

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

ROSELY COSTA RUFO

**ESTUDO LABORATORIAL DE
MISTURAS DE FOSFOGESSO, SOLO
TROPICAL E CAL PARA FINS DE
PAVIMENTAÇÃO**

Goiânia
2009

ROSELY COSTA RUFO

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS DE FOSFOGESSO,
SOLO TROPICAL E CAL PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia do Meio Ambiente Universidade Federal de Goiás, para obtenção de título de mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Lilian Ribeiro de Rezende, DSc.

Co – orientador: Prof. Carlos Alberto Lauro Vargas, DSc.

Goiânia
2009

ROSELY COSTA RUFO

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS DE FOSFOGESSO,
SOLO TROPICAL E CAL PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia do Meio Ambiente – Universidade Federal de Goiás, para obtenção de título de mestre em Engenharia do Meio Ambiente, aprovada em 21 de agosto de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:



Prof. Lilian Ribeiro de Rezende, DSc. – UFG

(Orientadora)

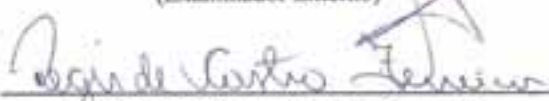


Prof. Carlos Alberto Lauro Vargas, DSc. – UFG

(Co-orientador)



Prof. Liodi Légl Bariani Bernucci, DSc. – USP
(Examinador Externo)



Prof. Regis de Castro Ferreira, DSc. – UFG
(Examinador Interno)

Goiânia
2009

Pelos momentos felizes e todas as gargalhadas proporcionadas, pela presença marcante nos cafés da manhã, quando chegava de surpresa e acordava todo mundo. Pelo apoio incondicional à felicidade e prosperidade de todos, pelo amor aos sobrinhos. Dedico esta conquista a meu querido tio Rogério Marcone (in memoriam). O amor ainda é latente e nunca se esgotará e a saudade é imensa e intensa. Também dedico estas páginas a meus pais, Anísio e Leny, que sempre estiveram ao meu lado, ajudando a realizar mais este sonho.

ADRADECIMENTOS

À Deus por todas as bênçãos que tem me concedido, por estar sempre comigo principalmente em meio as tempestades, me guiando, iluminando meu caminho e me dando forças para seguir adiante em busca de novas conquistas.

À meus pais, Anísio e Leny, pelo amor e compreensão durante esta jornada da minha vida.

À minhas irmãs Railda, Simone e Sulema pelo apoio, carinho e paciência nos momentos que tanto precisei.

Aos meus irmãos Orestes e Danilo pelo incentivo e pela confiança depositada em mim.

À minha cunhada Helayne pela amizade e meu amado sobrinho Guilherme pela alegria contagiante. Obrigada por compreenderem minha ausência nos momentos importantes!

À professora Lilian Ribeiro de Rezende pela orientação, paciência, pelo incentivo nos momentos de dificuldade e pela confiança depositada em mim. Esses dois anos de convivência foram muito especiais para mim, tê-la como orientadora foi como ganhar na loteria acumulada, foram ensinamentos preciosos e que muito contribuíram para a minha vida profissional e pessoal. Obrigada por tudo!

Ao professor Carlos Alberto Lauro Vargas pela paciência, dedicação, generosidade e pela sua imensa contribuição durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À Copebrás pelo incentivo e suporte financeiro para a realização deste estudo.

À CAPES pelo apoio na realização desta pesquisa por meio da bolsa de mestrado.

À FURNAS centrais elétricas S/A pelo apoio na execução dos ensaios de MCT e difração de raios-X.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, pela disponibilização dos equipamentos laboratoriais para execução dos ensaios. Ao técnico João Júnior e ao estagiário João Paulo Gomide e Brito pelo apoio na execução dos ensaios.

Ao Setor de Transportes da UFG, pela disponibilidade de veículos para as vistas técnicas e coleta do material de estudo.

À todos os professores e colegas do PPGEMA pelos ensinamentos e companheirismo durante esta jornada.

