INUNDAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

De modo a avaliar o comportamento das amostras compactadas na energia Proctor Intermediária frente à ação da água foram realizadas imersões em corpos de prova do solo, fosfogesso e misturas sol-fosfogesso nas condições de umidade ótima e peso específico seco máximo. Os corpos de prova utilizados foram os mesmos obtidos no ensaio de compactação.

Na execução do ensaio a inundação, foi realizada de forma lenta e individual para cada corpo de prova de modo a evitar que ambos se contaminassem entre si. Com o corpo de prova no interior de um recipiente plástico foi feita a inundação utilizando-se água de abastecimento público com temperatura próxima a 22° C. O decorrer do ensaio foi registrado através de fotografias, sendo avaliado o potencial desagregador das amostras ao longo do tempo.

3.4.10 ANÁLISE DE MICROFOTOGRAFIAS

No estudo dos solos compactados e dos solos estabilizados mecanicamente ou quimicamente, a análise microestrutural se torna importante, pois tanto a compactação como as possíveis reações químicas entre outros fenômenos são susceptíveis de oferecer um novo arranjo estrutural.

Existem diversas técnicas de microscopia para a observação da microestrutura dos solos. Na presente pesquisa optou-se pela utilização do Microscópio Estereoscópico Discovery Zeiss V20 com captura digital de imagem, uma vez que seu uso possibilitou não só a visualização da estrutura do solo como também, a observação de grãos e agregados individuais. As análises microscópicas foram realizadas no Laboratório de Micro-Paleontologia da UnB e foram estudadas amostras de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso compactadas na energia Proctor Intermediária em condições de umidade ótima e peso específico seco máximo.

A obtenção de microfotografias das amostras compactadas estudadas foi motivada principalmente pelo elevado tempo necessário para as estabilizações de leituras de deslocamento vertical do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso. Para isso foram preparados corpos de prova semelhantes aos utilizados no ensaio de cisalhamento direto. Um corpo de prova de cada material estudado foi obtido e embalado para a realização das microfotografias, sendo estes considerados em condição natural, ou seja, sem saturação e adensamento. De forma semelhante ao descrito anteriormente foram obtidos corpos de prova de cada material, sendo estes saturados e submetidos a uma tensão de adensamento igual a

200 kPa por um período de 37 horas, tempo similar à fase de consolidação empregada no ensaio de cisalhamento direto.

3.4.11 ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS NO ESTADO SÓLIDO

Visando melhor compreender as relações químicas presentes nos materiais estudados, foram realizadas análises químicas do solo, fosfogesso e misturas. As amostras para análise foram encaminhadas ao laboratório de análises da empresa Soloquímica – Análises de Solo Ltda, localizada no Distrito Federal.

Foram analisados os elementos químicos presentes nas amostras, as capacidades de troca catiônica (CTC), valores do pH, teores de matéria orgânica entre outros.

3.4.12 ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA PERCOLADA

Considerando que o objetivo deste estudo é o aproveitamento do fosfogesso em obras geotécnicas, se faz necessário avaliar a capacidade de transferência de substâncias nocivas presentes neste resíduo sólido e nas misturas para o meio ambiente.

Utilizando-se o sistema empregado na avaliação do coeficiente de permeabilidade, foi realizada a coleta da água que percolou pelos corpos de prova de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso. De modo a avaliar a influência da carga hidráulica no carregamento de impurezas contidas nos corpos de prova, esses foram submetidos a dois níveis de gradientes hidráulicos: $i = 2$ e $i = 10$. Adicionalmente, a água pura utilizada na execução do ensaio de permeabilidade também foi coletada.

A medida com que eram feitas as coletas, estas amostras foram mantidas em temperatura inferior a 0°C com objetivo de eliminar qualquer atividade biológica que porventura viesse a ocorrer. Finalizada todas as coletas, as amostras foram conduzidas ao laboratório da empresa Soloquímica para realização das análises químicas.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório realizados para a caracterização física e avaliação do comportamento mecânico e hidráulico do solo tropical fino, do resíduo fosfogesso e das misturas formadas por estes dois materiais nos percentuais de 10%, 20% e 50% de fosfogesso. Também serão apresentadas as microfotografias dos corpos de prova compactados e adensados, os resultados das análises químicas das amostras antes da compactação e da água percolada pelos corpos de prova no ensaio de permeabilidade.

Vale ressaltar que para a avaliação das características mecânicas e hidráulicas das amostras estudadas, os resultados apresentados neste capítulo serão objetos de análise no capítulo seguinte.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para melhor avaliação do potencial de uso das amostras estudadas, é necessário o conhecimento das características e de suas propriedades geotécnicas, para posterior classificação. Com esta finalidade, foram realizados ensaios de análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade e determinação da massa específica dos sólidos.

4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Neste tópico são apresentados os resultados de granulometria das amostras estudadas compreendida por peneiramento (grosso e fino) e sedimentação. A fase de sedimentação foi executada de duas formas: com uso de defloculante hexametáfosfato de sódio e sem uso deste.

A Tabela 4.1 apresenta os percentuais de pedregulho, areia, silte e argila presentes no solo de Aparecida de Goiânia, no fosfogesso e nas Misturas A, B e C, as quais são compostas, respectivamente, por:

- 90% de solo + 10% de fosfogesso;
- 80% de solo + 20% de fosfogesso; e
- 50% de solo + 50% de fosfogesso.

Com relação à classificação das amostras, considerando apenas as análises granulométricas propostas na NBR 7181/1984, o solo se apresenta como uma argila areno-siltosa. As Misturas

A e B são definidas como uma areia siltosa, a Mistura C e o fosfogesso como um silte arenoso. Quando o defloculante não é utilizado, apenas a classificação do solo é alterada, sendo este uma areia siltosa.

Tabela 4.1 - Percentuais granulométricos das amostras estudadas

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA COM DEFLOCULANTE (NBR 7181/1984)				
Materiais	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo	0,2	34,4	22,9	42,6
Mistura A	0,0	60,3	31,7	8,0
Mistura B	0,1	58,9	37,0	4,0
Mistura C	0,1	36,8	59,5	3,6
Fosfogesso	0,0	16,5	78,3	5,2
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA SEM DEFLOCULANTE				
Solo	0,2	87,4	11,1	1,3
Mistura A	0,1	75,9	23,6	0,4
Mistura B	0,1	60,9	38,2	0,8
Mistura C	0,1	45,9	53,2	0,8
Fosfogesso	0,0	16,6	81,7	1,7

Para um melhor entendimento do comportamento das amostras são apresentadas nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 as suas curvas granulométricas. Desta forma, visualizando o formato das curvas é possível verificar se estas se apresentam como bem ou mal graduadas. Cada figura apresentada corresponde ao resultado do ensaio com e sem o uso de defloculante. Nas figuras, é possível observar com clareza os efeitos da adição do agente dispersor nas amostras.

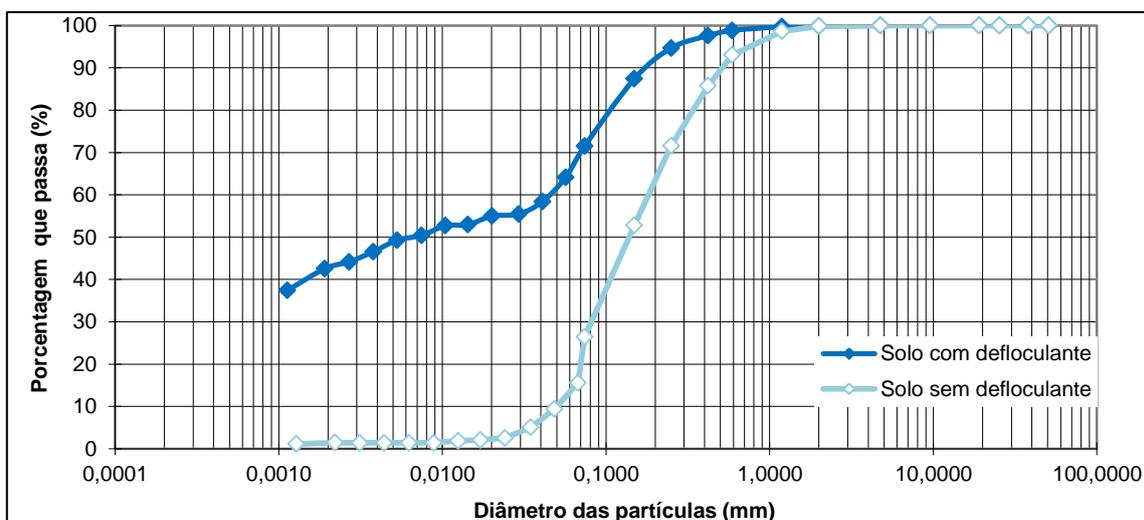


Figura 4.1 - Curvas granulométricas do solo com e sem uso de defloculante.

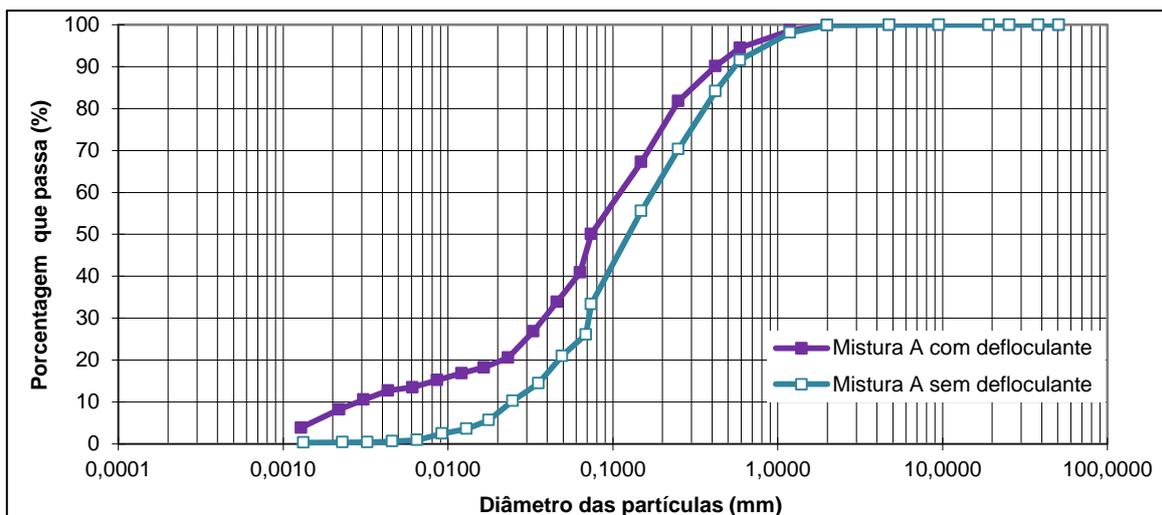


Figura 4.2 - Curvas granulométricas da Mistura A com e sem uso de defloculante.

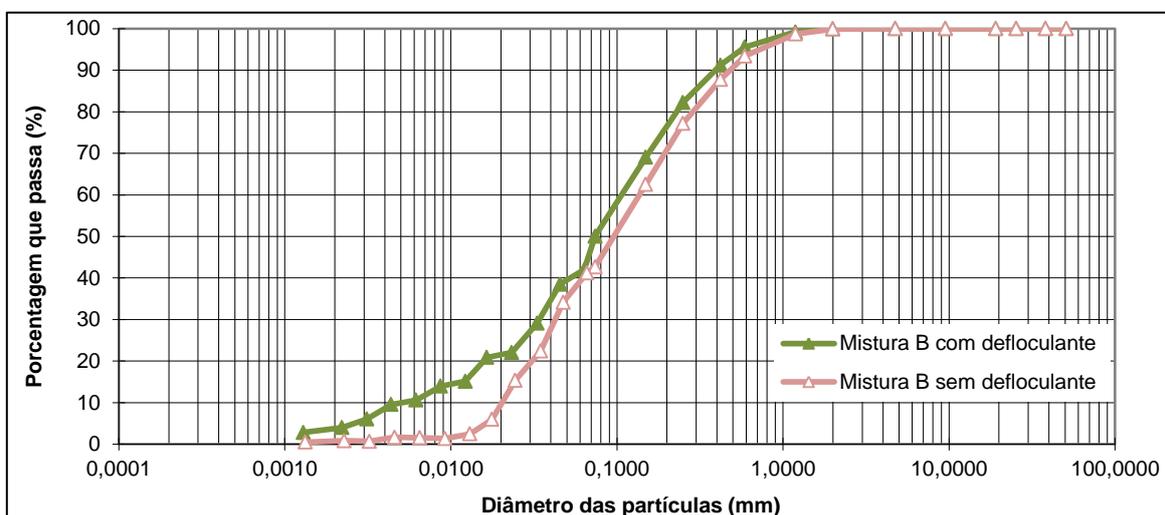


Figura 4.3 - Curvas granulométricas da Mistura B com e sem uso de defloculante.

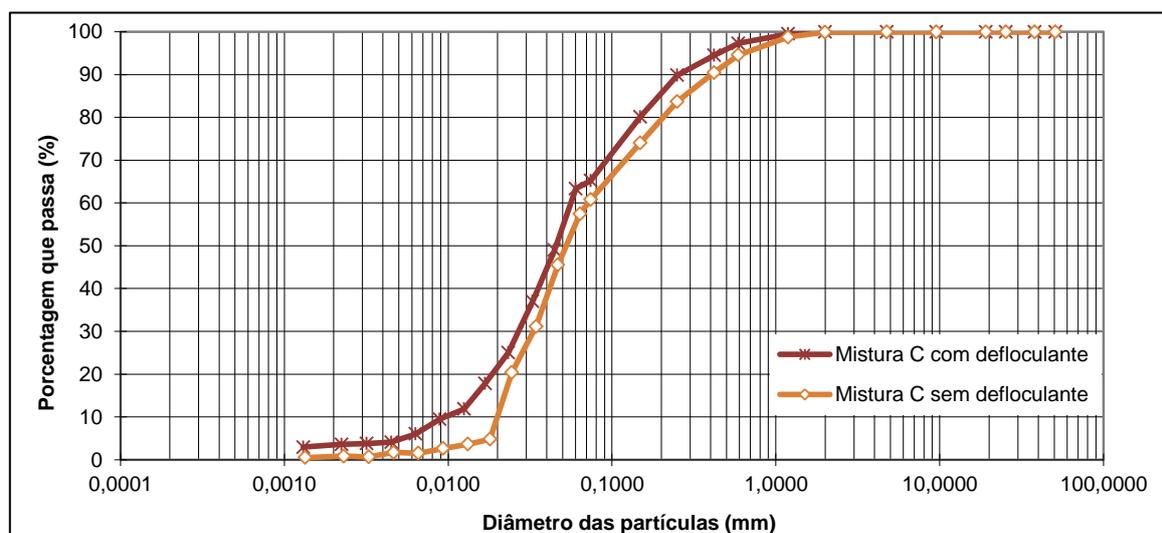


Figura 4.4 - Curvas granulométricas da Mistura C com e sem uso de defloculante.

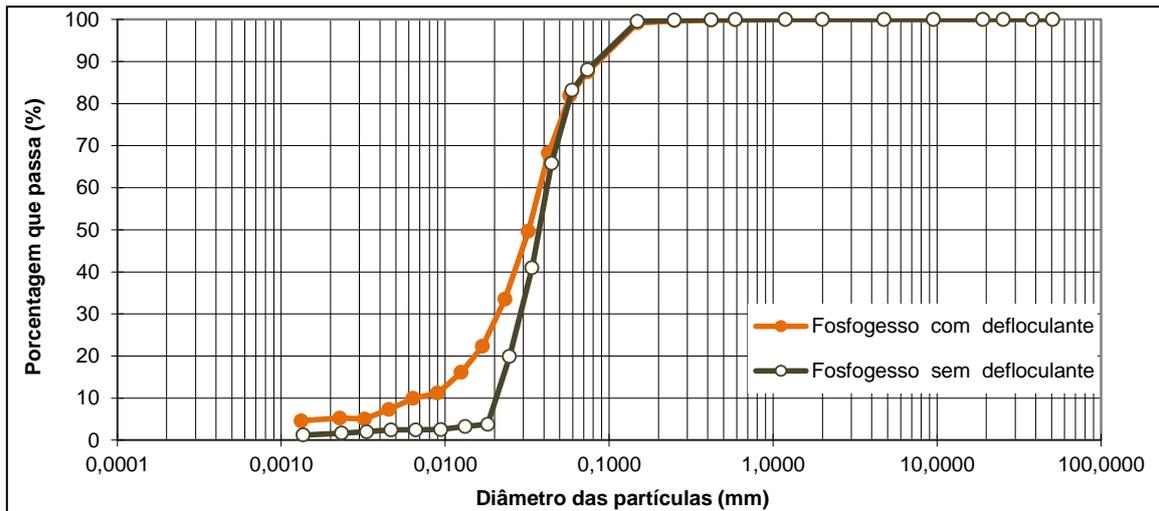


Figura 4.5 - Curvas granulométricas do fosfogesso com e sem uso de defloculante.

O uso do defloculante gerou desagregação das partículas de solo, tornando este mais fino. As concreções presentes neste material foram desfeitas pela ação do agente dispersor. Este efeito foi minimizado no fosfogesso e nas Misturas A, B e C, onde a soma das frações areia e silte não passaram pela mesma variação sofrida pelo solo quando comparados os resultados com e sem adição de defloculante.

As curvas granulométricas anteriormente apresentadas são novamente mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7 com uma nova configuração. Desta vez, na primeira figura tem-se uma comparação de todas as curvas granulométricas obtidas com o uso de defloculante para os diferentes materiais estudados. A segunda apresenta todas as curvas sem o uso do agente dispersor.

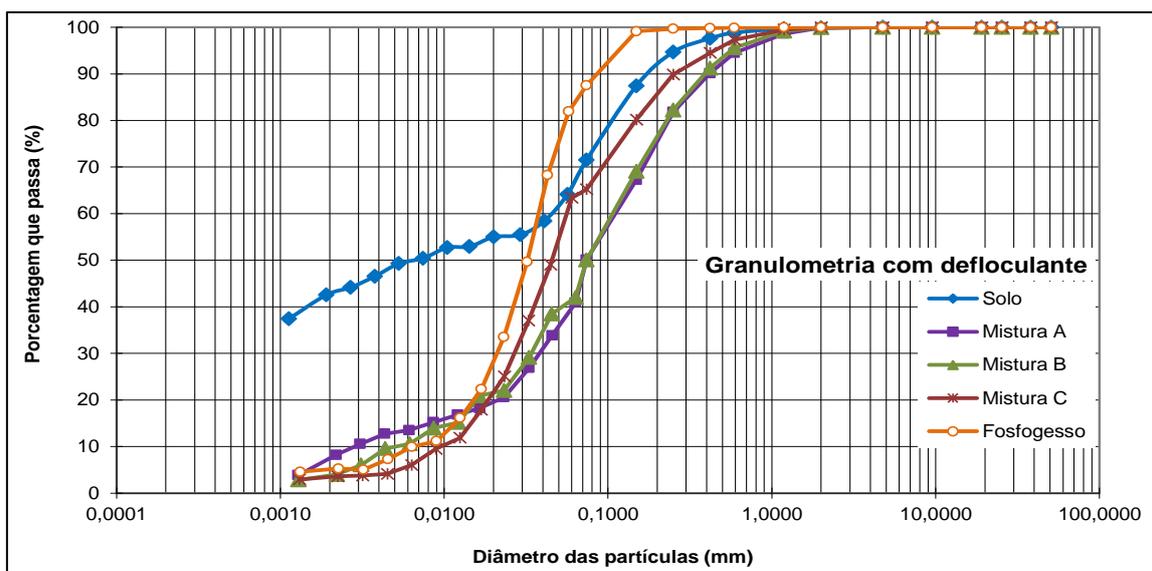


Figura 4.6 - Comparação entre as curvas granulométricas das diferentes amostras obtidas com uso de defloculante.

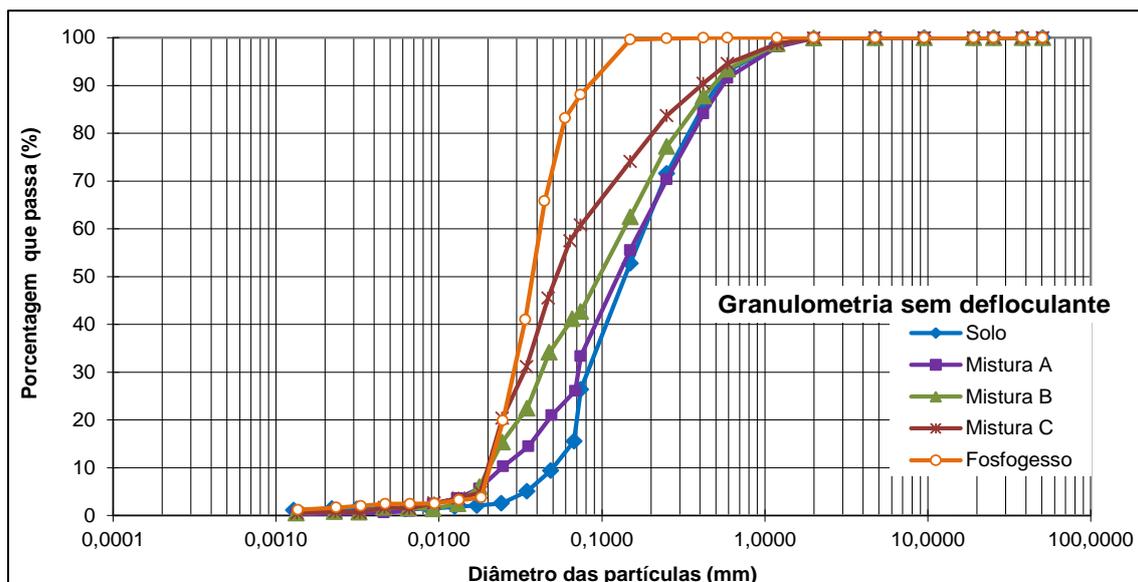


Figura 4.7 - Comparação entre as curvas granulométricas das diferentes amostras obtidas sem uso de defloculante.

A Figura 4.6, que mostra as curvas granulométricas com uso de defloculante, evidencia a diminuição nas Misturas A, B e C da fração argila presente no solo.

Como forma de avaliar a amplitude do tamanho dos grãos das curvas granulométricas e a ocorrência de descontinuidades presentes nas amostras, são apresentados na Tabela 4.2 os coeficientes de não uniformidade (C_U) e curvatura (C_C) obtidos a partir das curvas granulométricas das amostras.

Tabela 4.2 - Coeficientes de não uniformidade e curvatura obtidos das curvas granulométricas

Amostras	Sem defloculante		Com defloculante	
	C_U	C_C	C_U	C_C
Solo	3,75	0,63	-	-
Mistura A	7,50	1,13	40,00	4,44
Mistura B	7,32	0,57	19,17	1,58
Mistura C	3,45	0,84	5,60	1,40
Fosfogesso	1,95	1,02	4,75	1,59

Para o solo com defloculante, não foi possível a obtenção do D_{10} e do D_{30} . Como pode ser observado na Figura 4.1, tem-se que o menor diâmetro registrado pelo densímetro está acima do D_{30} . Em decorrência disto, os seus coeficientes de não uniformidade e curvatura não puderam ser calculados, pois estes são mais adequados para os solos granulares.

4.1.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de liquidez, os limites de plasticidade e os índices de plasticidade para as diferentes amostras estão apresentados na Tabela 4.3. Os resultados mostram que a adição de fosfogesso ao solo provoca a diminuição de sua plasticidade, sendo essa relação proporcional com o aumento do teor de fosfogesso.

Tabela 4.3 - Limites de Atterberg obtidos para as amostras estudadas

Parâmetros	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
w _L (%)	38	36	35	30	-
w _P (%)	25	24	23	-	-
I _P (%)	12	12	11	NP	NP

Observação: NP = não plástico

Conforme verificado por Ortiz (1997) e Mesquita (2007), o fosfogesso não apresentou trabalhabilidade necessária para a execução dos ensaios de limites de consistência. No caso da Mistura C, por possuir metade da sua composição composta por fosfogesso, foi notada certa dificuldade para a elaboração do ensaio de limite de liquidez e a moldagem dos cilindros em 3 mm de diâmetro para determinação do limite de plasticidade foi considerada inexecutável.

4.1.3 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Os valores obtidos através da determinação da massa específica dos grãos (ρ_s) dos materiais estão dispostos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados encontrados para a massa específica dos sólidos

Materiais	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
ρ_s (g/cm ³)	2,798	2,750	2,742	2,697	2,595

A amostra de solo apresentou maior massa específica que o fosfogesso. Assim, tendo-se como referência a massa específica do solo, foi observado que à medida que o teor de fosfogesso era aumentado nas misturas, as suas massas específicas eram diminuídas. Esta relação é mostrada na Figura 4.8, onde esta propriedade foi linearmente estimada de acordo com os percentuais das misturas. Também são apresentados nesta mesma figura os valores da massa específica dos sólidos obtidos através dos ensaios laboratoriais.

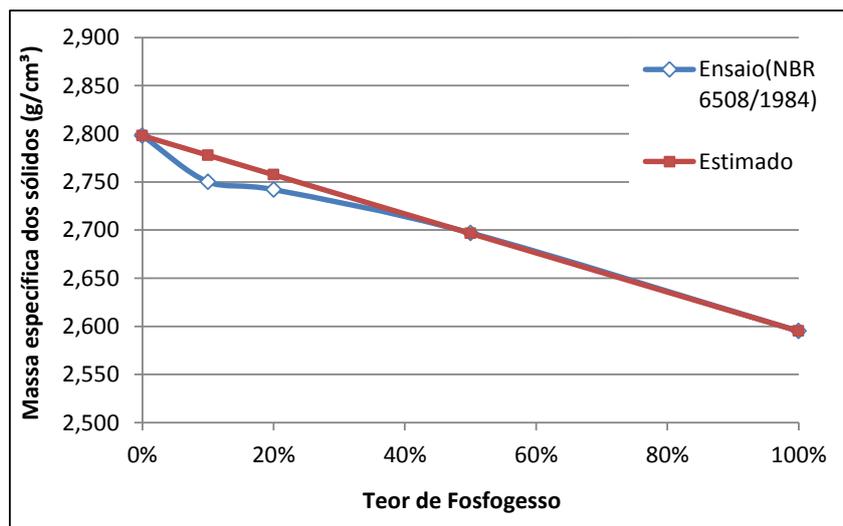


Figura 4.8 - Comparação entre as massas específicas estimadas e obtidas em ensaio para as misturas solo-fosfogesso.

Diante da boa concordância entre os valores das massas específicas dos sólidos medidas e estimadas das misturas mostradas na Figura 4.8, observa-se que é possível prever estes valores para outras misturas que possam ser formadas com o solo e o fosfogesso. Estes valores, por exemplo, podem ser utilizados no cálculo das curvas de compactação das novas misturas.

4.1.4 CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Utilizando-se os resultados dos ensaios de granulometria com defloculante e dos limites de consistência, as amostras foram classificadas de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a classificação da “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (AASHTO) muito empregada em pavimentação.

Também é mostrado o índice de grupo (IG) obtido. Os valores deste variam inversamente com a capacidade de suporte do subleito considerando boas condições de drenagem e compactação. A Tabela 4.5 apresenta estas duas classificações muito utilizadas no meio geotécnico.

No sistema SUCS o solo, o fosfogesso e as misturas formadas são classificados como um silte de baixa compressibilidade (ML). Mesquita (2007) e Rufo (2009) também obtiveram a mesma classificação para o fosfogesso. Vale ressaltar que as amostras de solo e Misturas A e B se situaram muito próximas do limite CL (argila pouco plástica) no gráfico de plasticidade.

Tabela 4.5 - Classificação geotécnica dos materiais

CLASSIFICAÇÃO SUCS					
	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
Classe	ML	ML	ML	ML	ML
CLASSIFICAÇÃO AASHTO					
	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
Grupo	A-6	A-6	A-6	A-4	A-4
Índice de Grupo	8	3	3	-	-
Materiais que predominam	solos argilosos	solos argilosos	solos argilosos	solos siltosos	solos siltosos

O solo, as Misturas A e B são classificadas no sistema rodoviário como materiais de comportamento argiloso. O índice de grupo determinado para estes estão de acordo com a capacidade de suporte encontrada por Metogo (2010), o qual obteve melhor capacidade de suporte para a mistura com adição de 20% de fosfogesso em comparação ao solo. À medida que o teor de fosfogesso aumenta, o comportamento das amostras assumem características dos siltes, como ocorrido para a Mistura C e fosfogesso, que não possuem índice de grupo por serem materiais não plásticos. O fosfogesso foi classificado como solo siltoso (A-4) coincidindo com o resultado obtido por Rufo (2009).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) todas as amostras apresentadas na classificação da AASHTO apresentam comportamento classificado como sofrível a mau para serem utilizadas em reforço de subleito de rodovias. Entretanto, esta classificação não leva em consideração as boas propriedades apresentadas pelos solos tropicais lateríticos, conforme é apresentado por Nogami & Villibor (1995).

4.2 COMPACTAÇÃO

São apresentadas na Figura 4.9 as curvas de compactação das amostras e as linhas referentes ao grau de saturação (S_r) de 80%. Neste ensaio, as curvas de compactação foram obtidas utilizando a energia Proctor Intermediária, e suas determinações tiveram como objetivo a obtenção da umidade ótima e peso específico seco máximo das amostras.

Verifica-se que os ramos úmidos das amostras compactadas apresentam comportamentos distintos com relação a este grau de saturação. Os pontos referentes ao ramo úmido do solo e da Mistura A ficam acima do S_r igual a 80%, os pontos da Mistura B são coincidentes, os pontos da Mistura C ficam abaixo e os do fosfogesso cortam a linha deste grau de saturação.

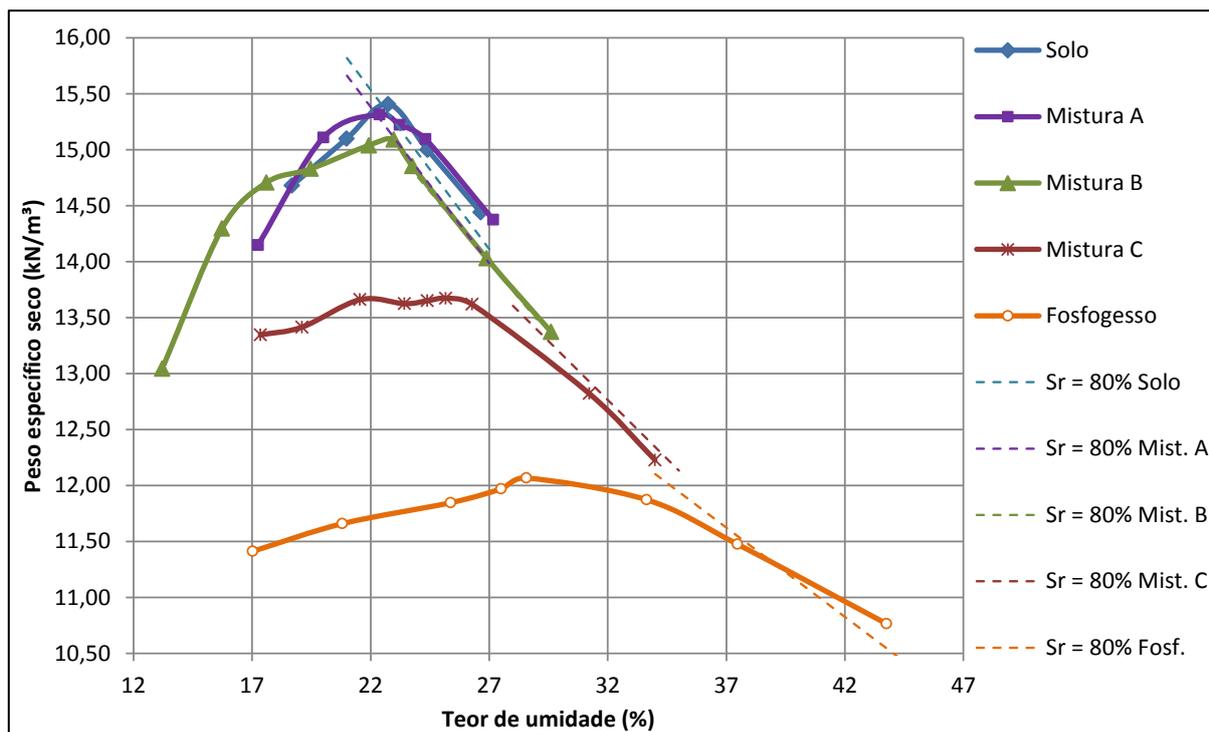


Figura 4.9 - Curvas de compactação na energia Proctor Intermediária.

Nota-se que o achatamento apresentado nas curvas de compactação da Mistura C e do fosfogesso são típicos de materiais que apresentam dificuldades de compactação em campo. Desta forma, estes materiais depois de compactados, podem se desprender da camada compactada com facilidade. O que, aliás, foi verificado no processo de compactação do fosfogesso em laboratório, pois como o material se encontrava bastante fofo no interior do cilindro, houve dificuldades na fase de rasamento do corpo de prova, pois este se apresentava em forma de camadas.

Durante a execução do ensaio, foi verificada certa dificuldade no manejo dos corpos de prova correspondentes ao último ponto do ramo úmido do fosfogesso e da Mistura C pois, como os mesmos estavam com um teor de umidade elevado, foi presenciada certa deformabilidade e exudação. Mesquita (2007) também encontrou dificuldades para determinação das curvas de compactação para o fosfogesso e mistura com 80% deste resíduo.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos a partir das curvas de compactação, sendo apresentados também os valores de índices de vazios dos corpos de prova nas condições ótimas.

Tabela 4.6 - Parâmetros obtidos no ensaio de compactação para as condições ótimas

Propriedades	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
$\gamma_{d \max}$ (kN/m ³)	15,41	15,30	15,10	13,66	12,06
W _{ot} (%)	22,7	22,7	22,9	24,0	28,0
e	0,78	0,76	0,78	0,94	1,11

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Neste item serão mostrados os resultados do estudo do comportamento mecânico apresentado pelos materiais ensaiados em laboratório. São apresentados os resultados dos ensaios de adensamento unidimensional e cisalhamento direto, sendo estes executados na condição saturada.

4.3.1 ENSAIO DE ADENSAMENTO

Os ensaios de adensamento realizados nas amostras de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso tem o intuito de melhor entender o comportamento mecânico destes materiais frente à atuação de forças externas. Na Tabela 4.7 são apresentadas as condições iniciais em que os corpos de prova se apresentavam no início do ensaio de adensamento, como: índice de vazios inicial (e_0), grau de saturação inicial (S_{r0}) e altura ideal de sólidos (h_s). Adicionalmente na Tabela 4.7, são apresentadas as variações referentes aos valores dos índices de vazios máximo ($e_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($e_{m\acute{i}n}$) correspondentes aos ensaios mecânicos realizados.

Tabela 4.7 - Condições iniciais dos corpos de prova

Amostra	e_0	S_{r0} (%)	h_s (mm)	$e_{m\acute{a}x}$	$e_{m\acute{i}n}$
Solo	0,83	74,4	10,92	0,83	0,85
Mistura A	0,85	70,1	10,83	0,82	0,85
Mistura B	0,85	76,4	10,84	0,84	0,87
Mistura C	0,85	65,7	10,80	0,85	0,89
Fosfogesso	1,10	53,3	9,53	1,10	1,16

A Figura 4.10 apresenta as curvas de adensamento representadas pelo índice de vazios *versus* o logaritmo da tensão atuante. As curvas iniciam-se com uma tensão próxima a 4,6 kPa, momento da inundação das células oedométricas e depois seguem uma trajetória de carregamento até um nível de tensão máxima igual a 1000 kPa, valor próximo à carga limite suportada pelas prensas de adensamento utilizadas. Vale lembrar que as curvas apresentadas

são referentes à metodologia adotada nesta pesquisa, que considera um tempo de 48 horas entre um carregamento e outro.

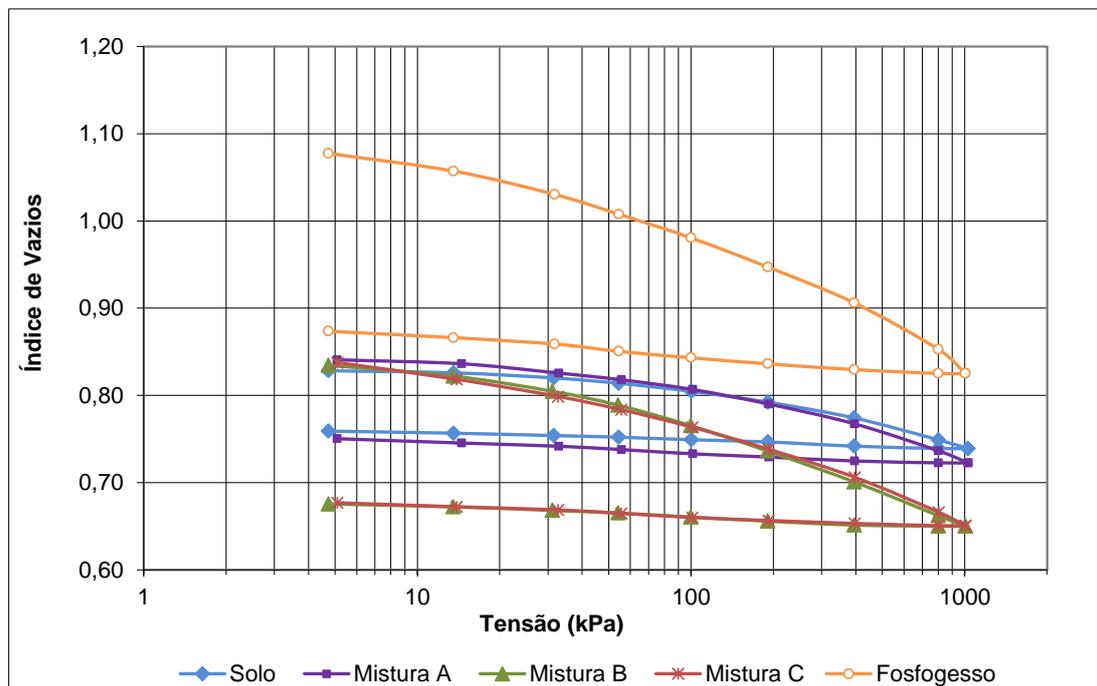


Figura 4.10 - Curvas de adensamento obtidas para o solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso.

Nas curvas apresentadas anteriormente pode ser observada a variação dos índices de vazios das amostras compactadas à medida que os acréscimos de tensão foram efetuados. Durante o ensaio de adensamento, no momento da inundação das células oedométricas, foi verificada uma pequena ocorrência de colapso apenas nas Misturas B e C. Como pode ser visto na Figura 4.10, tal fenômeno foi tão pequeno, que sua ocorrência pode ser desprezível, pois a maior variação do índice de vazios foi da ordem de 0,002.

Essa ausência do colapso é esperada devido ao processo de compactação utilizado, como o emprego da energia Proctor Intermediária e da execução do ensaio com corpos de prova nas condições de umidade ótima e peso específico seco máximo, resultando em amostras com uma estrutura fechada.

A partir das curvas de compressibilidade obtidas através do ensaio de adensamento, é possível a determinação de algumas propriedades inerentes às amostras estudadas: a tensão de pré-adensamento (σ'_p), o índice de compressão (C_c), o índice de descompressão (C_d) e o índice de recompressão (C_r). A Tabela 4.8 apresenta estas propriedades obtidas através das curvas de adensamento.

Tabela 4.8 - Propriedades presentes nas curvas de adensamento das amostras estudadas

Material	σ'_p (kPa)	C_c	C_d	C_r
Solo	155	0,083	0,009	0,010
Mistura A	168	0,112	0,013	0,019
Mistura B	62	0,128	0,011	0,036
Mistura C	97	0,140	0,012	0,048
Fosfogesso	195	0,234	0,022	0,057

Na Figura 4.11, as curvas de compressibilidade das amostras estudadas são novamente apresentadas, porém, para quantificar e comparar a variação do índice de vazios, estas estão representadas graficamente pelos índices de vazios normalizados em função do logaritmo da pressão aplicada. Desta forma, é possível avaliar graficamente o comportamento mecânico dos materiais em termos de compressibilidade.

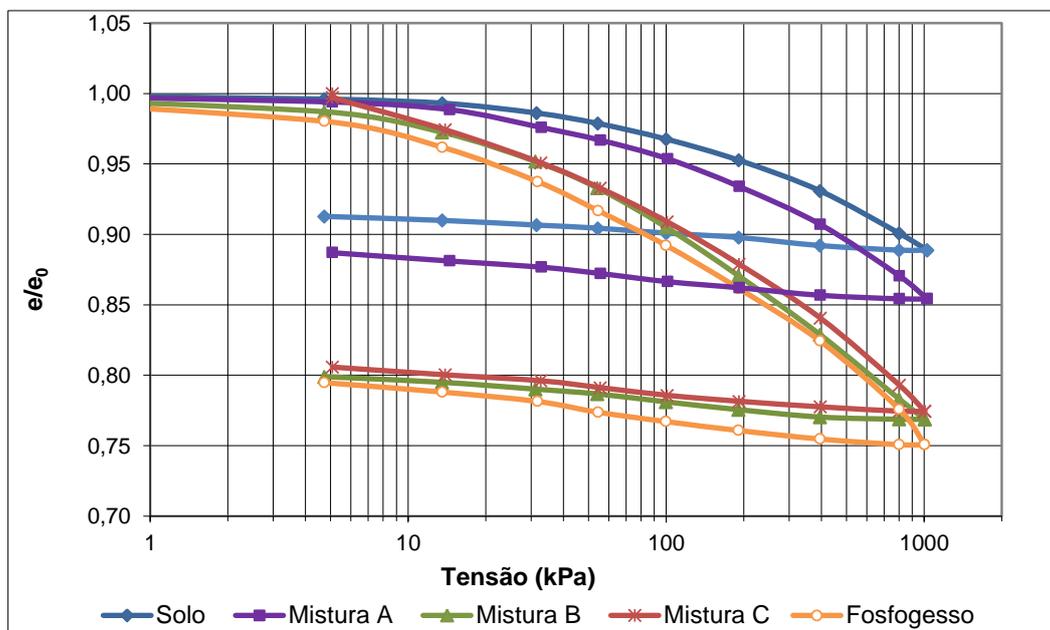


Figura 4.11 - Curvas de adensamento com índices de vazios normalizados.

Cada estágio de carga das curvas de adensamento fornece o coeficiente de variação volumétrica (m_v) que é mostrado na Tabela 4.9. Estes coeficientes serão utilizados mais adiante para o cálculo dos coeficientes de adensamento através das análises dos coeficientes de permeabilidade obtidos.

Tabela 4.9 - Coeficientes de variação volumétrica das amostras no ensaio de adensamento

Tensão (kPa)	Coeficientes de variação volumétrica (m_v) (10^{-3} kPa^{-1})				
	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Fosfogesso
5	0,693	0,542	1,251	1,508	2,184
13,5	0,272	0,265	0,765	1,186	1,106
32	0,326	0,318	0,545	0,578	0,717
50	0,268	0,183	0,384	0,369	0,491
100	0,202	0,134	0,288	0,247	0,297
200	0,137	0,102	0,182	0,158	0,186
400	0,089	0,062	0,100	0,091	0,104
800	0,062	0,043	0,056	0,058	0,069
1000	0,044	0,035	0,036	0,046	0,073

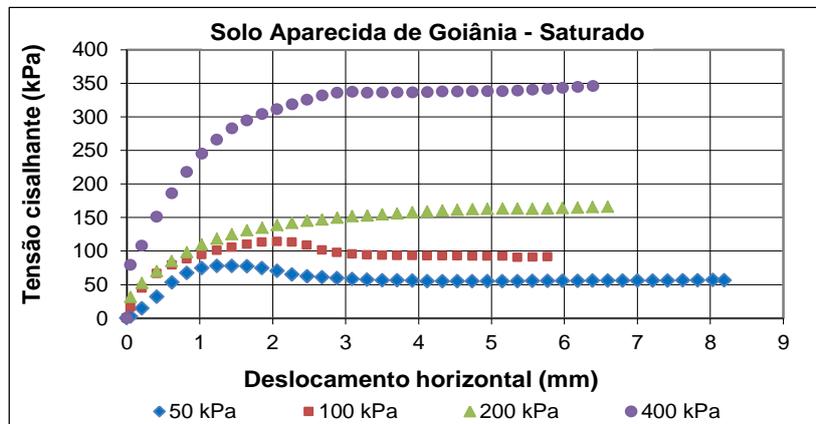
4.3.2 CISALHAMENTO DIRETO

Apresentam-se neste item os resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados em condições saturadas nas amostras de solo, fosfogesso e misturas. Na realização desse ensaio busca-se a definição dos parâmetros de resistência: intercepto de coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (ϕ'), com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Tais parâmetros são utilizados no estudo da resistência ao cisalhamento dos solos.

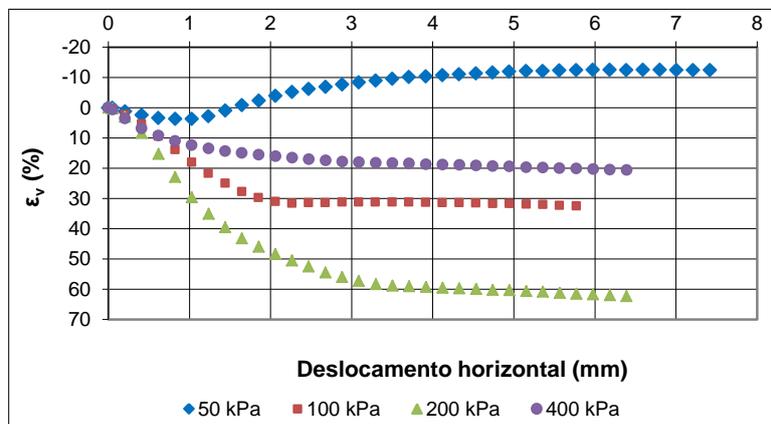
As Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (a), as variações volumétricas sofridas ao longo do cisalhamento (b), bem como as envoltórias de resistência considerando a tensão cisalhante máxima (c) e a tensão cisalhante residual (d). Tais envoltórias foram obtidas utilizando quatro pressões distintas atuantes no plano de cisalhamento: 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

Observa-se na Figura 4.12a, que a amostra de solo quando cisalhada nas tensões de 50 kPa e 100 kPa, apresenta comportamento caracterizado por pico, seguido por uma diminuição gradual da resistência até um valor constante. Neste tipo de ruptura, o solo apresenta uma leve dilatância, como pode ser verificado na Figura 4.12b para a tensão de 50 kPa. Por outro lado, quando o nível de tensão normal aumenta para 200 kPa e 400 kPa, observa-se que a tensão resistente de cisalhamento aumenta com o deslocamento até atingir resistência ao cisalhamento residual (τ_R) que é constante. Nestes casos, ocorre diminuição de volume nos corpos de prova. Para o solo, o pico apresentado é característico dos materiais pré adensados, o que confirma o valor da tensão de pré adensamento encontrada estar entre os valores de 100 kPa e 200 kPa. Os parâmetros de resistência são obtidos a partir das envoltórias de ruptura

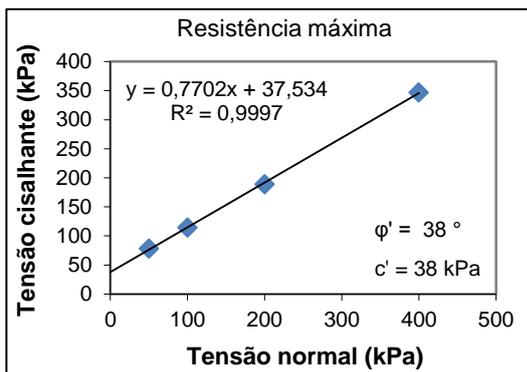
geradas pelas resistências ao cisalhamento de pico (τ_f) e residual mostradas nas Figuras 4.12c e 4.12d, respectivamente.



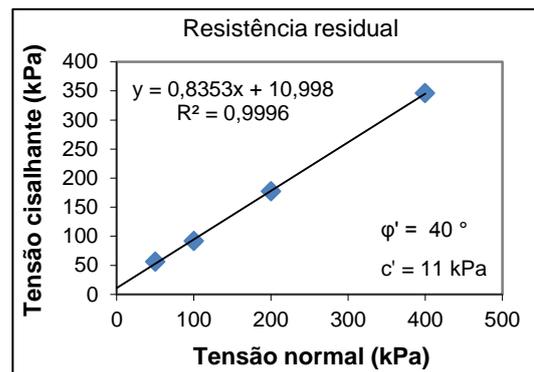
(a)



(b)



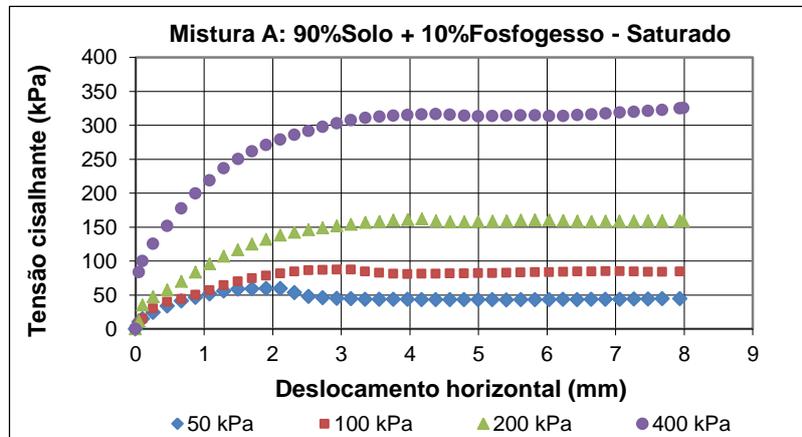
(c)



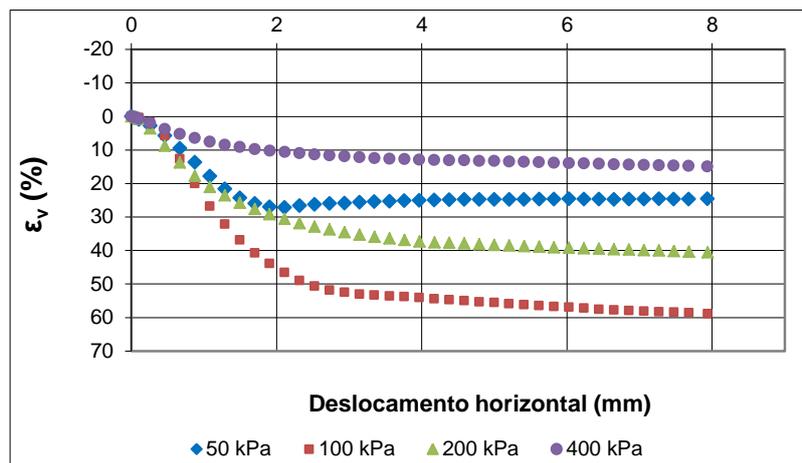
(d)

Figura 4.12 - Resultados do cisalhamento direto para o solo: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.

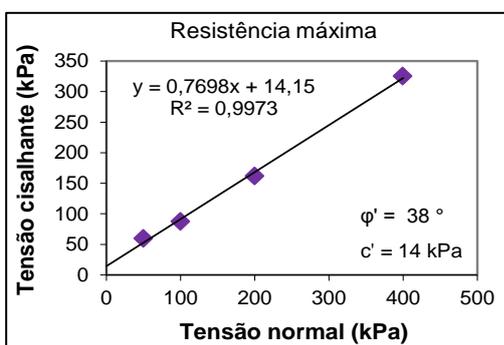
Nas Figuras 4.13a e 4.13b observa-se que a Mistura A apresentou comportamento quase semelhante ao solo, apenas não apresentando dilatância na tensão de 50 kPa. Para a tensão de 100 kPa houve ligeira formação de pico.



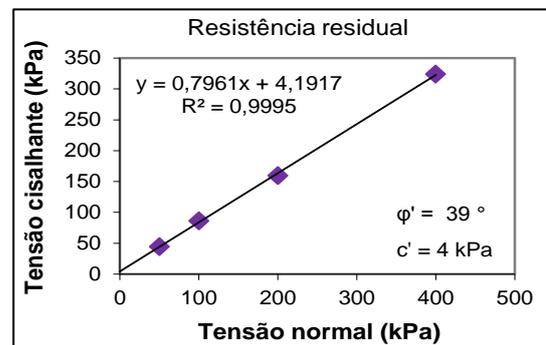
(a)



(b)



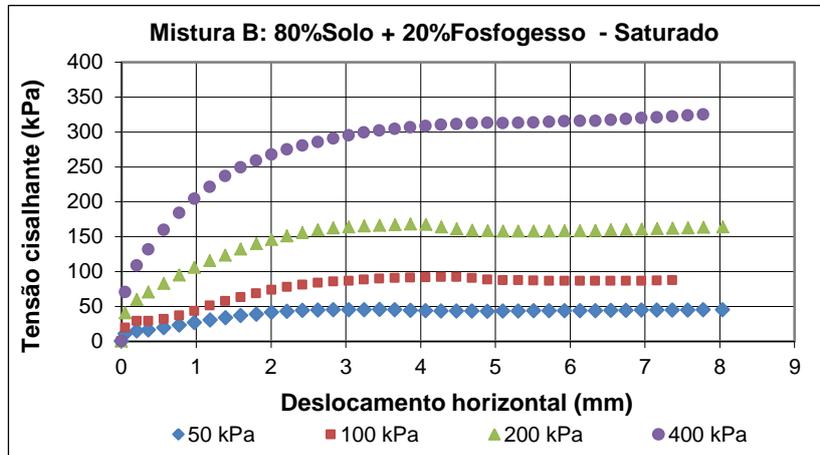
(c)



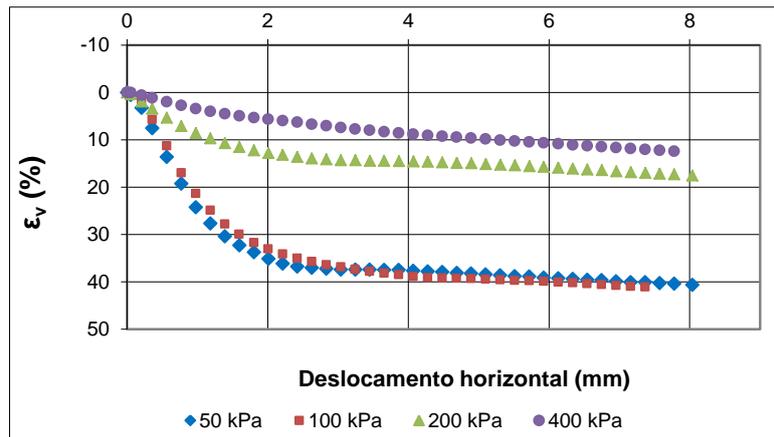
(d)

Figura 4.13 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura A: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.

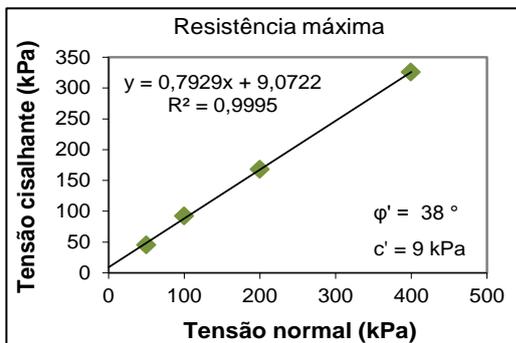
A adição de fosfogesso ao solo neutralizou o seu comportamento frágil apresentado sob baixas tensões normais atuantes, como pode ser visto nas Figuras 4.14a e 4.14b. A Mistura B passou a ter comportamento semelhante à de solos granulares fofos quando cisalhados, com surgimento de resistência residual e ausência de dilatância.



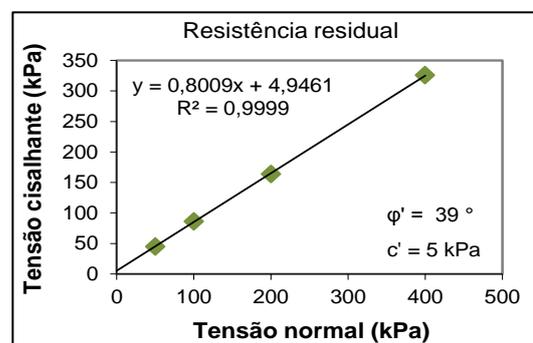
(a)



(b)



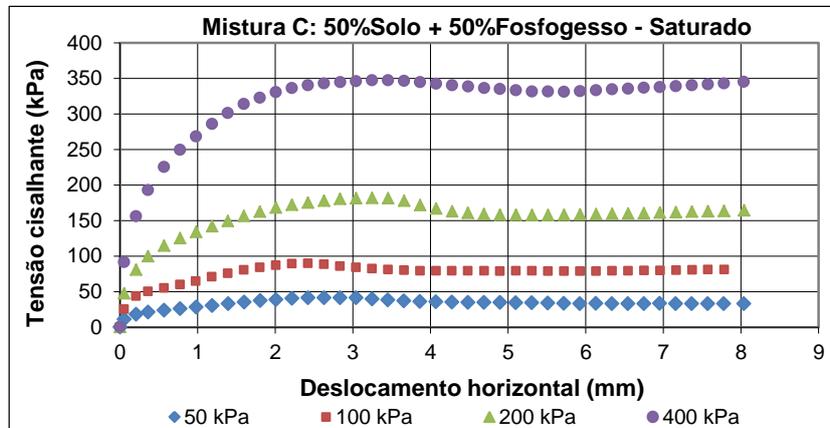
(c)



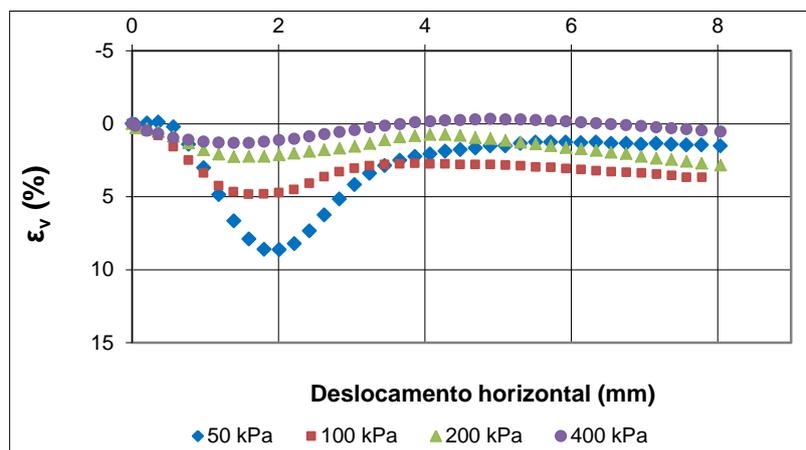
(d)

Figura 4.14 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura B: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envolvente de ruptura para resistência máxima; (d) envolvente de ruptura para resistência residual.

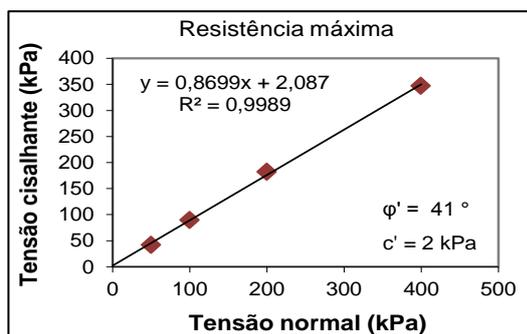
Com a relação solo-fosfogesso igual a 1:1 observa-se, na Figura 4.15a, que os picos de resistência vão surgindo à medida que a tensão normal aumenta, o que pode estar associado à forma dos grãos do fosfogesso.



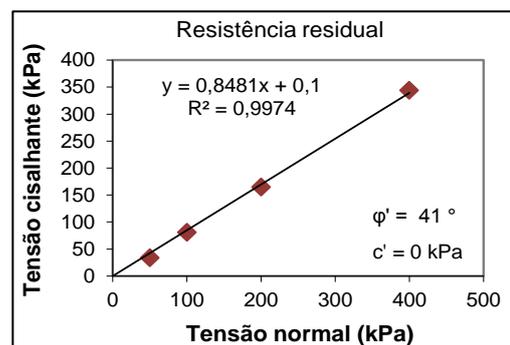
(a)



(b)



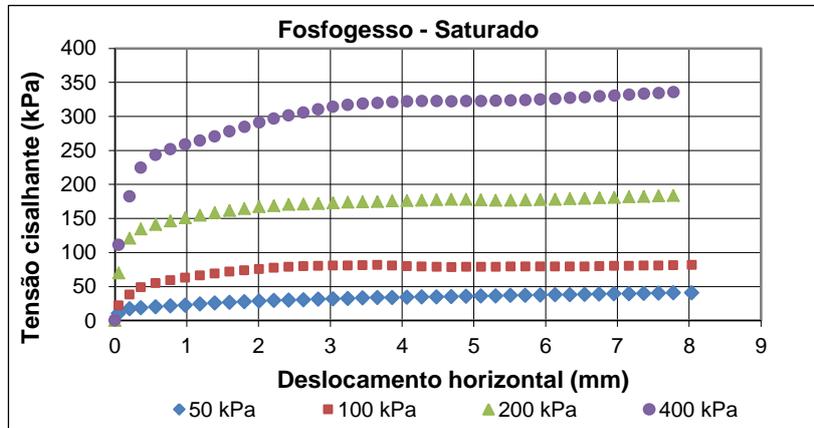
(c)



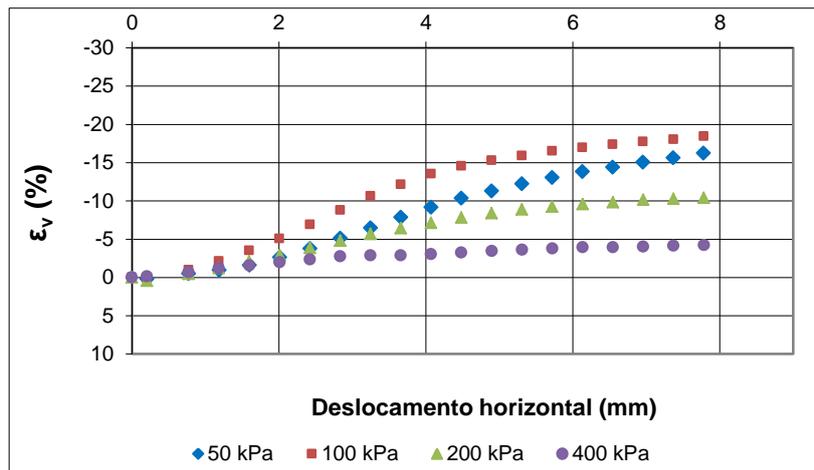
(d)

Figura 4.15 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura C: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.

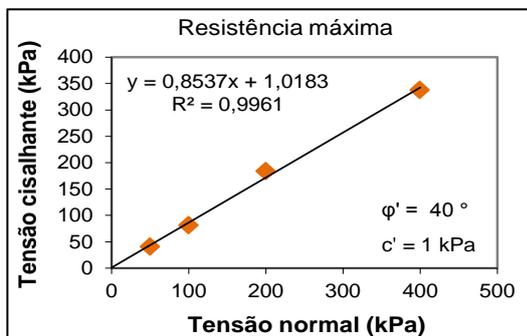
As curvas de resistência ao cisalhamento para o fosfogesso apresentaram ausência de pico como pode ser visto na Figura 4.16a. Ao contrário do que é esperado para um material que apresenta somente resistências residuais, os corpos de prova do fosfogesso sofreram leve expansão ao serem cisalhados.



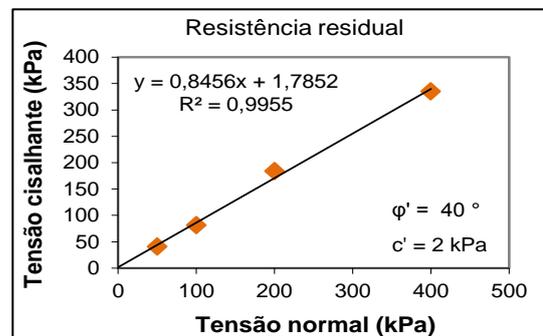
(a)



(b)



(b)



(c)

Figura 4.16 - Resultados do cisalhamento direto para o fosfogesso: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envolvente de ruptura para resistência máxima; (d) envolvente de ruptura para resistência residual.

Em síntese, foi verificado que os dois materiais possuem comportamentos distintos. O solo apresenta-se como material pré-adensado para as tensões de 50 kPa e 100 kPa e normalmente adensado para 200 kPa e 400 kPa. Já o fosfogesso, se apresentou em todas as tensões normais aplicadas como um material normalmente adensado, possuindo somente resistência ao cisalhamento residual.

No próximo capítulo, os comportamentos observados serão novamente observados e analisados sobre o ponto de vista mecânico.

Os parâmetros de resistência encontrados para as amostras estudadas, como ângulo de atrito efetivo e o intercepto de coesão efetiva, são mostrados na Tabela 4.10. Os valores foram obtidos através das equações geradas pelo critério de ruptura Mohr-Coulomb, analisando-se a resistência máxima atingida e a resistência residual.

Tabela 4.10 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto

Amostras	Resistência máxima		Resistência residual	
	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Solo	38	37,5	40	11,0
Mistura A	38	14,0	39	4,2
Mistura B	38	9,1	39	4,9
Mistura C	41	2,1	41	1,7
Fosfogesso	40	1,0	40	1,7

4.4 ENSAIOS HIDRÁULICOS

A fim de compreender como a água se comporta nos vazios das amostras estudadas, são apresentados a seguir os ensaios de permeabilidade, curva de retenção de água e imersão em água, que fazem parte da caracterização hidráulica.

4.4.1 PERMEABILIDADE

De modo a avaliar como a adição do fosfogesso ao solo interfere no fluxo de água através deste, o ensaio de permeabilidade foi realizado em amostras compactadas do solo, fosfogesso e misturas. Durante o processo de saturação foi observado que os tempos de saturação para as amostras obedeceram a ordem do coeficiente de permeabilidade, ou seja, quanto mais permeável o material menor o tempo para saturação. A Tabela 4.11 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade a 20°C para os dois níveis de cargas hidráulicas.

Tabela 4.11 - Coeficientes de permeabilidade a 20°C para $i = 2$ e $i = 10$

Amostras	$K_{20^{\circ}\text{C}}$ (m/s)	
	Gradiente = 2	Gradiente = 10
Solo	$2,5 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-9}$
Mistura A	$6,0 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-9}$
Mistura B	$5,4 \times 10^{-9}$	$9,9 \times 10^{-9}$
Mistura C	$7,3 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Fosfogesso	$7,5 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$

Durante a realização do ensaio, foi observado que para o fosfogesso com gradiente elevado houve ruptura hidráulica do corpo de prova, visto que momentaneamente o fluxo de água percolada se elevou significativamente sendo estabilizado logo após. O valor do coeficiente de permeabilidade encontrado para o fosfogesso com gradiente de 10 foi semelhante ao obtido por Rufo (2009).

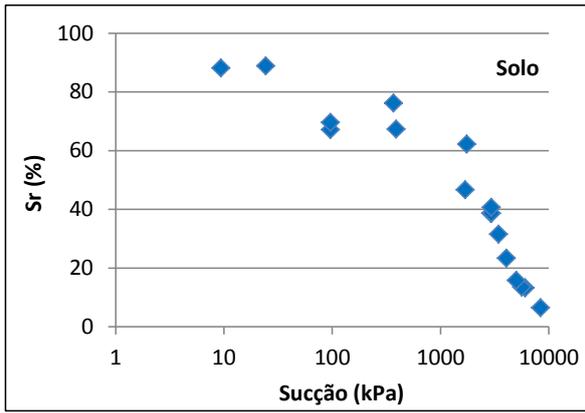
4.4.2 CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

O conhecimento das curvas de retenção dos materiais tem grande importância no estudo do comportamento mecânico das amostras em seus estados não saturados, pois é possível prever o seu comportamento frente a uma variação de umidade.

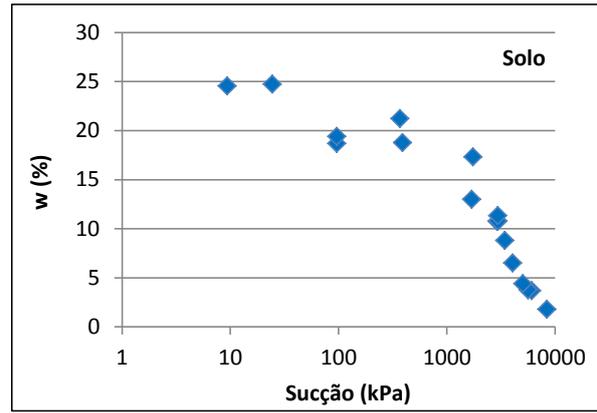
As curvas de retenção de água também conhecidas como curvas características foram obtidas pelo método do papel filtro utilizando-se trajetórias de umedecimento. A técnica do papel filtro permite a medição de sucção mátrica e total. Os resultados apresentados nesta pesquisa são referentes apenas à sucção total, devido ao surgimento de fungos no papel filtro que prejudicou a análise por sucção matricial, conforme comentado posteriormente.

As curvas de retenção de água estão representadas nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 em função do grau de saturação e do teor de umidade (dados em percentagem) m a sucção (dada em kPa).

Devido à existência de pequenas dispersões dos resultados e, para melhor compreensão das trajetórias de umedecimento, optou-se pela representação destas curvas de retenção apenas por pontos, sem que os mesmos fossem ligados entre si.

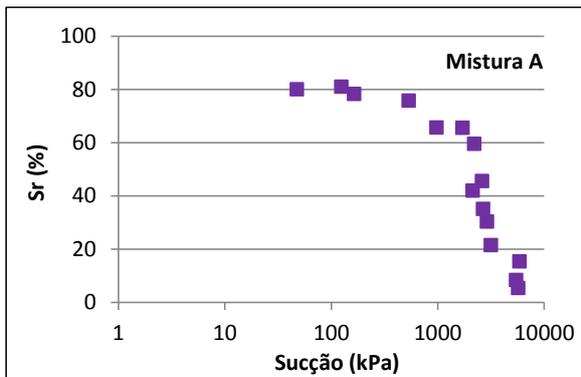


(a)

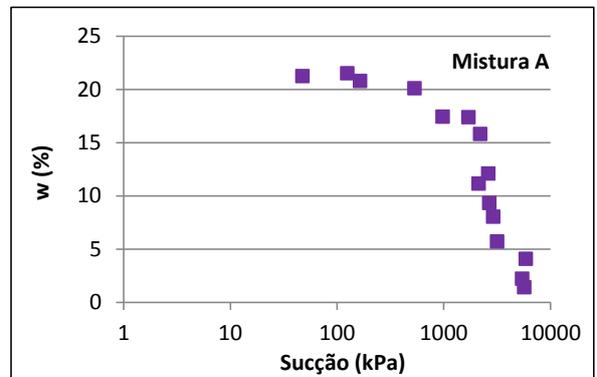


(b)

Figura 4.17 - Curvas de retenção de água do solo: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.

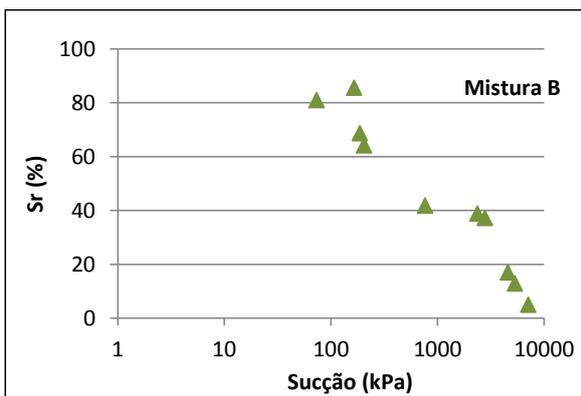


(a)

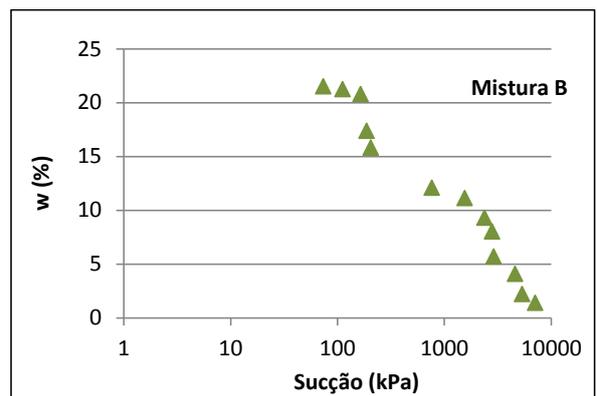


(b)

Figura 4.18 - Curva de retenção de água da Mistura A: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.

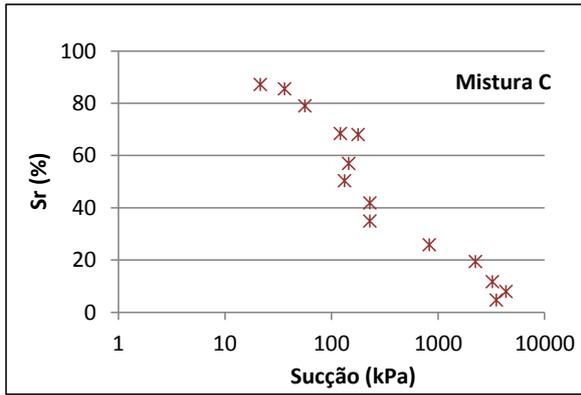


(a)

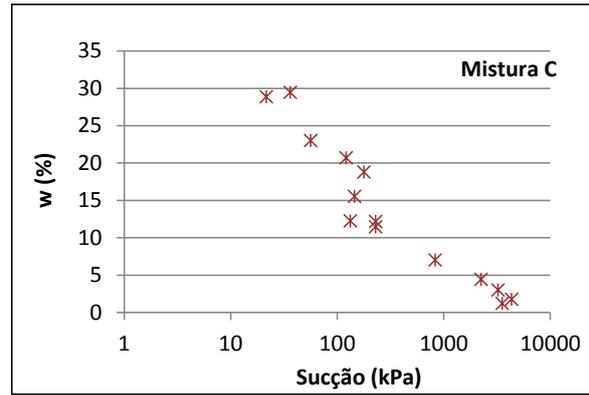


(b)

Figura 4.19 - Curva de retenção de água da Mistura B: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.

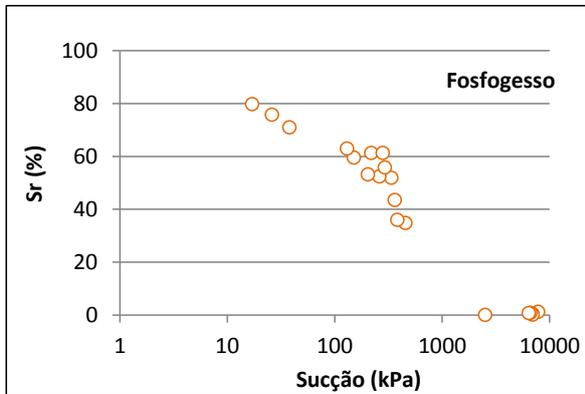


(a)

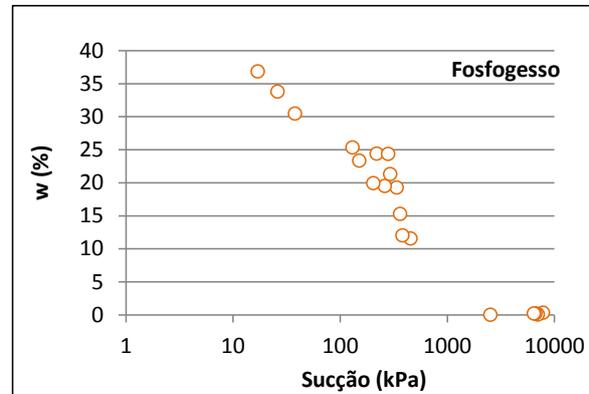


(b)

Figura 4.20 - Curva de retenção de água da Mistura C: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.



(a)



(b)

Figura 4.21 - Curva de retenção de água do fosfogesso: (a) em função do grau de saturação; (b) em função do teor de umidade.

A Figura 4.22 apresenta os resultados mostrados anteriormente, porém estes estão dispostos em um só gráfico. Quando as curvas de retenção de água são comparadas em função do mesmo grau de saturação, observa-se que o solo e a Mistura A, por conterem maior quantidade de finos, apresentam valores de sucção superiores ao restante das amostras.

Para o fosfogesso houve dificuldade na obtenção dos valores de sucção para graus de saturação compreendidos entre 5 % e 35 %.

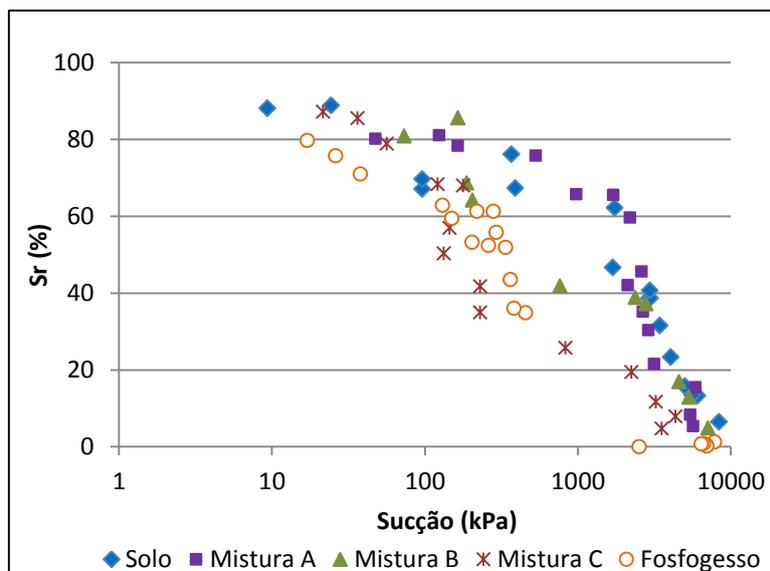


Figura 4.22 - Curvas de retenção de água das amostras estudadas em função do grau de saturação.

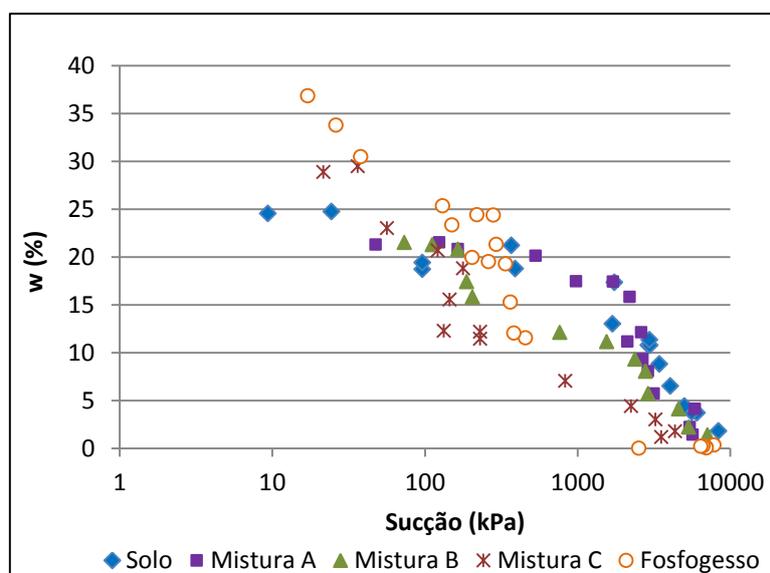


Figura 4.23- Curvas de retenção de água das amostras estudadas em função do teor de umidade.

Devido à grande faixa de variação de teores de umidade dos corpos de provas utilizados para a obtenção das curvas de retenção de água, ocorreu o surgimento de fungos nos papéis filtro utilizados.

Este problema também foi relatado nos ensaios executados em resíduos por Teixeira (2002) e por Bizarreta & Campos (2010). O primeiro autor usou um fungicida em suas pesquisas e o último constatou que a influência da massa de fungos nos resultados das curvas características era irrelevante, uma vez que as curvas de retenção obtidas após períodos de contato do

resíduo e papel filtro de 2 e 4 dias foram semelhantes, embora no último caso a quantidade de fungos existentes fossem maiores.

Nesta pesquisa, optou-se pela não utilização do fungicida, uma vez que essa alternativa resultaria na necessidade de novas curvas de calibração do papel filtro Quanty. Para saber o valor da massa seca de fungo existente no papel filtro e se essa massa não era desprezível na determinação dos valores de sucção, foi executado o seguinte processo: a umidade do papel filtro foi determinada no momento do ensaio e todos os papéis filtros foram pesados antes de entrarem em contato com o resíduo, o que permitia determinar a massa seca do papel filtro sem os fungos. Dessa forma, a massa seca dos fungos seria a massa seca do papel filtro obtida ao final do ensaio menos a massa seca do papel filtro antes do ensaio.

A Figura 4.24 apresenta os valores da massa seca de fungo presentes nos papéis filtro utilizados na determinação da sucção matricial (Mfm) e total (Mft) para as três misturas. Esses valores são relacionados aos graus de saturação das amostras. Este procedimento não foi feito para o fosfogesso porque durante a execução dos ensaios para este caso não se tinha ciência do problema.

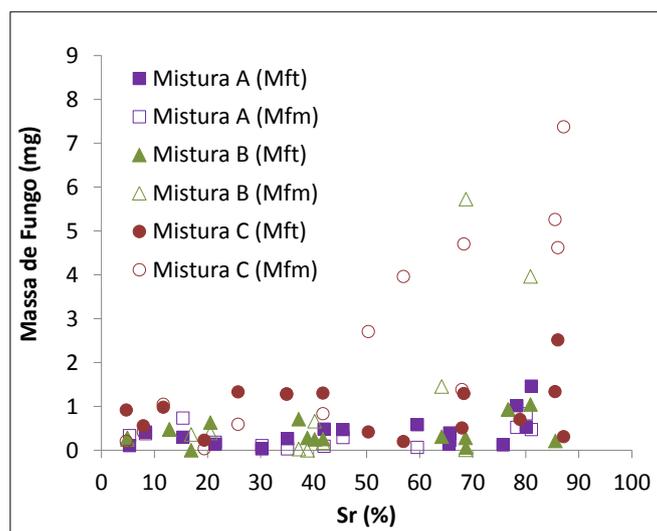


Figura 4.24 - Valores da massa de fungo para as Misturas A, B e C relacionadas aos graus de saturação das amostras.

Na figura anterior, pode-se observar que a massa seca de fungo nos ensaios de sucção total é sempre inferior a 0,002 g para as três misturas, o que é um valor sem grande significância.

Além disso, a massa de fungo nos ensaios de sucção matricial é inferior a 0,002 g na Mistura A, até o grau de saturação de 70% na Mistura B e até o grau de saturação de 50 % na Mistura

C. Neste caso, a massa de fungo irá influenciar na curva de retenção desses materiais, conforme explicado a seguir.

A Figura 4.25 apresenta as curvas de retenção para a Mistura B com os valores de sucção total e matricial. Verifica-se que esses valores de sucção são semelhantes até o grau de saturação em torno de 70 %, que é o valor de saturação da mistura em que a massa de fungo começa a influenciar os valores de sucção matricial. Dessa forma, acredita-se que os valores de sucção matricial e total desses materiais são semelhantes, sendo que a diferença verificada entre elas é devido à influência da presença de fungos nos papéis filtro. Este mesmo comportamento foi verificado para as outras misturas.

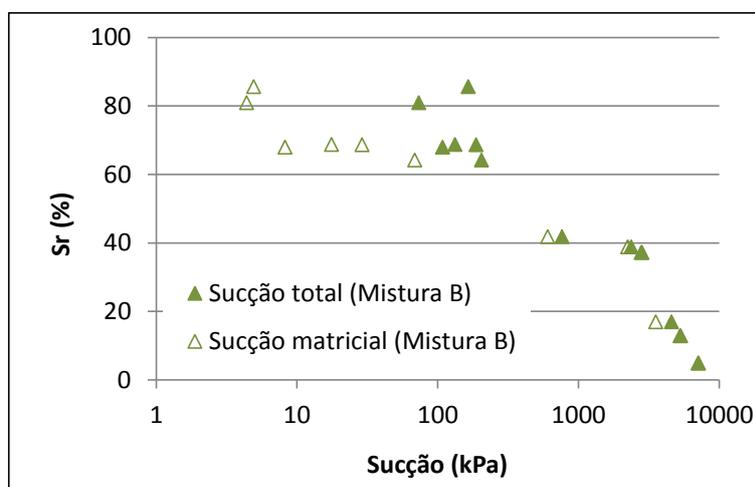


Figura 4.25 - Curvas de retenção de água da Mistura B referentes à sucção total e matricial.

4.4.3 INUNDAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os resultados das inundações dos corpos de prova são mostrados nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28, sendo os mesmos apresentados através de fotografias obtidas no decorrer do ensaio em diferentes intervalos de tempo. Desta forma, foi possível acompanhar os comportamentos frente à ação da água, apresentados pelas amostras compactadas de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso, sem que estas estivessem confinadas lateralmente.

Primeiramente, são mostrados na Figura 4.26 os corpos de prova compactados na energia Proctor Intermediária apresentando condições de umidade ótima e peso específico seco máximo antes da fase de inundação. No início do ensaio, durante a fase de enchimento dos recipientes com água, foi tomada a maior precaução possível para não haver desagregação das amostras, pois, como foi visto, estas se apresentam pouco coesas em sua maioria.

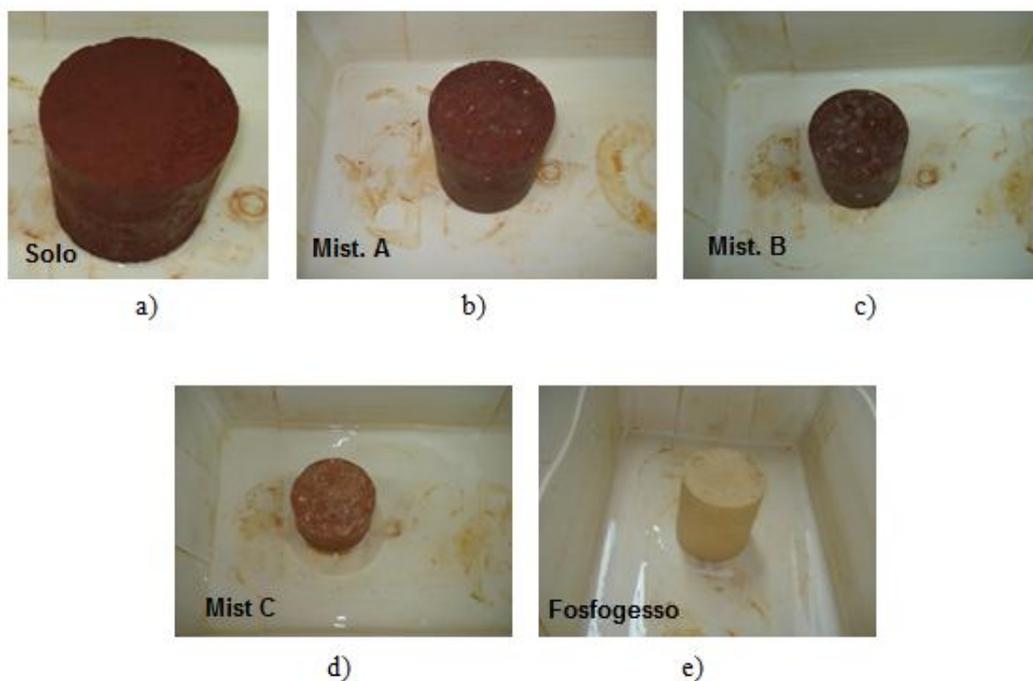


Figura 4.26 - Corpos de prova antes da inundação: (a) solo; (b) Mistura A; (c) Mistura B; (d) Mistura C; (e) fosfogesso.

Em seguida são mostradas na Figura 4.27 as amostras submetidas à imersão por um período igual a 6 minutos. As amostras de solo e Misturas A e B continuam estáveis após esse período, o mesmo não acontecendo para a Mistura C e fosfogesso.

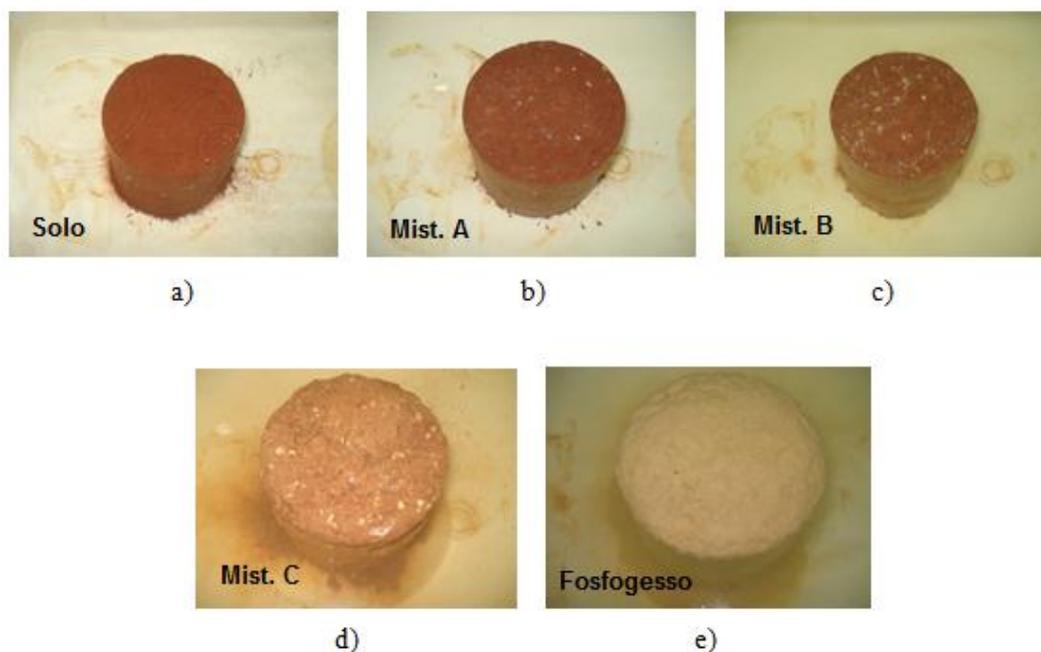


Figura 4.27 - Corpos de prova imersos por 6 minutos: (a) solo; (b) Mistura A; (c) Mistura B; (d) Mistura C; (e) fosfogesso.

Para o solo e a Mistura A não foi observado nenhum efeito desagregador devido à ação da água. Nesta fase do ensaio foi verificada surgências de bolhas de ar no entorno do corpo de prova referente à Mistura B. Para essa mistura, no decorrer da avaliação este fenômeno se apresentou constante. Para a Mistura C e fosfogesso, logo no início da inundação, além da ocorrência das bolhas de ar, houve início de dissolução do fosfogesso e aumento visível do volume destes corpos de prova, isto devido à absorção d'água ocorrida.

Na Figura 4.28 são mostradas as imagens finais da avaliação realizada. Para o solo e Mistura B as imagens mostradas são referentes a 18 horas de imersão. A Mistura A ficou imersa por um período igual a 24 horas e, as imagens da Mistura C e o fosfogesso foram registradas com uma hora de duração de ensaio.

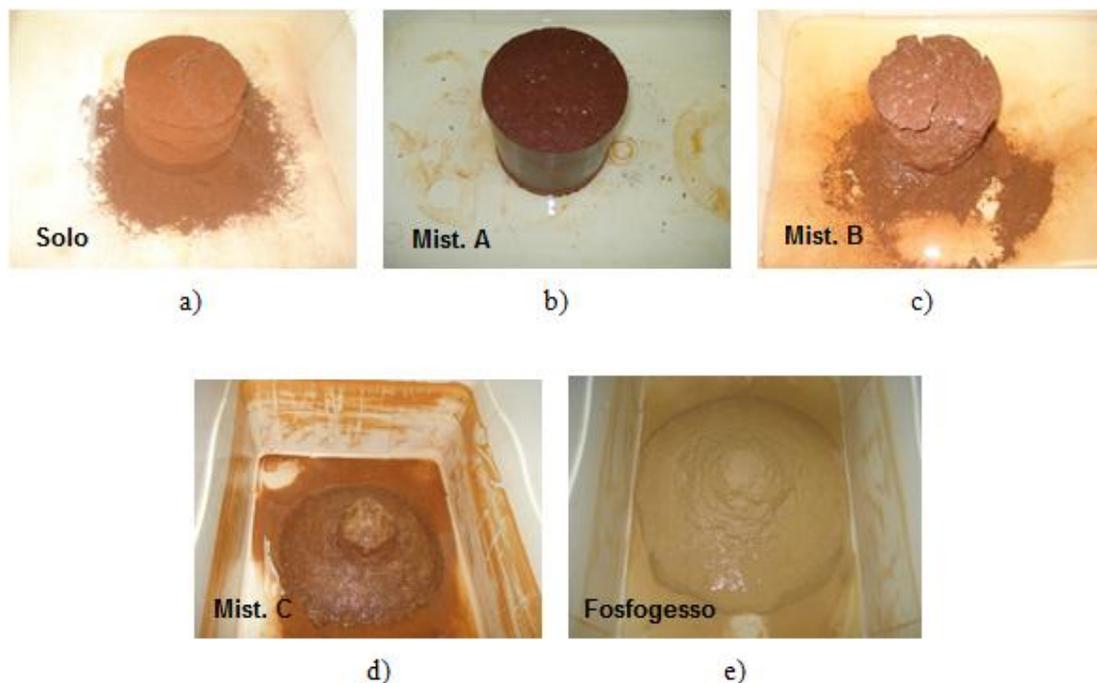


Figura 4.28 - Corpos de prova ao final da avaliação: (a) solo após 18 horas; (b) Mistura A após 24 horas; (c) Mistura B após 18 horas; (d) Mistura C após uma hora; (e) fosfogesso após uma hora.

Conforme apresentado anteriormente, no solo é verificado certo desprendimento das camadas laterais do corpo de prova e, na Mistura B também é verificado fato semelhante, sendo tal desprendimento dado pelo inchamento do corpo de prova devido à absorção de água. As amostras da Mistura C e fosfogesso mostraram que, ao final de 60 minutos de ensaio, estas não oferecem nenhuma estabilidade frente à ação da água. Nestes dois casos o material foi totalmente dissolvido pela ação da água presente ao seu redor. Por fim, o corpo de prova da

Mistura A não apresentou nenhum desprendimento de suas faces, e nem foi notada grande absorção de água, como ocorreu com a Mistura B. Esta maior estabilização da Mistura A em relação às outras amostras confirma o maior entrosamento entre os grãos do solo e do fosfogesso, motivo pelo qual a sua permeabilidade foi a menor entre as amostras estudadas e o coeficiente de não uniformidade foi o mais elevado.

4.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Neste item são apresentadas microfotografias das amostras estudadas e os resultados das análises químicas das amostras secas ao ar e da água que percolou nos corpos de prova no ensaio de permeabilidade para melhor compreender os efeitos da adição de diferentes percentuais de fosfogesso ao solo.

4.5.1 APRESENTAÇÃO DE MICROFOTOGRAFIAS

As microfotografias foram feitas por microscópio estereoscópico com captura digital de imagem. Foram obtidas microfotografias de amostras compactadas de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso. As imagens obtidas foram de amostras moldadas em corpos de prova nas condições ótimas, sendo uma parte das amostras considerada natural e a outra parte saturada e adensada a uma tensão de 200 kPa. Este valor de tensão foi escolhido por ser utilizado no ensaio de cisalhamento direto e por representar bem o fenômeno da demora nas estabilizações das leituras de deslocamento vertical que vem ocorrendo nas misturas e no fosfogesso. A Figura 4.29 mostra em destaque que o solo natural compactado apresenta certa porosidade.

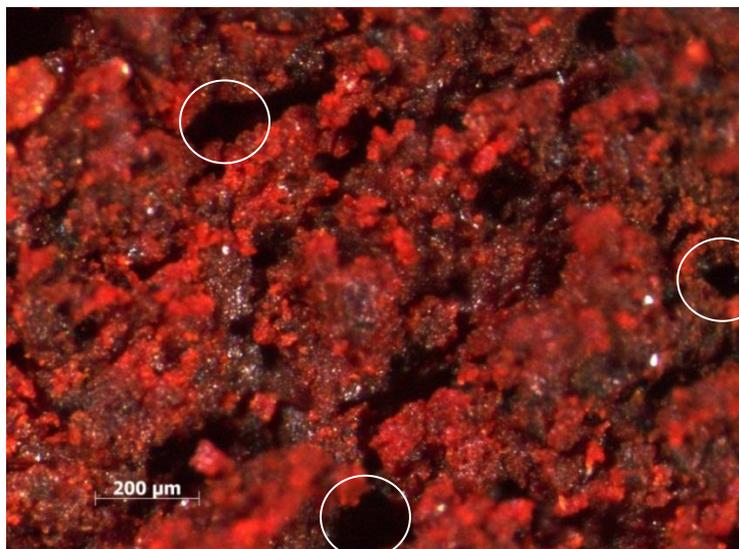


Figura 4.29 - Microfotografia do solo natural.

Diferentemente do estado estrutural do solo natural, uma menor porosidade é mostrada na Figura 4.30, que mostra o solo adensado. Esta estrutura é verificada devido à saída d' água dos vazios do solo e o seu respectivo fechamento.

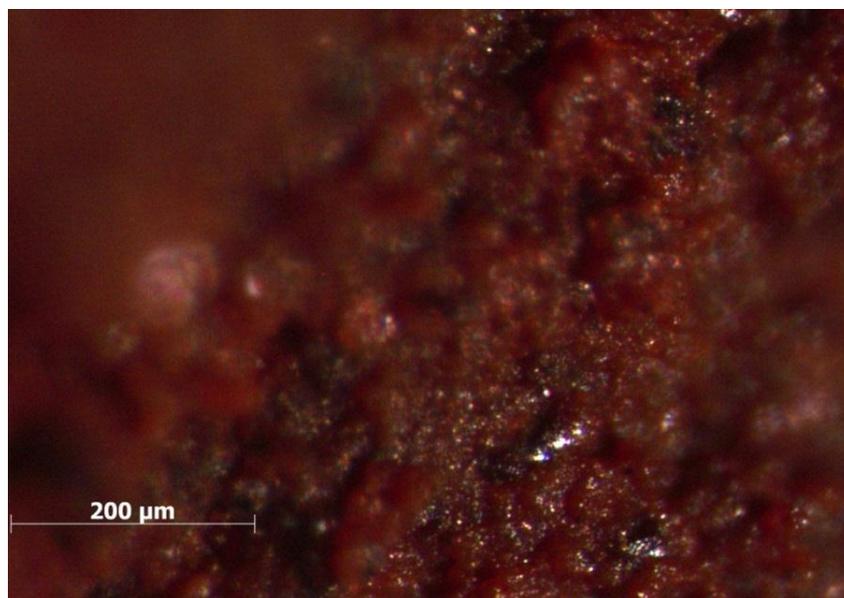


Figura 4.30 - Microfotografia do solo adensado.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 são mostradas duas amostras da Mistura A: natural e adensada, respectivamente. Ambas as imagens ilustram o surgimento em pequena quantidade dos cristais de fosfogesso (em destaque) e, ainda é possível verificar a maior distribuição de poros na amostra natural e a sua ausência na amostra adensada.



Figura 4.31 - Microfotografia da Mistura A natural.



Figura 4.32 - Microfotografia da Mistura A adensada.

Com o teor de resíduo igual a 20%, uma maior concentração dos cristais de fosfogesso é observada nas amostras natural (Figura 4.33) e adensada da Mistura B (Figura 4.34). Para ambas amostras percebe-se que o arranjo estrutural se assemelha, ou seja, não é possível visualizar a distinção dos poros em amostras naturais e adensadas. Outro fenômeno que pode ser observado é que os grãos do fosfogesso não se encontram totalmente envolvidos pelo solo.

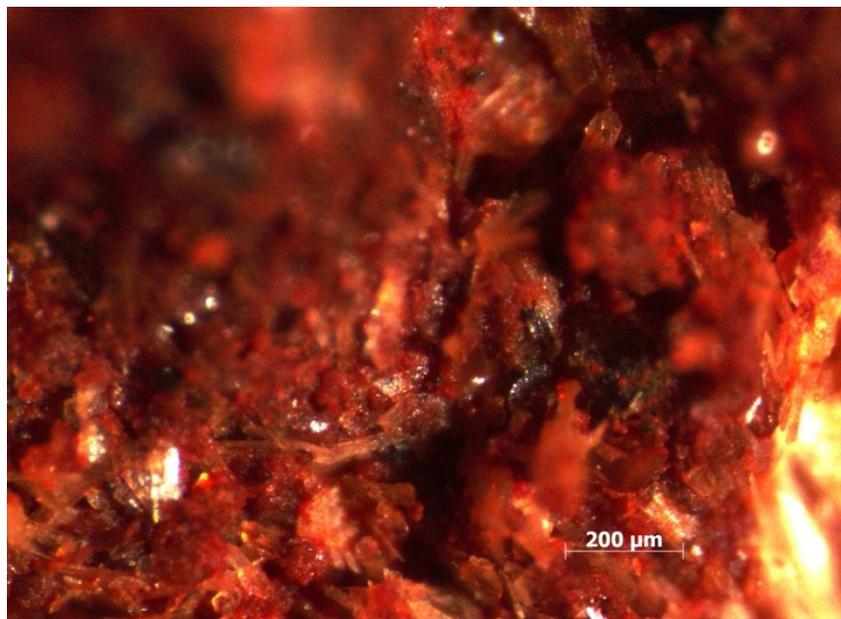


Figura 4.33 - Microfotografia da Mistura B natural.

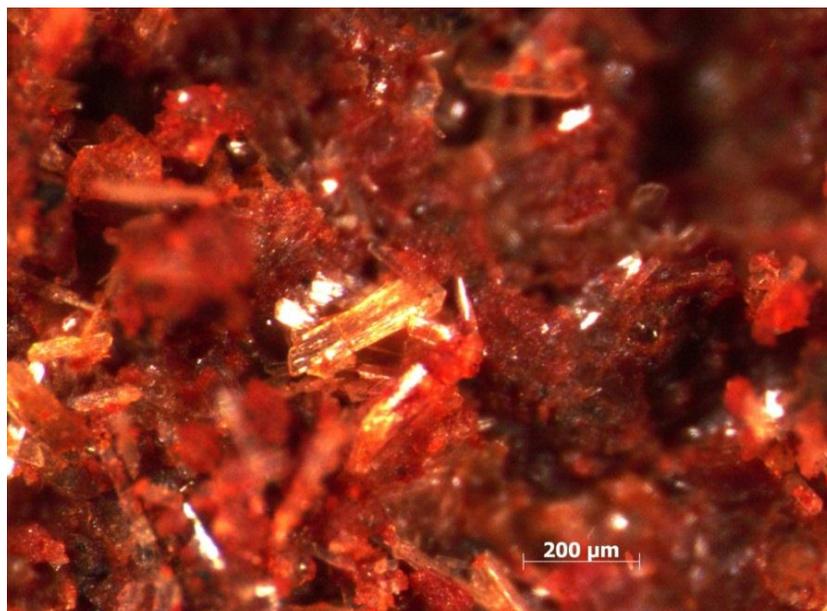


Figura 4.34 - Microfotografia da Mistura B adensada

As amostras da Mistura C natural (Figura 4.35) e adensada (Figura 4.36) apresentam as mesmas características observadas na mistura anterior, porém com um maior teor dos cristais de fosfogesso. Na Figura 4.35 é possível visualizar com clareza que os grãos do fosfogesso estudado apresentam geometria tabular, com algumas ocorrências de quebras em suas extremidades.



Figura 4.35 - Microfotografia da Mistura C natural.



Figura 4.36 - Microfotografia da Mistura C adensada.

Na Figura 4.37 que apresenta a Mistura C natural com um menor grau de aproximação, é possível visualizar a ocorrência de orientação das partículas presentes nessa mistura.

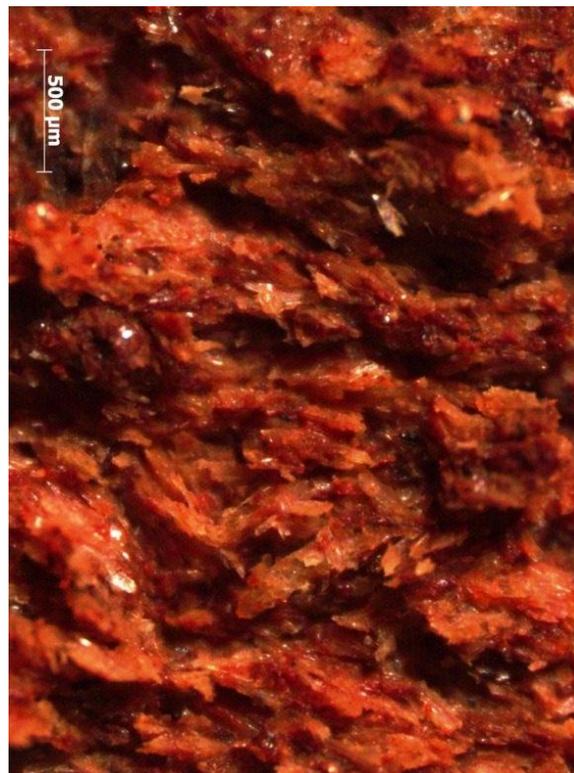


Figura 4.37 - Orientação das partículas presentes na Mistura C natural.

Nas imagens capturadas para o fosfogesso natural (Figura 4.38) e saturado (Figura 4.39) não é possível observar diferenças distintas entre as amostras, com ambas apresentando o mesmo

arranjo estrutural. Na Figura 4.38 é mostrado o corpo de prova no seu estado natural, onde os pontos escuros (em destaque) indicam a presença de grãos de impurezas contidas no fosfogesso. Os grãos maiores chegaram a ser medidos, sendo encontradas dimensões na ordem de 85,0 μm .

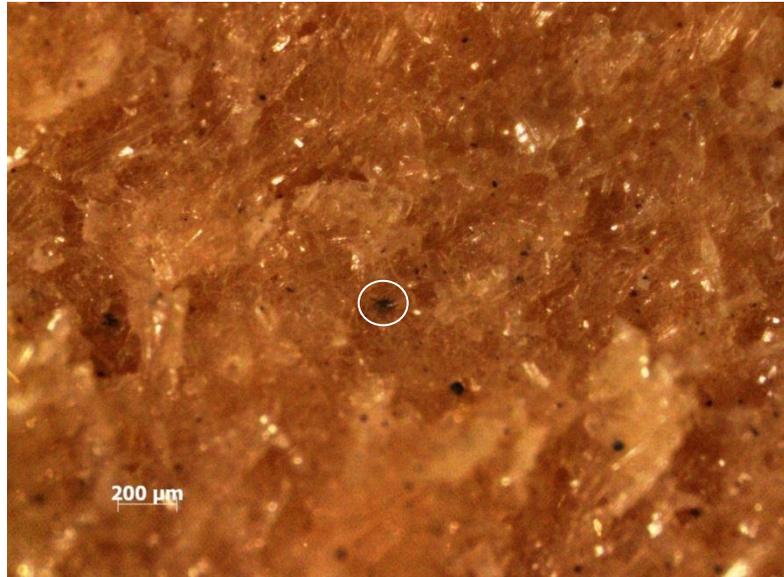


Figura 4.38 - Microfotografia do fosfogesso natural.

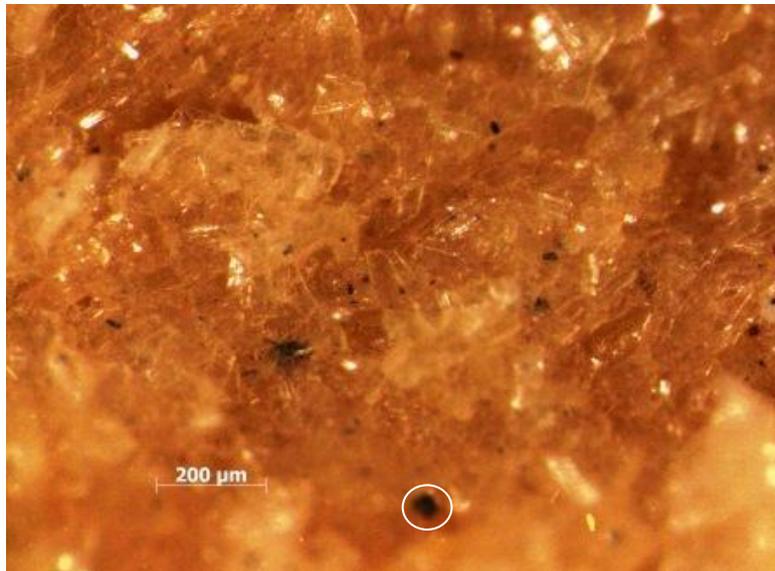


Figura 4.39 - Microfotografia do fosfogesso adensado.

A Figura 4.40 mostra uma imagem do fosfogesso adensado e saturado, onde é constatada a presença de atividade biológica nas amostras que possuem fosfogesso em sua composição. Acredita-se que estas ramificações formadas nos vazios do fosfogesso são evidências da presença de atividade fúngica, já verificada na obtenção das curvas de retenção de água.



Figura 4.40 - Microfotografia do fosfогesso adensado.

4.5.2 ANÁLISES QUÍMICAS

A análise química das amostras estudadas pode ser de grande importância no entendimento do comportamento mecânico. Por meio disso pode-se verificar o potencial de reação de um solo a produtos químicos, em função dos elementos químicos nele presentes. A caracterização química dos solos tem importância para a agronomia e essas análises podem ainda revelar a presença de metais pesados na composição do solo, do fosfогesso e alguma reação entre estes dois materiais que possa originar algum composto químico prejudicial ao meio ambiente.

Esta caracterização química apresenta os micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), enxofre (S), bem como outros elementos e propriedades. Do ponto de vista geotécnico, destaca-se que a incorporação do resíduo fosfогesso ao solo gera acréscimo: da capacidade de troca catiônica (CTC), do teor de alumínio e a da soma das bases nas misturas estudadas.

A capacidade de troca catiônica é a capacidade que os argilo-minerais e a matéria orgânica possuem para adsorver cátions trocáveis. Esta CTC depende do tipo de mineral de argila, do teor da matéria orgânica presente no solo e do pH.

Foi verificado que os dois materiais estudados não apresentam valores significativos de matéria orgânica. O aumento do teor de fosfогesso possui influência direta no aumento do

fósforo disponível nas amostras, com o pH apresentando tendência contrária, ou seja, seu valor sofre redução com o aumento do teor de fosfogesso nas misturas. O baixo valor de pH encontrado para o fosfogesso corrobora com as características ácidas obtidas por Ghafoori & Chang (1993), Rabelo *et al.* (2001) e Parreira *et al.* (2003),

Também é verificado que o aumento do teor de fosfogesso no solo acarreta no acréscimo das reservas disponíveis de fósforo, cálcio e zinco das misturas resultantes, tornando-as mais férteis. Na engenharia geotécnica, esse aumento de fertilidade do solo com uso de fosfogesso é uma alternativa altamente viável para utilização de misturas com a finalidade de recomposição vegetal de áreas prejudicadas pela ação de processos erosivos e também recomposição dos taludes formados para a construção de rodovias, ferrovias, aterros e até mesmo para utilização na recuperação de áreas de empréstimo degradadas. As composições químicas das amostras estudadas são listadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Análise química das amostras estudadas em seu estado sólido e seco ao ar

COMPLEXO SORTIVO	TEOR DE FOSFOGESSO (%)				
	0	10	20	50	100
pH em H ₂ O, sem unidade	5,4	5,4	5,3	4,9	3,5
FÓSFORO - P, em mg/dm ³ = ppm	0,1	53,4	180,0	554,0	888,0
CÁLCIO - Ca, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	2,5	64,9	55,1	66,2	69,9
MAGNÉSIO - Mg, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
POTÁSSIO - K, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	0,10	0,06	0,06	0,08	0,06
SÓDIO - Na, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	0,02	0,39	0,40	0,49	0,31
ALUMÍNIO - Al, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	0,10	0,40	0,70	0,90	1,30
ACIDEZ (H + Al), em cmolc/dm ³ = mE/100mL	5,80	3,70	3,70	2,50	3,00
SOMA DAS BASES, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	2,8	65,6	55,8	67,0	70,5
CTC ou T, em cmolc/dm ³ = mE/100mL	9,0	69,0	59,0	69,0	73,0
SATURAÇÃO por BASES - V, em %	33,0	95,0	94,0	96,0	96,0
SATURAÇÃO por ALUMÍNIO - m, em %	3,0	1,0	1,0	1,0	2,0
SATURAÇÃO com SÓDIO - ISNa, em %	0,2	0,6	0,7	0,7	0,4
CARBONO ORGÂNICO - C, em g/kg	2,5	5,3	0,9	2,9	1,5
MATÉRIA ORGÂNICA - MO, em g/kg	4,3	9,1	1,5	5,0	2,6
MICRONUTRIENTES					
BORO DISPONÍVEL - B, em mg/dm ³ = ppm	0,4	0,6	0,8	0,6	0,4
COBRE DISPONÍVEL - Cu, em mg/dm ³ = ppm	0,9	0,9	0,7	0,8	0,5
FERRO DISPONÍVEL - Fe, em mg/dm ³ = ppm	22,0	27,9	30,8	31,8	89,8
MANGANÊS DISPONÍVEL - Mn, em mg/dm ³ = ppm	31,3	23,0	19,7	13,7	4,5
ZINCO DISPONÍVEL - Zn, em mg/dm ³ = ppm	2,0	3,4	5,8	3,2	9,8
ENXOFRE DISPONÍVEL - S, em mg/dm ³ = ppm	139,0	186,0	160,0	154,0	145,0
ARSÊNIO - As, em mg/dm ³ = ppm	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

De modo a avaliar o potencial de contaminação do meio ambiente por metais pesados que estão presentes no fosfogesso e misturas, são apresentados no Quadro 4.2 os resultados das análises químicas realizadas na água percolada pelos corpos de prova no ensaio de permeabilidade realizado com gradientes hidráulicos igual a 2 e 10. Para os corpos de prova do solo e Mistura A, quando submetidos ao menor gradiente hidráulico, não foi possível a obtenção da quantidade de água necessária para realização das análises químicas.

Para interpretação dos resultados obtidos foi utilizada a resolução n° 357 (CONAMA, 2005) que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Os valores destacados no Quadro 4.2 indicam as concentrações de elementos químicos presentes na água percolada que ultrapassaram o valor máximo permitido pela resolução. Dentre estes estão as concentrações de manganês presente em todas as amostras que possuem algum teor de fosfogesso e a concentração de cobre e zinco para o fosfogesso com gradiente igual a 2. Os elementos cádmio e chumbo também ficaram com concentrações acima do permitido pela resolução, porém foi verificado que a água utilizada presente no Laboratório de Geotecnia da UnB também possuía concentrações desses elementos acima do limite permitido.

Quadro 4.2 - Resultados das análises químicas para a água percolada nos ensaios de permeabilidade

Elemento químico	Unidade	Água CAESB	Solo	Mistura A	Mistura B		Mistura C		Fosfogesso		Valor máximo Resolução Conama n° 357/2005
			i = 10	i = 10	i = 2	i = 10	i = 2	i = 10	i = 2	i = 10	
Arsênio	(mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,5
Cádmio	(mg/l)	3,8	0,9	0,4	2,2	< 0,01	2,1	4,6	5,4	< 0,01	0,2
Chumbo	(mg/l)	2,3	1,8	2,5	2,4	2,3	2,3	3,1	2,3	3,1	0,5
Cobre	(mg/l)	0,6	0,4	0,2	0,3	0,3	0,5	0,1	2	0,5	1,0
Níquel	(mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,7	< 0,01	2,0
Ferro	(mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,6	1,2	0,8	0,6	0,2	15,0
Mangânes	(mg/l)	< 0,01	0,5	4,3	3,1	4,1	3,7	10,1	9	3	1,0
Zinco	(mg/l)	0,7	0,1	0,3	< 0,01	< 0,01	0,6	1,9	16,3	1,8	5,0
Bário	(mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,4	< 0,01	< 0,01	0,2	0,5	0,1	5,0
Prata	(mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,1
Boro	(mg/l)	0,01	0,07	0,17	0,21	0,01	0,4	0,06	0,23	0,13	5,0
Nitrogênio Amoniacal	(mg/kg)	0,05	0,03	0,04	0,2	0,17	0,18	0,24	0,98	0,5	20,0

5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório para o solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso. As análises desenvolvidas consistem em avaliar o comportamento mecânico e hidráulico do solo e do fosfogesso bem como a influência da adição de variados teores de fosfogesso ao solo tropical fino estudado.

5.1.1 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

É apresentado na Tabela 5.1 os percentuais em massa de areia, silte e argila do solo e do fosfogesso. Para o solo é possível verificar que a adição de defloculante promoveu a quebra das concreções formadas pelas cimentações das partículas menores. Essas partículas consistem em silte e argila, pois cerca de 60% da fração areia é desagregada pela ação do defloculante. Este tipo de comportamento evidencia que o solo estudado é de comportamento laterítico. Com o fosfogesso o mesmo comportamento é bastante minimizado, pois apenas uma pequena fração de silte é transformada em argila pela ação de defloculante. O mesmo comportamento foi observado por Rufo (2009) e é explicado pelo fato dos cristais do fosfogesso não possuírem característica de se agregarem.

Tabela 5.1 - Frações granulométricas representativas do solo e fosfogesso

Amostra	Sem defloculante			Com defloculante		
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo	87,4	11,1	1,3	34,4	22,9	42,6
Fosfogesso	16,6	81,7	1,7	16,5	78,3	5,2

Com base nos resultados de granulometria apresentados para as misturas sem e com uso de defloculante, surgiu a necessidade de verificar se os diferentes percentuais de solo e fosfogesso utilizados para a formação de cada mistura obedecem o quantitativo teórico. Logo, a Tabela 5.2 apresenta os percentuais de areia, silte e argila teóricos e destaca os obtidos nos ensaios. Os dados teóricos foram obtidos utilizando os resultados da Tabela 5.1, sendo retirados os percentuais de solo e fosfogesso relativos a cada mistura.

Para as misturas, no ensaio sem defloculante o percentual teórico de areia esperado não foi atendido, ou seja, os valores obtidos no ensaio foram menores. No caso do silte, acontece o contrário, os valores obtidos no ensaio são maiores do que os esperados na teoria, e para a fração argila há pouca alteração na comparação dos dois valores. Dessa forma, dois aspectos podem afetar os resultados. O primeiro está associado à utilização da betoneira com a

finalidade de homogeneizar as misturas. Diante dos resultados analisados há evidências que o seu uso provoca a quebra das concreções do solo presentes na fração areia e também dos bastões do fosfogesso devido ao atrito com o solo, o que gera a diminuição das dimensões dos materiais acarretando no aumento da fração silte. Além disso, a adição do fosfogesso no solo altera o pH da mistura o que pode afetar de forma decisiva na ação do agente defloculante.

Tabela 5.2 - Frações granulométricas teóricas e obtidas através do ensaio das misturas

Teor de fosfogesso (%)	Origem dos dados	Sem defloculante			Com defloculante		
		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
10	Teórico	80,3	18,2	1,3	32,6	28,4	38,9
	Ensaio	75,9	23,6	0,4	60,3	31,7	8,0
20	Teórico	73,2	25,2	1,4	30,8	34,0	35,1
	Ensaio	60,9	38,2	0,8	58,9	37,0	4,0
50	Teórico	52,0	46,4	1,5	25,5	50,6	23,9
	Ensaio	45,9	53,2	0,8	36,8	59,5	3,6

Da mesma forma como o que foi tratado anteriormente, a Tabela 5.2 mostra que o ensaio com uso de defloculante apresenta um aumento na fração silte em comparação ao valor teórico esperado, mas por outro lado, as frações de areia e argila são fortemente influenciadas com o seu uso. Pequenos teores de fosfogesso como 10% e 20% são suficientes para que os valores de areia obtidos através do ensaio sejam quase o dobro dos valores teóricos esperados. Quanto ao percentual de argila esperado, é verificado que apenas uma pequena parte é medida na etapa de sedimentação. Este comportamento indica que provavelmente está havendo alguma reação entre o solo, o fosfogesso e o agente defloculante, na qual esta age de modo a impedir que as ligações das partículas sejam desfeitas inibindo a ação desagregadora do defloculante. Nas misturas solo-fosfogesso executadas por Mesquita (2007), Rufo (2009) e Metogo (2010) foi observado fenômeno inibidor semelhante.

5.1.2 PERMEABILIDADE DAS AMOSTRAS

Com relação aos resultados de coeficiente de permeabilidade a 20°C das amostras apresentados no capítulo anterior, é possível verificar na Figura 5.1 que nos dois diferentes gradientes hidráulicos utilizados, estes coeficientes de permeabilidade, ao serem comparados entre si, apresentam a mesma tendência à medida que o teor de fosfogesso é aumentado.

Na Figura 5.1 observa-se também que os menores coeficientes de permeabilidade obtidos foram para a mistura com 10% de fosfogesso em sua composição. Este comportamento pode ser explicado pela distribuição granulométrica obtida para a Mistura A, pois três dos fatores

que determinam a magnitude do coeficiente de permeabilidade são a disposição e distribuição dos finos presentes na amostra e o índice de vazios apresentado pela amostra. Amer & Awad (1974) citados por Das (2008) mostram que há uma relação entre o coeficiente de permeabilidade com o coeficiente de não uniformidade, o diâmetro de 10% passando e o índice de vazios apresentado pelo corpo de prova, conforme expresso na equação abaixo:

$$k = C_1 D_{10}^{2,32} C_U^{0,6} \frac{(e^3)}{(1+e)} \quad (5.1)$$

onde k é o coeficiente de permeabilidade, C_1 é uma constante, D_{10} é o diâmetro de 10% passando, C_U é o coeficiente de não uniformidade.

Sabe-se que para os solos com características granulares como é o caso das amostras analisadas no ensaio sem defloculante, exceto para o fosfogesso (que é constituído em sua maioria por silte), que quanto maior o coeficiente de não uniformidade mais bem graduado é o material, possuindo este maior fechamento dos vazios. A Mistura A se enquadra nesta situação e a Figura 5.2 mostra a relação do C_U e do índice de vazios com os diferentes teores de fosfogesso adicionados ao solo.

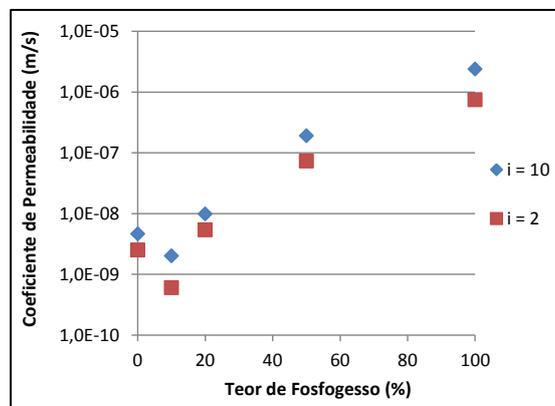


Figura 5.1 - Coeficientes de permeabilidade em distintos gradientes hidráulicos.

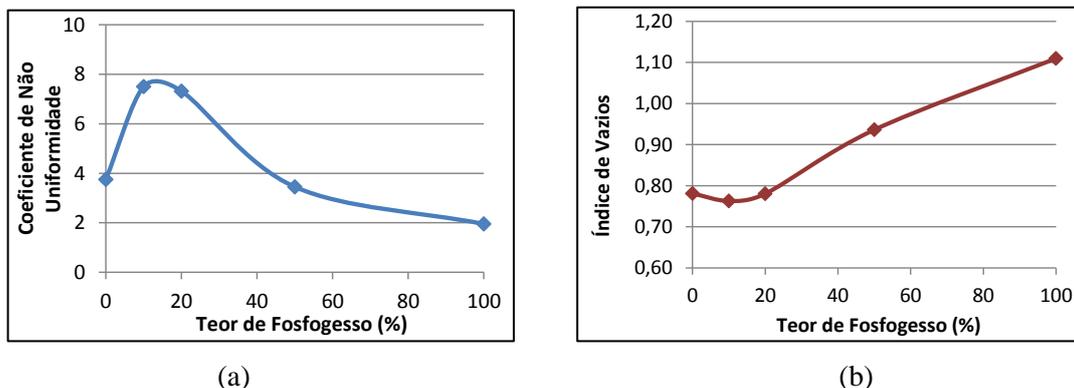


Figura 5.2 - Propriedades das amostras *versus* teor de fosfogesso: (a) C_U ; (b) índice de vazios.

Analisando-se a Figura 5.2(a), observa-se que o teor de 10% de fosfogesso apresenta um C_U maior que o do solo, demonstrando-se que esta mistura apresenta um material mais bem graduado. Como o fosfogesso apresenta excesso de silte, uma pequena parte deste foi incorporada nesta mistura de forma a melhorar sua distribuição granulométrica, e conseqüentemente fazer com que houvesse uma leve diminuição do índice de vazios como pode ser verificado na Figura 5.2(b).

Outro fator que influi na variação do coeficiente de permeabilidade e é de grande importância na execução de projetos de geotecnia, é a variação da tensão atuante nas amostras. Diferentes tensões implicam em diferentes permeabilidades e, devido ao fechamento dos vazios, é possível verificar que o coeficiente de permeabilidade é inversamente proporcional ao aumento de tensão. Através do ensaio oedométrico é possível obter tais coeficientes em função da tensão atuante, conforme é mostrado nas Figuras 5.3 e 5.5.

Na Figura 5.3, são mostrados os valores dos coeficientes de permeabilidade retirados do ensaio oedométrico. Estes valores são função do coeficiente de variação volumétrica, do peso específico da água e do coeficiente de adensamento vertical. Para esses parâmetros citados, apenas o c_v é obtido por meio gráfico, ou seja, este é função do formato da curva de adensamento, portanto susceptível a apresentar erros. Desta forma, devido ao comportamento apresentado pelas amostras, observa-se que estes valores de permeabilidade não traduzem o real comportamento das amostras submetidas a uma tensão confinante frente à percolação d' água.

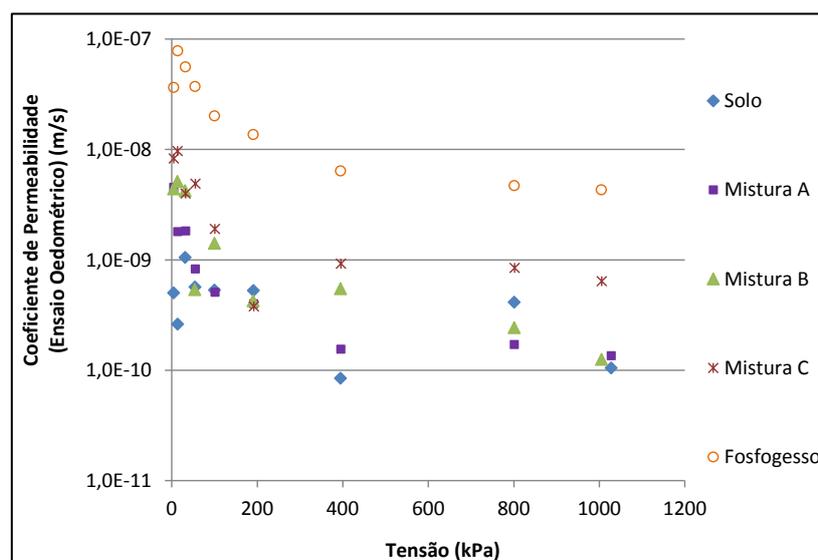


Figura 5.3 - Coeficientes de permeabilidade obtidos através do ensaio oedométrico.

Tais resultados incoerentes apresentados na Figura 5.3 são explicados devido à dificuldade de se expressar o real c_v das amostras estudadas. Nas Figuras 5.4a e 5.4b observa-se que não é possível à obtenção dos tempos correspondentes a 90% do adensamento (t_{90}) e 50% do adensamento (t_{50}) utilizados para o cálculo do coeficiente de adensamento empregando-se as metodologias de Taylor e Casagrande respectivamente.

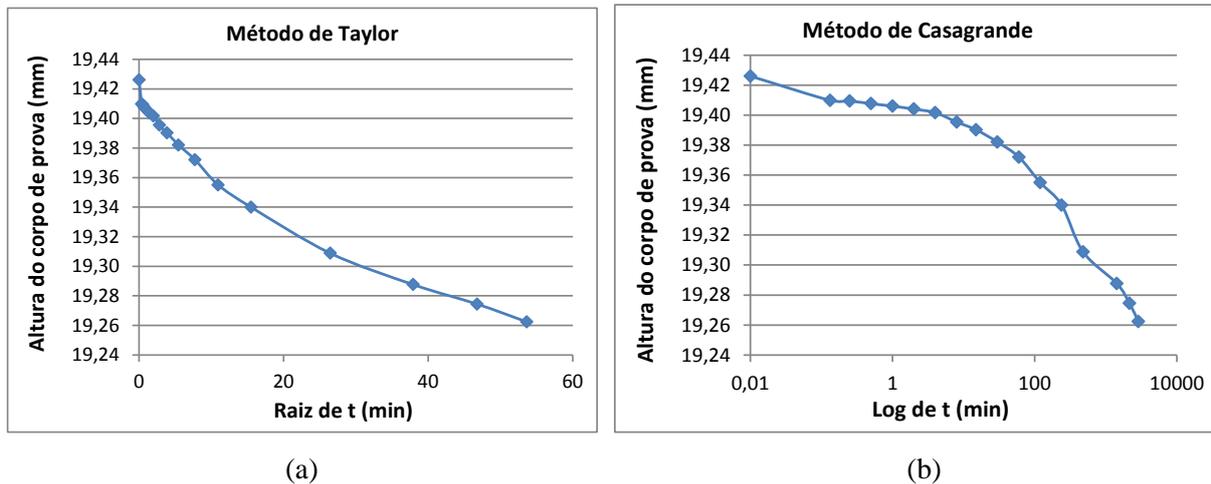


Figura 5.4 - Gráficos de adensamento para obtenção do c_v da Mistura C submetida a uma tensão de 50 kPa: (a) método de Taylor; (b) método de Casagrande.

Por outro lado, Das (2008) mostra que o coeficiente de permeabilidade pode ser função de uma constante e do índice de vazios apresentado no ensaio oedométrico, conforme é mostrado na equação abaixo:

$$k = C_1 \frac{(e^3)}{(1+e)} \quad (5.2)$$

onde k é o coeficiente de permeabilidade e C_1 é uma constante.

O valor dessa constante pode ser estimado através do coeficiente de permeabilidade obtido pelo permeâmetro e do índice de vazios inicial (e_0) apresentado pelas amostras no ensaio oedométrico. Desta forma, todos os outros coeficientes de permeabilidade que serão calculados em função da tensão atuante, terão relação com a variação do índice de vazios obtidos no ensaio oedométrico. A Figura 5.5 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade corrigidos (k_{corr}) das amostras em função da tensão atuante.

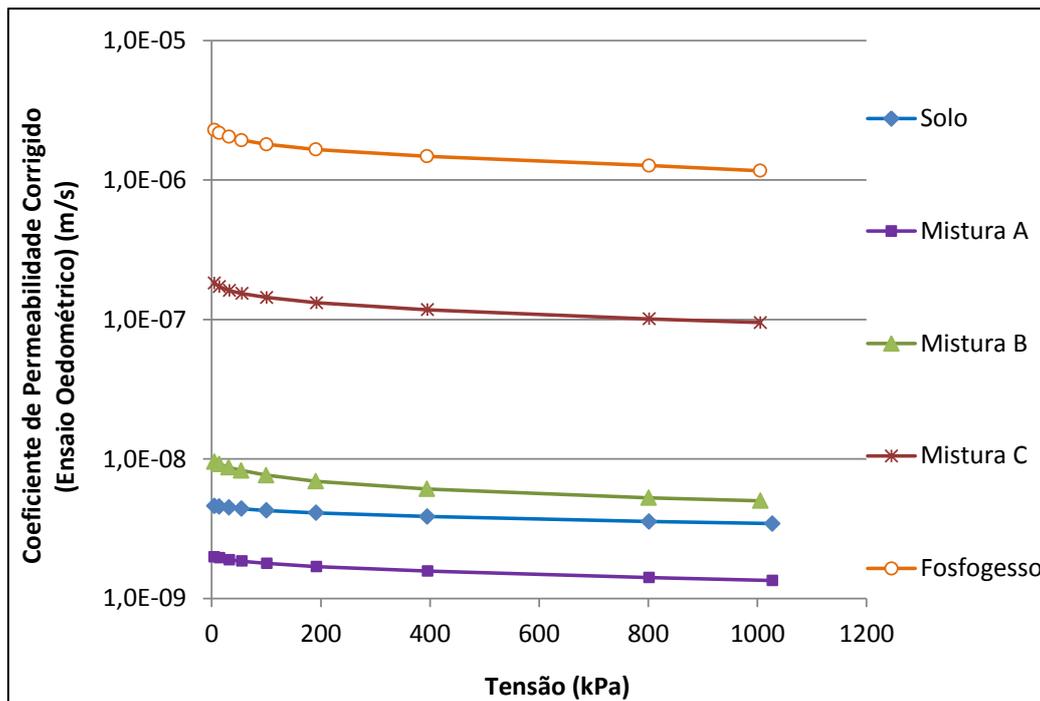


Figura 5.5 - Coeficientes de permeabilidade corrigidos obtidos através do ensaio oedométrico.

Desta forma, acredita-se que os resultados da Figura 5.5 são mais condizentes com a realidade das amostras compactadas na umidade ótima, pois de fato são utilizados os índices de vazios apresentados no ensaio de adensamento, sem as distorções causadas por um coeficiente de adensamento vertical erroneamente determinado.

5.1.3 ANÁLISE DO ENSAIO DE ADENSAMENTO

No Capítulo 4 foram apresentadas as curvas de adensamento obtidas para as amostras saturadas de solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso de acordo com a metodologia adotada, descrita no Capítulo 3. Com a finalidade de enriquecer as análises em relação ao comportamento mecânico das amostras, foram acrescentadas as curvas de adensamento do solo e da Mistura C submetidos a um período de adensamento igual a 24 horas entre cada aplicação de carga.

Estas curvas são apresentadas na Figura 5.6 de forma normalizada em relação ao seu índice de vazios inicial visando permitir uma comparação visual mais direta dos resultados. Analisando-se as duas curvas do solo, é verificado que o fator tempo interfere nas respostas que os corpos de prova transmitem quando submetidos à aplicação de carregamentos unidirecionais. Nesse caso, o adensamento do corpo de prova submetido a uma aplicação de carga durante 48 horas é maior do que quando submetido à mesma carga por um período igual

a 24 horas. O mesmo fenômeno é observado nas duas curvas referentes à Mistura C, porém, agora este comportamento apresentado é uma soma das propriedades inerentes ao solo e ao fosfogesso. Estas diferenças entre os adensamentos do solo e da Mistura C são representados pelos deslocamentos d_1 e d_2 , respectivamente. Tomando-se como referência as duas curvas do solo pode-se inferir também que o valor da carga aplicada é diretamente proporcional à sua variação do índice de vazios.

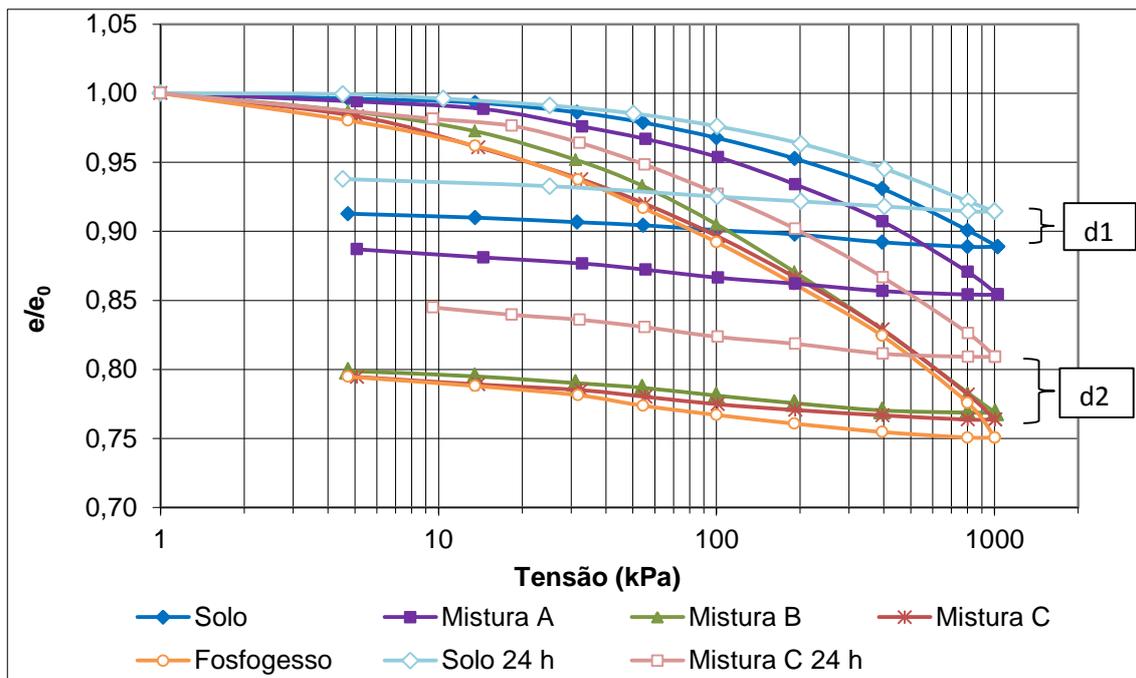


Figura 5.6 - Curvas de adensamento normalizadas das amostras estudadas.

Levando em consideração apenas o ensaio com maior tempo de adensamento, verifica-se na Figura 5.6 que as amostras com 20% (Mistura B), 50% (Mistura C) e 100% de fosfogesso apresentam praticamente a mesma deformabilidade. Este comportamento é explicado pela maior influência que determinado teor de fosfogesso tem sobre o comportamento mecânico das amostras.

Tendo como referência a Figura 5.6, nota-se que o adensamento do solo e, conseqüentemente das misturas, agravadas pelo efeito de não estabilização do fosfogesso, são dependentes do tempo destinado ao adensamento. Ao final do último estágio de carga, as duas curvas do solo e da Mistura C possuem variação do índice de vazios, sendo que a variação da Mistura C é maior que a do solo. Portanto, no caso da utilização de misturas do solo Aparecida de Goiânia com fosfogesso ou somente do fosfogesso, as análises do ensaio de adensamento informam

que o tempo de consolidação é um fator primordial na análise dos recalques e das deformações que poderão ocorrer.

Conforme pode ser visto nas microfotografias mostradas no Capítulo 4, a partir de 20% de fosfogesso misturado ao solo, é possível notar a surgência significativa dos grãos do fosfogesso em relação aos grãos do solo. Este maior envolvimento dos grãos do fosfogesso sobre os grãos do solo ditam as características de deformabilidade das amostras.

As Figuras 5.7a e 5.7b mostram os deslocamentos verticais sofridos pelo solo e fosfogesso, respectivamente, quando submetidos a uma carga de 400 kPa. Para o solo verifica-se a possibilidade de se utilizar a metodologia de Taylor para o cálculo dos coeficientes de adensamento vertical, não sendo a mesma aplicável para o fosfogesso e demais misturas.

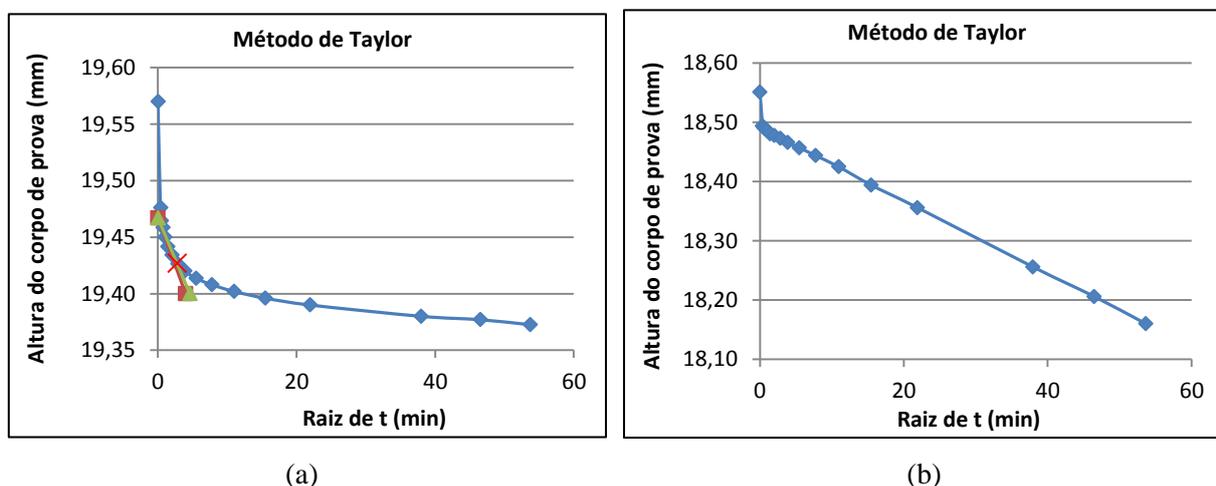


Figura 5.7 - Deslocamentos verticais dos corpos de prova submetidos a tensão de 400 kPa: (a) solo; (b) fosfogesso.

No ensaio de adensamento, para o cálculo dos coeficientes de adensamento vertical e da tensão de pré-adensamento é utilizada a teoria do adensamento. Essa teoria está baseada em hipóteses como: a camada argilosa deve estar completamente saturada; a água e as partículas são incompressíveis; a lei de Darcy é aplicável; a permeabilidade é constante etc. Para o fosfogesso, como este é um resíduo resultante de um processo industrial, não é possível estabelecer um entendimento de que suas partículas possam ser avaliadas de acordo com a teoria de Terzaghi. Portanto, não se sabe com exatidão, por exemplo, se os grãos do fosfogesso são incompressíveis como os grãos do solo.

Outra hipótese que pode ajudar a explicar o comportamento assumido pelo fosfogesso é a eventual quebra de grãos que pode estar ocorrendo, associada ou não à presença de

adensamento secundário. Este comportamento que os grãos de fosfogesso induziram nas Misturas B e C trouxeram consequências nas curvas de adensamento, pois para os níveis de tensão aplicados à reta virgem não foi definida adequadamente, impossibilitando assim a determinação correta da tensão de pré-adensamento e dos índices de compressão, descompressão e recompressão.

Na análise das curvas de adensamento mostradas na Figura 5.6, outra propriedade importante que pode ser destacada é a rigidez. Tendo como referência o solo, à medida que o teor de fosfogesso aumenta, a mistura resultante vai se tornando menos rígida.

A partir Figura 5.8, que mostra a deformação volumétrica sofrida pelas amostras, pode-se inferir que existe um limite para a diminuição desta rigidez, ou seja, a partir de um teor crítico de fosfogesso, o comportamento do solo é fortemente influenciado. Neste caso as misturas com teores maiores que 20% de fosfogesso assumem comportamentos mecânicos bem próximos ao do fosfogesso puro. Mais uma vez, esta informação é extremamente relevante nos projetos de geotecnia envolvendo os recalques das camadas provenientes das misturas solo-fosfogesso.

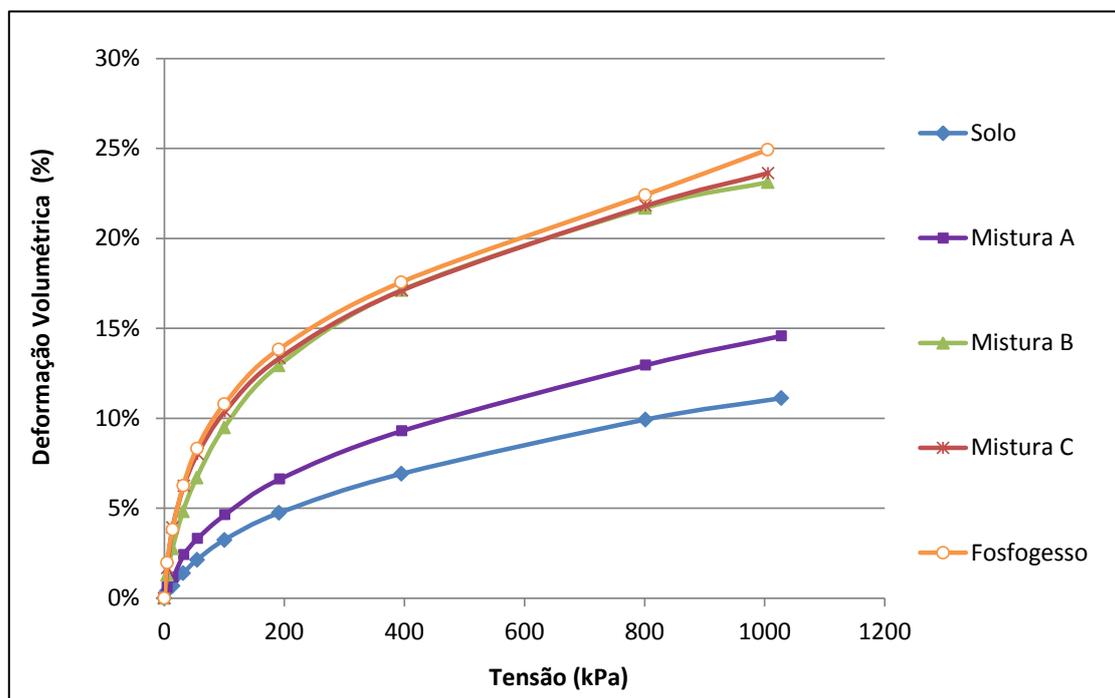


Figura 5.8 - Deformações obtidas no ensaio oedométrico.

Para avaliação dos recalques sofridos ao longo do tempo em um aterro construído com as amostras estudadas, uma análise preliminar e aceitável para a obtenção do coeficiente de

adensamento vertical é dada a partir da permeabilidade corrigida que leva em consideração a variação dos índices de vazios do ensaio oedométrico (Figura 5.5). Pode-se escrever o c_v em função do k_{corr} , do m_v e do peso específico da água conforme é mostrado na seguinte equação:

$$c_v = \frac{k_{corr}}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (5.3)$$

onde c_v é o coeficiente de adensamento vertical, k_{corr} é o coeficiente de permeabilidade corrigido, γ_w é o peso específico da água e o m_v é o coeficiente de variação volumétrica.

Desta forma, para a metodologia utilizada neste estudo na avaliação do coeficiente de adensamento do solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso, acredita-se que os valores encontrados para o c_v das amostras estudadas mostrados na Figura 5.9, são mais adequados do que qualquer outra forma de obtenção, principalmente em relação à metodologia utilizada pela NBR12007/1990. Isso porque não foi possível a obtenção dos tempos t_{90} e t_{50} necessários para o cálculo do coeficiente de adensamento utilizando as metodologias de Taylor e Casagrande respectivamente.

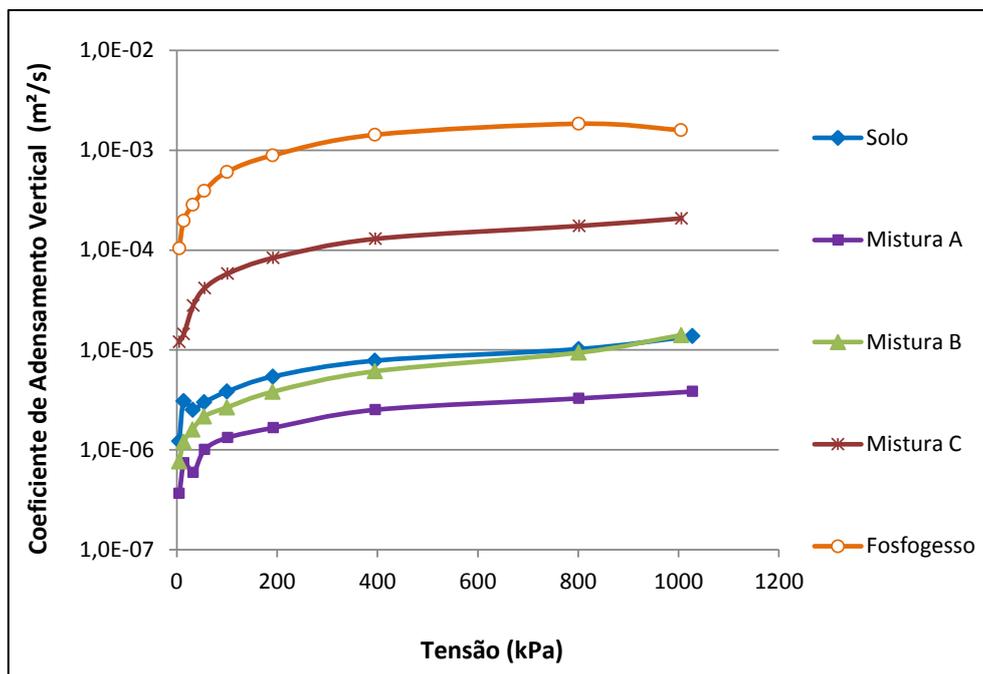


Figura 5.9 - Coeficientes de adensamento vertical obtidos através do k_{corr} .

5.1.4 ANÁLISE DO CISALHAMENTO DIRETO

A seguir, serão mostradas novamente nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 as trajetórias de resistência desenvolvidas pelas amostras saturadas no ensaio de cisalhamento direto. Contudo,

agora as trajetórias de cada amostra são agrupadas segundo o valor da tensão normal atuante antes do cisalhamento. Desta forma, é possível comparar os valores de resistência de pico e residual apresentados por cada amostra.

Analisando os carregamentos de 50 kPa e 100 kPa, verifica-se que o solo apresenta comportamento similar aos solos pré-adensados, apresentando resistência de pico, pois como foi visto, sua tensão de pré adensamento supera estes valores de carregamento. O comportamento pós-pico visualizado é de amolecimento, ou seja, o material perde resistência com o aumento da deformação. Para a Mistura A é verificado o mesmo comportamento de material pré-adensado.

Nas trajetórias das Misturas B e C também observa-se a ocorrência de picos de resistência máxima, mesmo que bastantes moderados, como no caso da Mistura B. Contudo, como essas misturas possuem forte influência do fosfogesso, que sob as tensões atuantes, apresenta-se como um material normalmente adensado, neste caso, não é possível dizer com clareza que os picos das misturas são decorrentes dos materiais estarem pré-adensados ou devido a eventual quebra de grãos, pois como discutido no item 4.4.1 do capítulo anterior onde se apresenta a Figura 4.35, a própria geometria em forma de bastões do fosfogesso pode induzir essas quebras.

Analisando-se a Figura 5.11 e comparando-a com a Figura 5.10, observa-se que à medida que a tensão normal aumenta, as amostras que possuem algum teor de fosfogesso vão se rearranjando de modo a possuírem resistências residuais próximas.

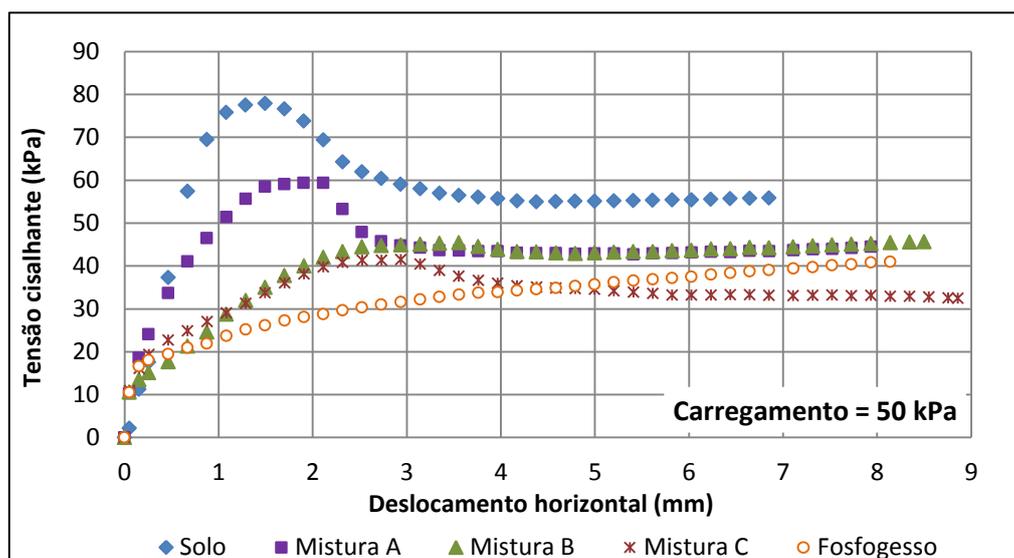


Figura 5.10 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 50 kPa.

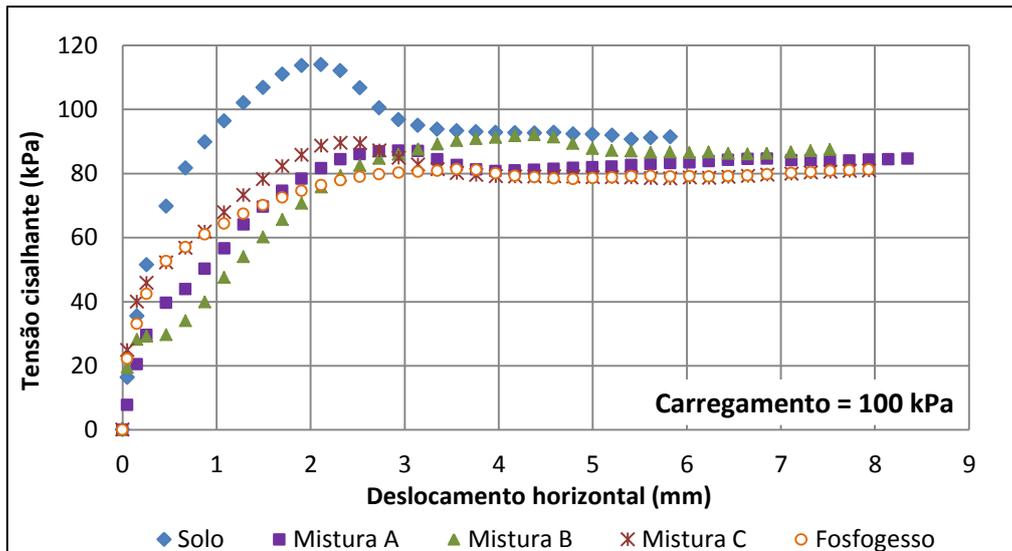


Figura 5.11 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 100 kPa.

Na Figura 5.12 destacam-se as proximidades das trajetórias residuais do solo e do fosfogesso, e também das misturas solo-fosfogesso. Considerando a resistência ao cisalhamento do solo como boa, o mesmo comportamento obtido pelo fosfogesso não era esperado, pois, o fosfogesso di-hidratado puro possui alto índice de desagregação quando submerso e como foi mostrado Mesquita (2007), este apresenta uma péssima capacidade de suporte.

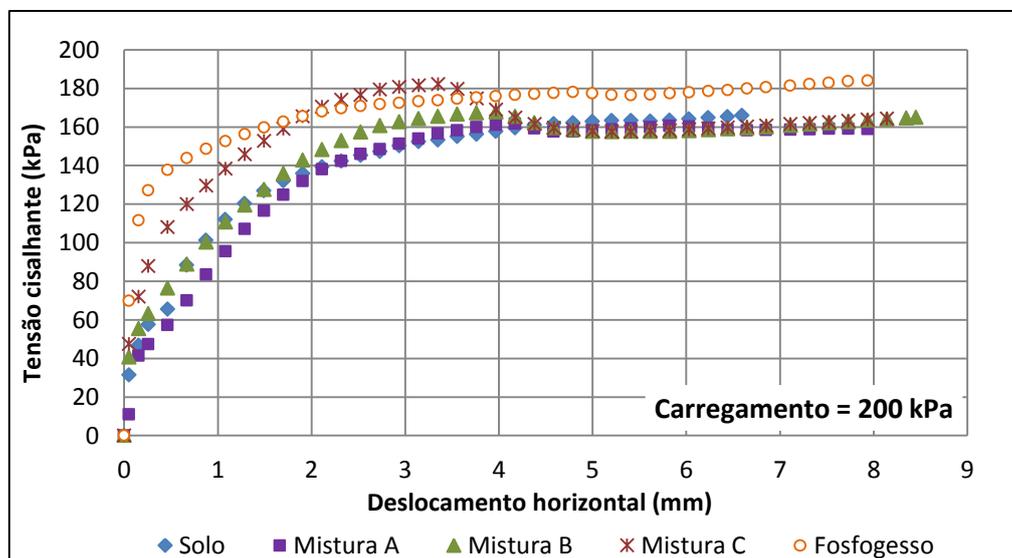


Figura 5.12 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 200 kPa.

Para explicar os comportamentos mostrados, a partir deste momento é levantada a hipótese de que resistência adquirida pelo fosfogesso e suas misturas com solo é devido aos cristais presentes neste tipo de fosfogesso estudado. Acredita-se que diante de elevadas tensões confinantes, estes cristais promovem um entrelaçamento entre si de modo a formar uma

cadeia fechada de grãos, em que é necessário um alto valor de energia para vencer o atrito formado entre estas partículas, ou até mesmo quebrá-las, destruindo por completo a sua forma de bastões alongados na região do plano de ruptura.

Por outro lado, os picos de resistência ao cisalhamento das misturas poderiam ter relações com a sucção das amostras, contudo, como as amostras foram ensaiadas no estado saturado, esta hipótese é descartada na explicação do fenômeno.

A mesma analogia é feita para os altos valores de tensão normal aplicada, como pode ser visto na Figura 5.13, que mostra as tendências idênticas das trajetórias residuais de todas as amostras. Desta forma, como o fosfogesso e o solo apresentam proximidades com os valores de resistência residual, as suas misturas de forma análoga também irão apresentar comportamento semelhante.

Observa-se também na Figura 5.13 que as trajetórias de resistência ao cisalhamento apresentam comportamento dúctil, sem um pico definido. Assim, pode-se dizer que a resistência permanece aproximadamente constante até o fim do ensaio.

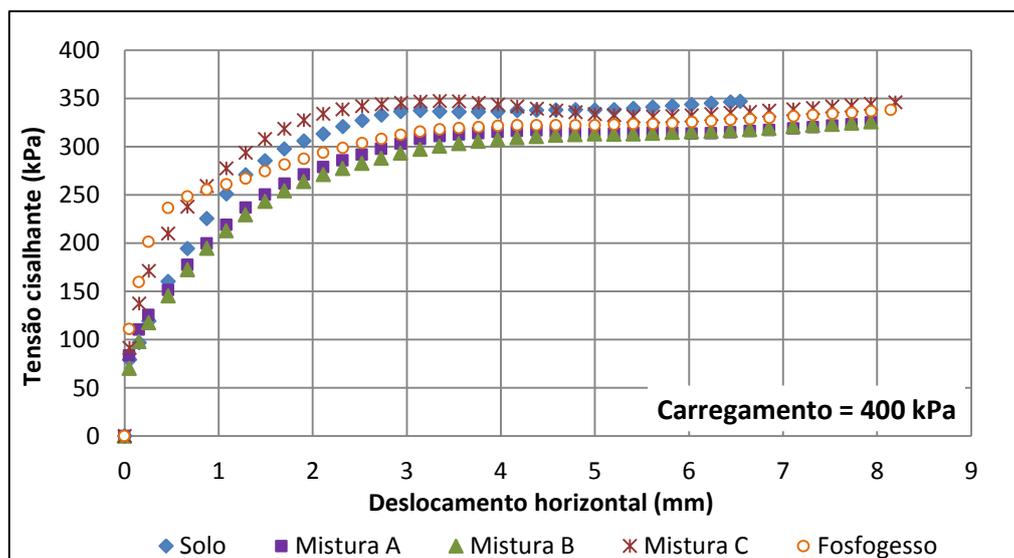


Figura 5.13 - Trajetórias de resistência com carregamento igual a 400 kPa.

Conforme apresentado no capítulo anterior, a Tabela 5.3 a seguir apresenta o resumo dos valores de ângulo de atrito e do intercepto de coesão efetivos, obtidos através das diversas trajetórias de cisalhamento anteriormente mostradas. Em acréscimo na mesma tabela, é mostrado o teor de silte presentes nas amostras estudadas.

Tabela 5.3 - Parâmetros de resistência efetivos das amostras e teor de silte

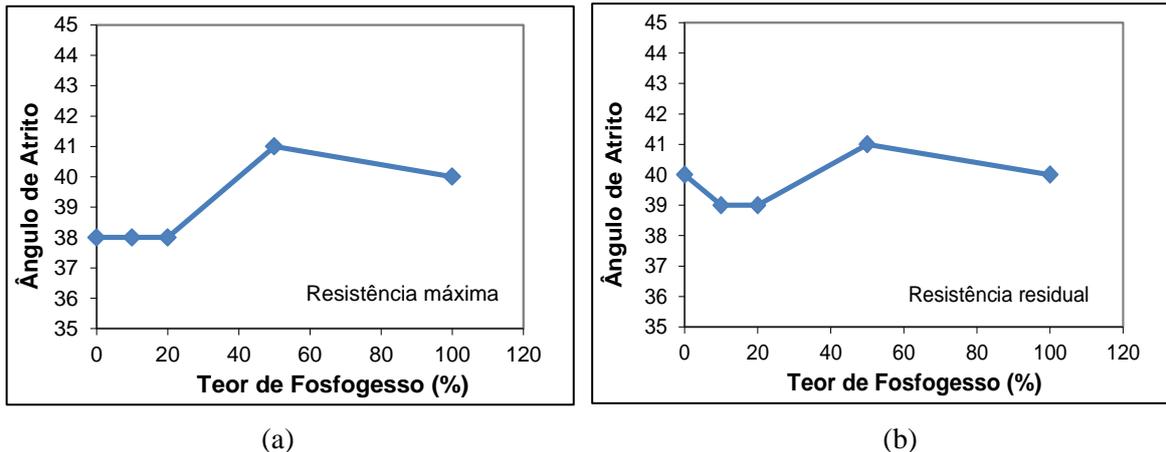
Teor de Fosfogesso (%)	Resistência máxima		Resistência residual		Teor de Silte (%)
	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	
0	38	37,5	40	11,0	22,9
10	38	14,0	39	4,2	31,7
20	38	9,1	39	4,9	37,0
50	41	2,1	41	0,1	59,5
100	40	1,0	40	1,7	78,3

Após análise prévia dos resultados apresentados pela Tabela 5.3, nota-se que os valores de ângulo de atrito efetivo não seguem um padrão de variação proporcional ao incremento de fosfogesso. Por outro lado, o valor do intercepto de coesão efetiva das amostras diminui à medida que o teor de fosfogesso aumenta.

As Figuras 5.14a e 5.14b que levam em consideração a resistência máxima e residual respectivamente, mostram como o ângulo de atrito efetivo varia com acréscimo de fosfogesso no solo.

Pode-se considerar que a presença de fosfogesso pouco influi na variação do atrito entre as partículas das amostras, pois a adição ou retirada em massa de 50% dos grãos de fosfogesso faz com que o ângulo de atrito varie no máximo 3°. Para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa o solo e as Misturas A, B e C apresentam picos que atingem a resistência máxima. É devido a este valor de resistência máxima que o ângulo de atrito efetivo do solo e das Misturas A e B são ligeiramente diferentes dos valores encontrados nas envoltórias de resistência residual.

Para a Mistura C os valores dos picos apresentados não influenciaram na variação do ângulo de atrito o mesmo acontecendo para o fosfogesso, que apresentou envoltórias praticamente iguais.

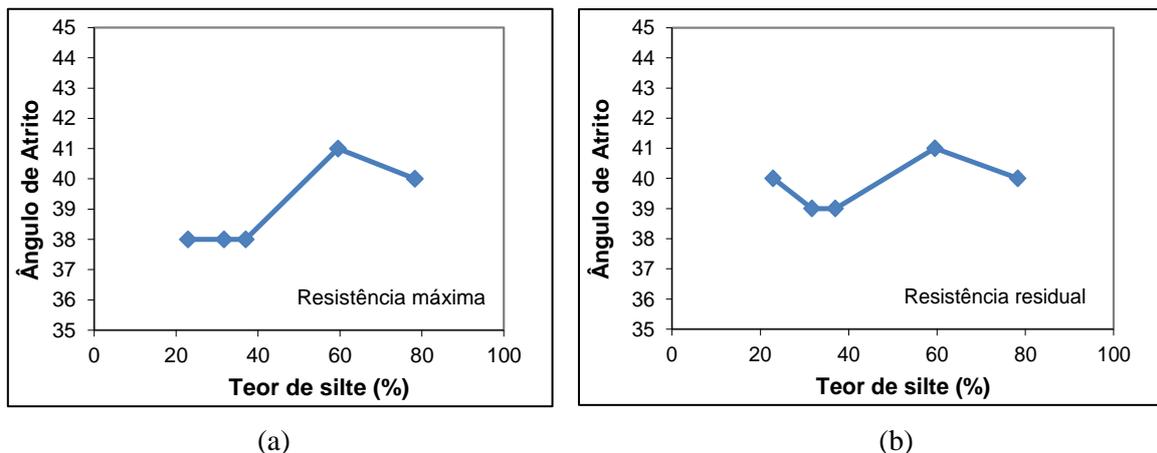


(a)

(b)

Figura 5.14 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de fosfogesso: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.

Na Figura 5.15, optou-se por mostrar a variação do ângulo de atrito efetivo em função do teor de silte, visto que foi observado que desde os menores teores de fosfogesso acrescentados ao solo, foi verificada que o fosfogesso, ou seja, as partículas siltosas promovem forte influência nas propriedades mecânicas e hidráulicas do solo.



(a)

(b)

Figura 5.15 - Variação do ângulo de atrito efetivo com o teor de silte: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.

Da mesma forma, as Figuras 5.16a e 5.16b apresentam como o aumento do teor de silte influencia nos valores do intercepto de coesão efetiva. Teoricamente este comportamento já era esperado, pois, solos constituídos em sua maior parte por esta fração granulométrica, normalmente apresentam baixa coesão. Diferentemente do atrito existente entre as partículas, um pequeno acréscimo de fosfogesso ao solo estudado é capaz de diminuir a sua coesão significativamente, logo, essa informação deve ser levada estritamente em consideração nos projetos de geotecnia que envolvem estabilidades das massas solo-fosfogesso.

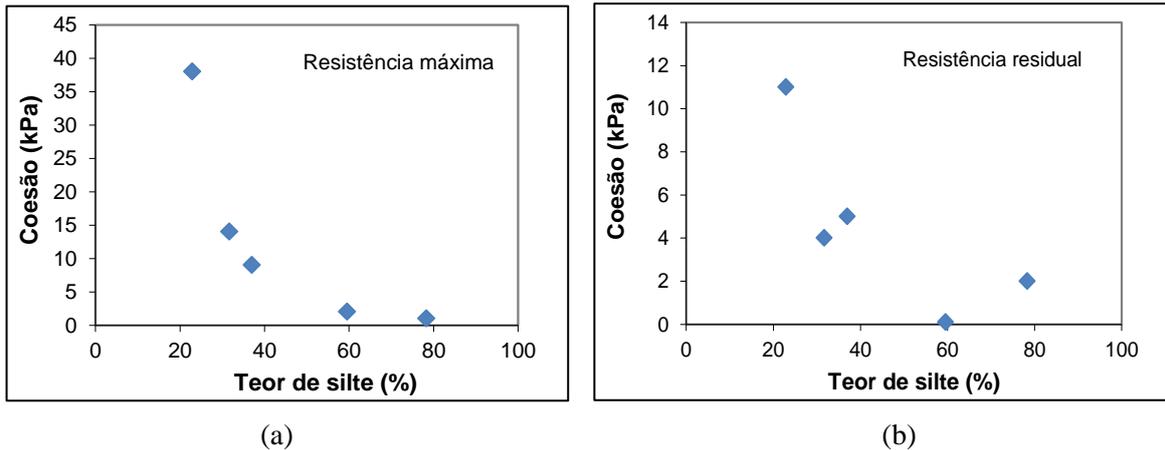


Figura 5.16 - Variação do intercepto de coesão efetiva com o teor de silte: (a) envoltória de resistência máxima; (b) envoltória de resistência residual.

Sendo assim, as resistências ao cisalhamento das amostras estão diretamente associadas ao teor de silte presente, por ser esta a principal fração granulométrica do fosfogesso e ditar o comportamento mecânico e hidráulico das misturas solo-fosfogesso.

Outra questão a ser analisada é como o tempo de consolidação do corpo de prova pode interferir nos parâmetros de resistência. Geralmente, para os solos tropicais goianos, o tempo de consolidação igual a 12,5 horas inicialmente proposto, seria mais que suficiente para ser inicializada a fase de cisalhamento. Por outro lado, foi visto que a adição de fosfogesso retarda a estabilização das curvas de consolidação.

A Figura 5.17 mostra o deslocamento vertical sofrido pelo corpo de prova da Mistura C submetida a uma tensão vertical de 100 kPa. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tempo de consolidação igual aos dois tempos marcados.

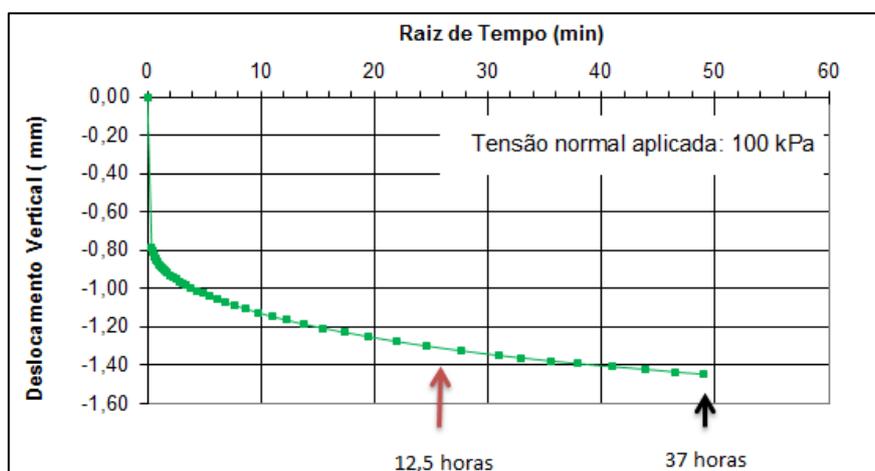
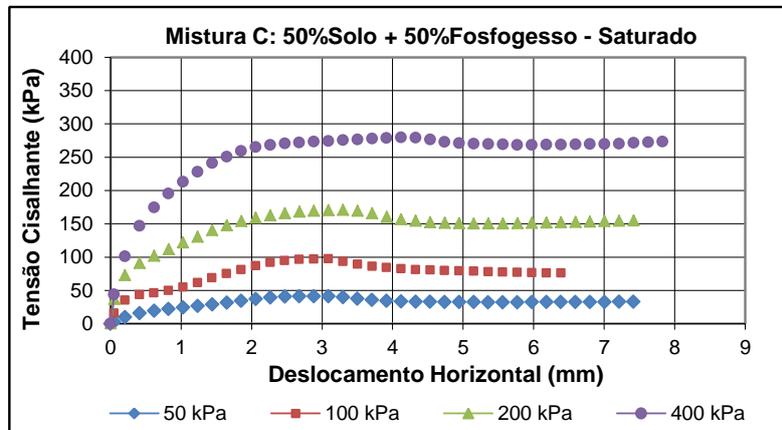
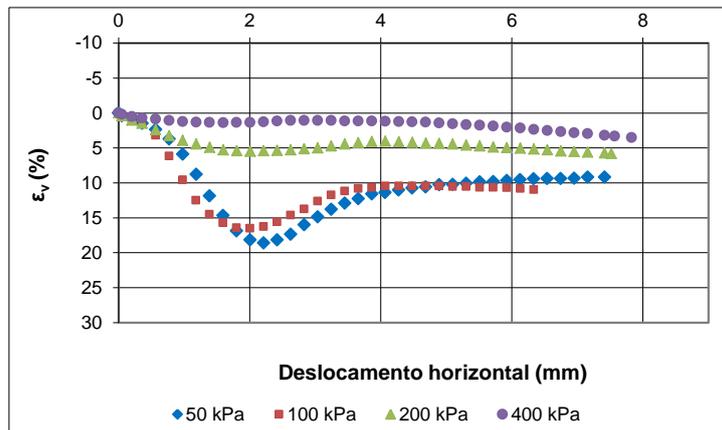


Figura 5.17 - Consolidação da Mistura C em função do tempo.

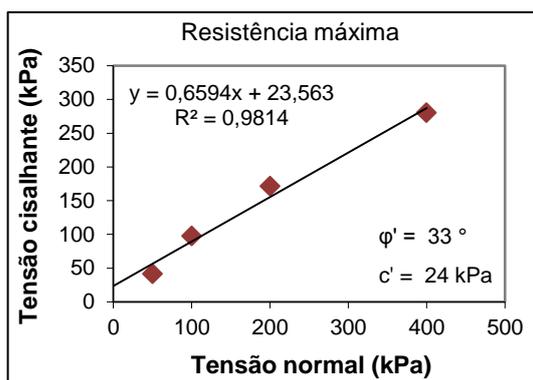
Os resultados do ensaio com 37 horas de consolidação já foram apresentados no capítulo anterior. Agora, serão mostrados na Figura 5.18 os resultados obtidos com um tempo menor de consolidação.



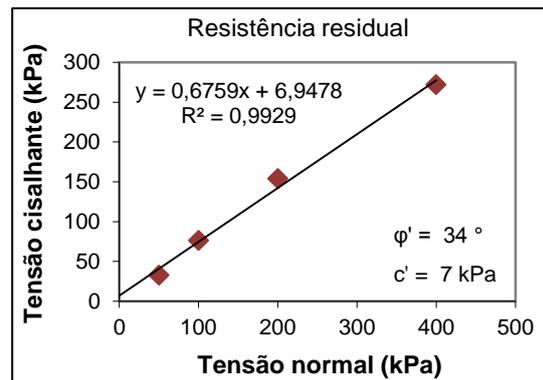
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.18 - Resultados do cisalhamento direto para a Mistura C, submetida a 12,5 horas de consolidação: (a) trajetórias de resistência; (b) deformação volumétrica *versus* deslocamento horizontal; (c) envoltória de ruptura para resistência máxima; (d) envoltória de ruptura para resistência residual.

Comparando os dois resultados (Tabela 5.4) das envoltórias relativas às resistências máxima e residual, verifica-se uma relevante diferença no atrito presente na superfície de ruptura. O aumento do tempo destinado ao adensamento gerou uma diferença de 8° e 7°, respectivamente, no ângulo de atrito efetivo, o que corrobora a importância atribuída aos tempos de adensamento não usuais com relação ao comportamento mecânico das amostras estudadas. Por trás de tudo isto sabe-se que está havendo fechamento de vazios, seja por: quebra de grãos, entrelaçamento de cristais do fosfogesso, *creep*, entre outros, o que gera melhora no comportamento mecânico das amostras que possuem teores de fosfogesso conforme foi mostrado.

Tabela 5.4 - Comparação entre os parâmetros de resistência obtidos para a Mistura C com diferentes tempos de adensamento do corpo de prova

Amostra	Tempo de adensamento (horas)	Resistência máxima		Resistência residual	
		ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Mistura C	37	41	2,1	41	0,1
	12,5	33	24,0	34	7,0

Para complementar a análise sobre a resistência das amostras, foi realizado um ensaio de cisalhamento direto cíclico, semelhante ao executado por Mascarenha (2003). A metodologia utilizada foi idêntica à utilizada para os ensaios de cisalhamento anteriores. Neste ensaio foi escolhida a Mistura B, por apresentar forte influência do fosfogesso e por ser constituída predominantemente por grãos de solo. A Figura 5.19 mostra o comportamento da amostra em termos da tensão cisalhante atingida, com a legenda da figura identificando as tensões normais aplicadas e as trajetórias em primeiro e segundo ciclo de cisalhamento.

No 1° ciclo nas tensões de 50 kPa e 100 kPa é notado comportamento frágil, caracterizado por pico. Na tensão de 200 kPa nota-se um comportamento de material normalmente adensado, diferentemente da tensão de 400 kPa que apresenta leve dilatância, porém atribuída a alguma anormalidade do ensaio.

Já no 2° ciclo observa-se que houve plastificação na ruptura para as tensões de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, ou seja, as tensões de ruptura aumentaram em relação ao ciclo anterior. Acredita-se que este aumento de resistência é devido à reestruturação dos grãos da amostra e, portanto, a maior interação entre as partículas. Essas diferenças nas resistências podem ser

uma evidência de quebra de grãos. O mesmo comportamento foi observado por Mascarenha (2003) ao ensaiar sob condições drenadas um solo tropical poroso da região de Brasília - DF.

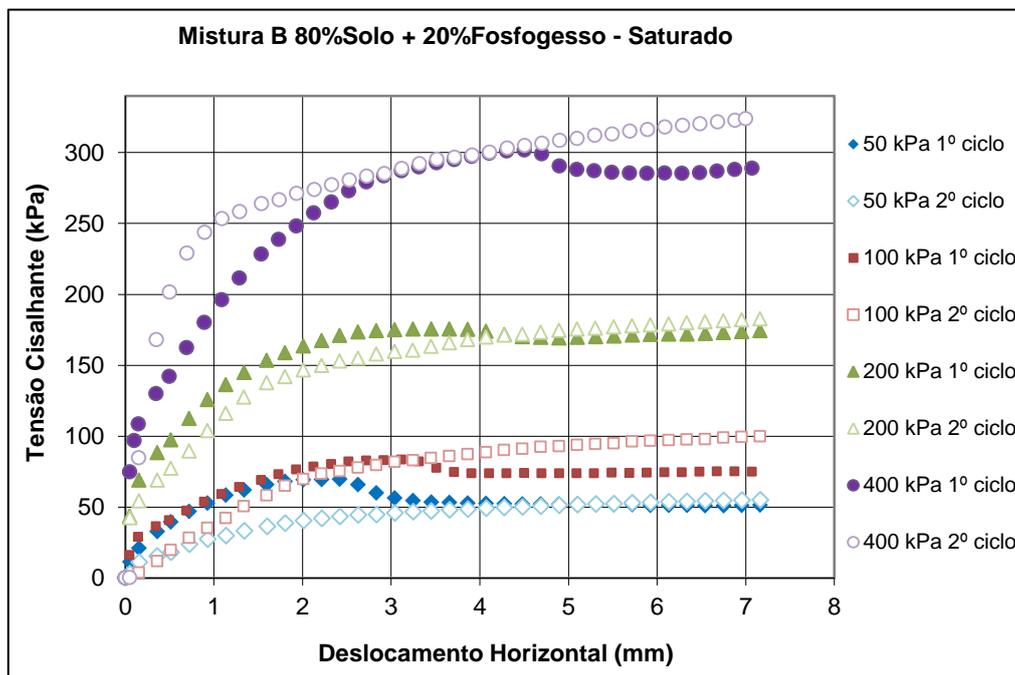


Figura 5.19 - Relação entre tensão de cisalhamento e deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto cíclico.

Como na amostra ensaiada há presença de grãos de fosfogesso, não é possível saber se estes grãos são rígidos o suficiente para não se quebrarem. Assim, um dos problemas assumidos na definição do fosfogesso é o desconhecimento da possibilidade de se utilizar o critério de Mohr-Coulomb, pois não se sabe o que realmente está cisalhando.

5.1.5 CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Analisando as curvas de retenção mostradas no capítulo anterior é possível encontrar uma relação entre o índice de vazios e o teor de umidade. Esta relação está expressa de forma gráfica na Figura 5.20 que mostra as contrações ocorridas durante a secagem das misturas. Pode-se verificar a tendência que o aumento do teor de fosfogesso provoca nas misturas quanto à contração desenvolvida. Esta contração acontece quando as amostras são secas ao ar a partir dos valores de umidade ótima. As deformações de contração das amostras variaram de 11 a 21 % para as três misturas. Vale ressaltar que a contração não resulta em trincas no material.

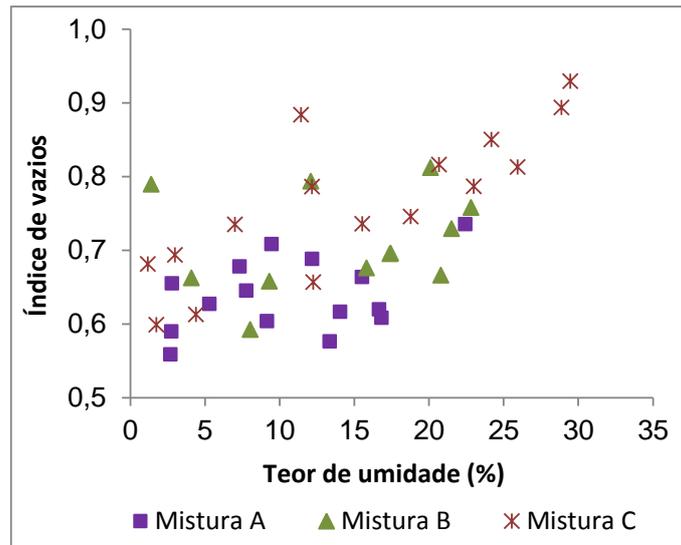


Figura 5.20 - Variação dos índices de vazios das misturas com os teores de umidade.

Os dados laboratoriais das curvas de retenção do solo, fosfogesso e misturas solo-fosfogesso foram ajustados pela equação proposta por Romero (1999). Esse autor modificou a expressão para a curva característica de van Genuchten, acrescentando um fator de correção dependente da sucção, o qual faz a curva tender a uma relação linear a altos valores de sucção. A nova equação proposta e o fator de correção são apresentados a seguir:

$$w = w_{sat} \cdot C_{u_a - u_w} \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m \quad (5.4)$$

$$C_{u_a - u_w} = \left\{ 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{(u_a - u_w)}{a} \right]}{\ln(2)} \right\}^m \quad (5.5)$$

onde w_{sat} é a umidade do solo quando saturado; a é o valor da sucção para umidade higroscópica e n , m e α são os mesmos parâmetros de van Genuchten, sendo o último relacionado ao valor de entrada de ar da curva.

Na Figura 5.21 constam as curvas ajustadas cujos parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 5.5. Ainda na Tabela 5.5 é apresentado o valor da densidade dos grãos (G) utilizados para a obtenção do teor de umidade saturada. Vale ressaltar que a equação proposta não permite a simulação da forma bimodal da curva característica, típica de solos tropicais.

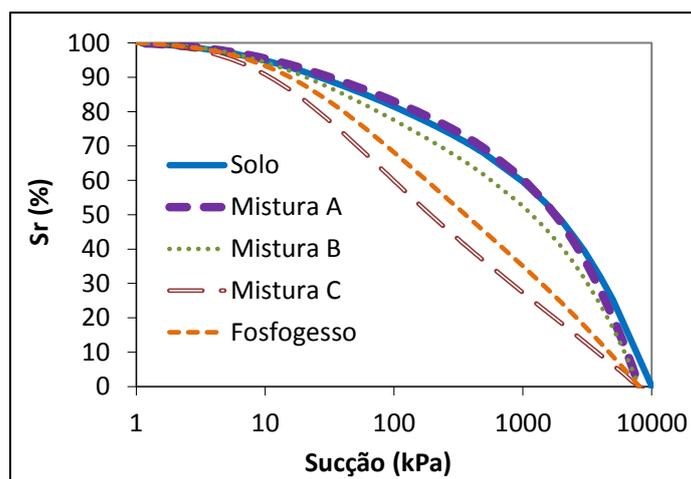


Figura 5.21 - Curvas de retenção ajustadas pela equação de Romero (1999) para as amostras de fosfogesso, solo e misturas solo-fosfogesso.

Tabela 5.5 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção.

Amostra	G	w_{sat} (%)	a (MPa)	α (MPa ⁻¹)	n	m
Solo	2,798	27,9	10	100	1,0	0,08
Mistura A	2,750	24,9	8	100	1,0	0,08
Mistura B	2,742	27,2	8	100	1,1	0,12
Mistura C	2,697	34,2	8	67	1,1	0,3
Fosfogesso	2,595	56,2	8	67	1,1	0,3

Verifica-se que a Mistura C apresenta a curva de retenção mais próxima à curva do fosfogesso do que a curva do solo, ocorrendo o contrário com as Misturas A e B.

Os valores de sucção para um mesmo grau de saturação diminuem com o incremento do teor de fosfogesso, sendo que para o solo e a Mistura A essa diferença é nula. Desta forma, a diminuição dos valores de sucção para o mesmo grau de saturação com o incremento do teor de fosfogesso pode inviabilizar o uso de misturas com altos teores de fosfogesso em obras que exijam maiores resistências e menores permeabilidades, devido à relação direta entre estes parâmetros geotécnicos e a sucção.

Além disso, como a Mistura A apresenta tanto o comportamento mecânico quanto a curva de retenção similar ao solo, essa mistura poderia ser utilizada em obras geotécnicas, em situações nas quais não se pretendem melhorar o comportamento hidromecânico do solo, mas com a finalidade principal de se dar um destino adequado ao resíduo fosfogesso, diminuindo os problemas ambientais decorrentes da geração excessiva deste material.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Apresentam-se neste capítulo as principais conclusões obtidas através dos estudos sobre a caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso. Em seguida são feitas sugestões para pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e nas análises realizadas, conclui-se que:

- O percentual de fosfogesso di-hidratado utilizado nas misturas tem impacto nos comportamentos mecânicos e hidráulicos do solo;
- De acordo com os resultados das análises granulométricas das amostras, observa-se que o solo possui agregações que são desfeitas pela ação do defloculante. O resíduo fosfogesso apresenta-se como um silte, não possuindo agregações de partículas. Nas misturas solo-fosfogesso as agregações do solo presente não são desfeitas por completo, portanto evidencia-se que o baixo valor do pH do fosfogesso pode afetar de forma decisiva na ação do agente defloculante;
- A utilização da betoneira para realizar as misturas entre o solo e o fosfogesso pode desencadear quebra das concreções do solo presentes na fração areia e também dos bastões do fosfogesso devido ao atrito com o solo, o que gera a diminuição das dimensões dos materiais acarretando no aumento da fração silte;
- A Mistura C e o fosfogesso são caracterizados como materiais não plásticos. A adição de fosfogesso ao solo é responsável pela diminuição do Índice de Plasticidade. Esta adição também reduz os limites de liquidez e de plasticidade;
- O incremento de fosfogesso ao solo faz com que a massa específica dos grãos diminua. À medida que o teor de fosfogesso aumenta, essa massa específica decresce linearmente e proporcionalmente ao teor de fosfogesso adicionado. Diante disto, os valores previstos podem ser utilizados nas curvas de compactação das novas misturas;
- A Mistura C e o fosfogesso são materiais que apresentam dificuldades de compactação, com o fosfogesso após compactado se apresentando em forma de camadas. Para as amostras, quando compactadas, observa-se que quanto maior é a quantidade de fosfogesso

presente, menor é o valor do peso específico seco máximo. Observa-se também que o teor de umidade ótima é semelhante para o solo e Mistura A e, aumenta para maiores teores de fosfogesso;

- No ensaio de adensamento, para cada estágio de carregamento, todas as amostras saturadas estudadas não apresentaram estabilização das leituras de deslocamento vertical em um tempo igual a 24 horas. Para o dobro deste tempo, as Misturas B e C e o fosfogesso ainda continuaram com o mesmo comportamento. Portanto, constata-se que o tempo de adensamento e o teor de fosfogesso presente tem forte influência nas propriedades mecânicas das misturas solo-fosfogesso. Devido a este comportamento apresentado pelas amostras saturadas, infere-se que não é possível dizer se a teoria de Terzaghi pode ser aplicada na análise do adensamento destas amostras;
- À medida que o teor de fosfogesso aumenta, a mistura resultante se torna menos rígida. Pode-se concluir que existe um limite no teor de fosfogesso para a diminuição desta rigidez, ou seja, a partir de um teor crítico de fosfogesso, o comportamento do solo é fortemente influenciado. Neste caso as misturas com teores maiores que 20% de fosfogesso assumem comportamentos mecânicos bem próximos ao do fosfogesso puro. Esta informação é essencial para projetos que visem à utilização de misturas com teores de fosfogesso acima de 20%;
- No ensaio de cisalhamento direto, observa-se que para os maiores valores de tensão normal utilizados as trajetórias de resistência ao cisalhamento das amostras se apresentaram próximas. Com relação aos parâmetros de resistência, os ângulos de atrito efetivos das amostras também foram próximos e o intercepto de coesão efetiva foi maior para o solo e sofreu diminuição a medida que o teor de fosfogesso era aumentado. Para a Mistura C e o fosfogesso a coesão foi quase nula, típica dos solos siltsosos;
- Os valores do coeficiente de permeabilidade da Mistura A ficaram menores que os do solo. Nas Misturas B e C e no fosfogesso, o maior teor de fosfogesso aumentou o coeficiente de permeabilidade;
- As curvas de retenção de água mostram que em relação à sucção total, o comportamento do solo e da Mistura A ficaram próximos. Nas demais amostras, a adição do fosfogesso provocou diminuição dos valores de sucção para um mesmo grau de saturação;

- Houve o surgimento de fungos nos papéis filtro utilizados na determinação das curvas de retenção de água, porém isto não influenciou na determinação da sucção total das amostras;
- As Misturas com teores maiores que 20% de fosfogesso e o próprio fosfogesso não apresentam estabilidade frente à ação da água;
- As microfotografias revelaram que o maior teor de fosfogesso presente nas misturas, é responsável pela orientação preferencial das partículas. A partir de 20% de fosfogesso é possível notar predominância dos cristais do fosfogesso sob os grãos do solo;
- Nas águas percoladas pelos corpos de prova, os elementos cádmio, cobre, chumbo, manganês e zinco apresentam valores superiores aos permitidos pela resolução n° 357/2005 do CONAMA. Porém, a própria água de abastecimento apresentou concentrações de cádmio e chumbo inadequadas;
- Nesta pesquisa, a mistura que apresenta melhor comportamento mecânico e hidráulico para possível emprego em geotecnia é a Mistura A. Como o fosfogesso é um material com péssimo comportamento hidro-mecânico, a sua mistura ao solo no teor de 10% é a que menos interfere nas qualidades apresentadas pelo solo. Além do mais, essa mistura apresentou melhor estabilidade frente à ação da água, um comportamento hidráulico quanto a curva de retenção similar ao solo e melhor distribuição granulométrica, o que gerou o menor coeficiente de permeabilidade obtido;
- A utilização da Mistura A tem a finalidade principal de fornecer um destino adequado ao resíduo fosfogesso, diminuindo assim, os problemas ambientais decorrentes da geração excessiva deste material.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Destacam-se como sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliar a influência do tempo no adensamento do fosfogesso e misturas solo-fosfogesso quando submetidos à ação de cargas externas;
- Realizar outros ensaios que permitam uma melhor avaliação das características hidro-mecânicas das amostras, quando estas se encontram em situação não saturada;

- Realizar estudos de deformabilidade das misturas solo-fosfogesso com a implementação de outros estabilizantes químicos, como a cal e o cimento;
- Estudar o comportamento mecânico entre misturas de fosfogesso e demais solos tropicais ao longo do tempo, variando o tempo de cura;
- Executar estudos com relação às análises químicas do fosfogesso e misturas solo-fosfogesso para melhor avaliação dos danos ambientais causados pelas suas utilizações em geotecnia;
- Avaliar do ponto de vista econômico, toda a logística necessária para o emprego do resíduo fosfogesso e suas misturas com solos em obras geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1984). Solo - Análise Granulométrica: NBR - 7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABNT (1984). Solo - Determinação do limite de liquidez: NBR - 6459, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT. (1984). Solo - Determinação do limite de plasticidade: NBR - 7180, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica: NBR-6508, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1986). Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR - 6457. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

ABNT (1986). Solo - Ensaio de compactação: NBR - 7182. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.

ABNT (1990). Solo - Ensaio de adensamento unidimensional: NBR - 12007. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 15 p.

ABNT (2000). Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável: NBR - 14545. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

American Society for Testing and Materials (2004), ASTM D 3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, Philadelphia, USA.

Araújo, R.V.V., Lapido-Loureiro, F.E., Bandeira, L.F.M. & Carvalho, D.A. (2004). Lixiviação clorídrica de concentrado fosfático: estudo de caso. XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, SC, 1: 533-540.

Bartl, P.E. & Albuquerque, P.C.W. (1992). Alternativas para reciclagem industrial do fosfogesso. II Seminário Sobre o Uso do Gesso na Agricultura, IBRAFOS, Uberaba, MG, 1: 67-81.

Bizarreta, J.C.O. & Campos, T.M.P. (2010). Water retention curve and shrinkage of a waste from the paper industry. V Internacional Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Espanha, 1: 433-439.

Borges, C.R., Gitirana Jr., G.F.N., Vargas, C.A.L. & Guimarães, R.C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Gramado, Brasil: 1: 1-8.

Brandão, P.F.P. (2002). Mercado de Rochas Calcárias e Fosfáticas para Nutrição Animal. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. UNICAMP, Campinas, SP, 89 p.

Bruckmann, M.E & Fries, S.G. (2002). Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/radio/principal.htm>>. Acesso em: 02 abr. 2011.

Camapum de Carvalho (2009). Geotecnia de solos tropicais. Notas de aula do curso de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Canut, M.M.C. (2006). Estudo da Viabilidade do Uso do Resíduo Fosfogesso como Material de Construção. Dissertação de Mestrado, Departamento de Construção Civil, UFMG, Belo Horizonte, MG, 154 p.

Cekinski, E., Calmanovici, C.E., Bichara, J.M., Fabiani, M., Giulietti, M., Castro, M.L.M.M., Silveira, P.B.M., Pressinotti, Q.S.H.C. & Guardani, R. (1990). Tecnologia de Produção de Fertilizantes. Instituto de Pesquisa Tecnológicas – IPT, São Paulo, SP, 237 p.

Chang, W.F., Chin, D.A. & Ho, R. (1989). Phosphogypsum for Secondary Road Construction. University of Miami. Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, 179 p.

CNEN (2005). Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica - NN 3.01, Comissão Nacional de Energia Nuclear.

CONAMA (2005) - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2011.

Das, B.M. (2008). Advanced Soil Mechanics. Taylor & Francis, New York, USA, 567 p.

Degirmenci, N., Okuco, A. & Turabi, A. (2007). Application of phosphogypsum in soil stabilization. Building and Environment, 42(9): 3393-3398.

DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, 274 p.

DNPM (2007). Departamento Nacional de Produção Mineral - Ministério de Minas e Energia – Universo da Mineração Brasileira, 83 p.

DNPM (2008). Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral de 2008. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/fosfato.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2010.

Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S. & Pérez, M. (2010). Radiological impacts of natural radioactivity from phosphogypsum piles in Huelva (Spain). Radiation Measurements, 45(2): 242-246.

Erlenstadt, G. (1980). Upgrading of phosphogypsum for the construction industry. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum, D.P. Borris & P.W. Boody (eds.), Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, pp. 245-253.

Faria, L.F. (2007). Estudos de materiais e tecnologias para pavimentação. Relatório Final, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 34 p.

Fernandes, H.M., Rio, M.A.P. & Franklin, M.R. (2009). Impactos radiológicos da indústria do fosfato. Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade. F.E. Lapido-Loureiro, R. Melamed & J.F. Neto (eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 525 - 544.

Freitas, B.J. (1992). A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. II Seminário Sobre o Uso do Gesso na Agricultura, IBRAFOS, Uberaba, MG, 1: 325-339.

Ghafoori, N. & Chang, W.F. (1993). Investigation of phosphate mining waste for construction materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(2): 249-264.

Gutti, C.S., Roy, A., Metcalf, J.B. & Seals, R.K. (1996). The influence of admixtures on the strength and linear expansion of cement-stabilized phosphogypsum. *Cement and Concrete Research*, 26(7): 1083-1094.

Head, K.H. (1982). Manual of soil laboratory testing. Permeability, shear strength and compressibility tests. John Wiley & Sons. 2: 509-580.

Hull, C.D. & Burnett, W.C. (1996). Radiochemistry of Florida phosphogypsum. *J. Environ Radioactivity*, 32(3): 213-238.

Kobayashi, A.R.K. (2000). Avaliação da Influência do Tipo de Cimento na Expansibilidade de Misturas de Fosfogesso e Cimento. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 106 p.

Komnitsas, K., Lazar, I. & Petrisor, I.G. (1999). Application of a vegetative cover on phosphogypsum stacks. *Minerals Engineering*, 12(2): 175-185.

Kouloheris, A.P. (1980). Chemical nature of phosphogypsum as produced by various wet process phosphoric acid processes. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum, D.P. Borris & P.W. Boody (eds.), Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, pp. 7-33.

Kulaif, Y. (1999). A Nova Configuração da Indústria de Fertilizantes Fosfatados no Brasil. CETEM/CNPQ, Rio de Janeiro, Brasil, (Série Estudos e Documentos, 42) 244p.

Lapido-Loureiro, F.E. & Melamed, R. (2009). O fósforo na agroindústria brasileira. Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade. F.E. Lapido-Loureiro, R. Melamed & J.F. Neto (eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 257-304.

Lapido-Loureiro, F.E. & Nascimento, M. (2009). O gesso nos agrossistemas brasileiros: fontes e aplicações. Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade. F.E. Lapido-Loureiro, R. Melamed & J.F. Neto (eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 445-478.

Lloyd Jr, G.M. (1985). A Review of the Florida Institute of Phosphate Research Programs to Develop Uses for Phosphogypsum. Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, 14 p.

Malavolta (1992). O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta – perguntas e respostas. II Seminário Sobre o Uso do Gesso na Agricultura, IBRAFOS, Uberaba, MG, 1: 41-66.

Marangon, M. Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 442 p.

Marinho, F.A.M. (1994). Medida de sucção com o método do papel filtro. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação, Foz do Iguaçu, Brasil, 2: 515-522.

Mascarenha, M.M.A. (2003). Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.

Mascarenha, M.M.A. (2008). Influência da Microestrutura no Comportamento Hidromecânico de uma Argila Siltosa não Saturada Incluindo Pequenas Deformações. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 056/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158 p.

McClellan & van Kauwenbergh, (2004). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Bulletin FAO Engrais et Nutrition Végétale 13. F. Zapata & R.N. Roy (eds.), Rome, Italie. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

Mesquita, G.M. (2007). Aplicação de Misturas de Fosfogesso e Solos Tropicais Finos na Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 144 p.

Metogo, D.A.N. (2010). Construção e Avaliação Inicial de um Trecho de Pavimento Asfáltico Executado com Misturas de Solo Tropical, Fosfogesso e Cal. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 195 p.

Mishra, U.N. (1980). Use of phosphogypsum in reclamation of sodic soils in India. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum, D.P. Borris & P.W. Boody (eds.), Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, pp. 223-241.

Morel, P. (1971). Fertilizer Technology (in Spanish). Andres Bello, Santiago, Chile, 233 p.

Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. Editora Vilibor, São Paulo, SP, 240 p.

Oliveira, S.M.F. (2005). Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Fosfogesso e Cal para Utilização na Construção Rodoviária. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 190 p.

Ortiz, J.A. (1997). Estudo de Misturas de Solo e Fosfogesso com Vistas a sua Utilização em Rodovias. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 179 p.

Parente, E.B. (2002). Avaliação do Comportamento Mecânico das Misturas de Solo-Cimento e Fosfogesso para Uso na Construção Rodoviária. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 138 p.

Parreira, A.B., Kobayashi, A.R.K. & Silvestre Jr, O.B., (2003). Influence of portland cement type on unconfined compressive strength and linear expansion of cement-stabilized phosphogypsum. *Journal of Environmental Engineering*, 129(10): 956-960.

Papanicolaou F., Antoniou S. & Pashalidis I. (2009). Experimental and theoretical studies on physico-chemical parameters affecting the solubility of phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(10): 854-857.

Petrucci, E.G.R. (1987). *Concreto de Cimento Portland*. Globo, Rio de Janeiro, RJ, 307 p.

Pinto, C.S. (2002). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 356 p.

Rabelo, A.P.B., Soler, J.G.M. & Silva, N.C. (2001). Utilização do subproduto fosfogesso na construção civil. IV Seminário “Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações”. IBRACON, São Paulo, SP, 1: 195-202.

Romero, E.E.M. (1999). Characterisation and thermo hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay: An experimental study, Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Terreno e Cartografia, Universidade Politécnica da Catalunia, Barcelona, 405 p.

Rufo, R.C. (2009). Estudo Laboratorial de Misturas de Fosfogesso, Solo Tropical e Cal para fins de Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, GO, 152 p.

Santos, A.J.G. (2002). Avaliação do Impacto Radiológico Ambiental do Fosfogesso Brasileiro e Lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb . Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, SP, 166 p.

Saueia, C.H.R. (2006). Distribuição Elementar e de Radionuclídeos na Produção e Uso de Fertilizantes Fosfatados no Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, SP, 112 p.

Sfar Felfoul, H., Clastres, P., Ben Oueddou, M. & Carles-Gibergues, A. (2002). Propriétés et perspectives de valorization du phosphogypse l'exemple de la Tunisie. *Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, EPCOWM'2002, Tunis, Tunisie*, 1: 510-520.

Silva, R.M. & Giulietti, M. (2010). Fosfogesso: geração, destino e desafios. *Agrominerais para o Brasil*. F.R.C. Fernandes, A.B. Luz & Z.C. Castilhos. (eds.), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 125-144.

Silvestre, O.B.J. (2002). Fosfogesso Estabilizado com Cimento para Aplicação na Construção Rodoviária – A Influência do Tipo do Cimento na Resistência e Deformabilidade da Mistura. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 157 p.

Straaten, P.V. (2002). Rocks for Crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338 p.

Teixeira, P.F. (2002). Investigações sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 106 p.

Triches, G. & Maccarini, M. (1988). Misturas fosfogesso/cinza para construção rodoviária – estudos preliminares. 23ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Florianópolis, SC, 1: 312-328.

UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York, USA, 245 p.

Vargas, M. (1985) The concept of tropical soils. First International. Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, ISSMFE, Brasília, DF, 3: 101-134.

Villaverde, F.L. (2008). Avaliação da Exposição Externa em Residência Construída com Fosfogesso. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, SP, 65 p.

Villibor, D.F., Nogami, J. S.; Beligni, M. & Cincerre, J. R., (2000). Pavimentos com Solos Lateríticos e Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. ABPV/UFU. São Paulo/SP.

Villibor, D.F. & Nogami, J.S. (2009). Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso de Solos Finos Lateríticos. Arte & Ciência, São Paulo, SP, 291 p.

Wissa, A.E.Z. & Fuleihan, N.F. (1980). Control of groundwater contamination from phosphogypsum disposal sites. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum, D.P. Borris & P.W. Boody (eds.), Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, pp. 443-492.