À querida amiga Deuzélia pelo carinho e por sempre atender cordialmente os meus pedidos na secretaria do PPGEMA.

À professora Marcia Mara pelo carinho e palavras de apoio nos momentos de dificuldade no laboratório.

Ao colega Leonardo Sebastião de Souza por ter cedido o laboratório do IFG para execução de alguns ensaios e pelo companheirismo durante a execução dos ensaios na UFG.

À Camilla Borges, companheira de laboratório e de madrugadas de estudos, pela amizade, carinho, incentivo, apoio, caronas e por todos os momentos de felicidade e angústia que estive ao meu lado.

À Roberta Mara de Oliveira, pela amizade, carinho, apoio, caronas, companheirismo e pelos sábios conselhos nos momentos oportunos. Obrigada por estar sempre do meu lado!

A Gabriela Marsaro, pela amizade, carinho, apoio e, principalmente, pelas orações a mim dedicadas.

Ao colega Maurício Telles, pelos momentos de descontração, carinho e confiança depositada em mim.

Ao colega Claudio Silva pela amizade e por ter conseguido junto a FUNMINERAL o apoio nos análises de metais pesado.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

O fosfogesso, subproduto da fabricação do ácido fosfórico, por ser um resíduo que necessita da disponibilidade de grandes áreas para ser estocado, tornou-se objeto de estudos, uma vez que sua disposição eleva os custos da empresa geradora e pode, ainda, acarretar numa série de problemas ambientais. Neste contexto, tem surgido o interesse de estudar a aplicação do fosfogesso em obras de pavimentação, visando minimizar os danos ambientais causados pela sua estocagem, além da obtenção de pavimentos de baixo custo com desempenho satisfatório. O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento mecânico de misturas compostas de fosfogesso (produzido na região de Catalão-GO), solos tropicais regionais e cal, visando à aplicação desse resíduo em pavimentação. Para avaliar o comportamento do solo, fosfogesso, das misturas solo-fosfogesso, solo-cal e solo-fosfogesso-cal foram realizados ensaios laboratoriais de peso específico dos grãos, limites de consistência, granulometria, compactação na energia intermediária, expansão e “California Bearing Ratio” – CBR, Metodologia Miniatura Compactada Tropical – MCT. Também foram realizados a caracterização química das amostras, difração de raios-X e ensaios complementares de compressão simples e permeabilidade. As misturas foram denominadas Misturas 1 (90% solo + 10% fosfogesso), Misturas 2 (80% solo + 20% fosfogesso), Misturas 3 (70% solo + 30% fosfogesso), Misturas 4 (97% solo + 3% cal calcítica CHIII), Misturas 5 (94% solo + 6% cal calcítica CHIII), Misturas 6 (91% solo + 9% cal calcítica CHIII), Mistura 7 (81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal CHIII), Mistura 8 (81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica), Mistura 9 (84,6% solo Goiânia-GO + 9,4% fosfogesso + 6% Cal CHI). Os resultados encontrados nesta pesquisa são válidos para o fosfogesso gerado através do processo dihidratado obtido no município de Catalão-GO. Com base nos resultados obtidos pôde-se concluir que dentre as misturas solo-fosfogesso, a Mistura 2 apresentou melhor desempenho podendo ser utilizada em sub-base de pavimentos. Para as misturas solo-cal, a Mistura 6 apresentou possibilidade de aplicação em bases de pavimento para vias de baixo volume de tráfego, por apresentar CBR superior a 60%. As misturas de solo, fosfogesso e cal não apresentaram resistência para serem utilizados em camadas de pavimentos devido à ocorrência de reações químicas entre os três materiais, provocando o surgimento do mineral etringita, causando aumento de plasticidade e elevados valores de expansão. Em princípio, o risco de ocorrer contaminação do subsolo ou do lençol freático caso misturas de solo-fosfogesso sejam utilizadas em obras é mínimo. No entanto, sempre que for utilizar um resíduo em obras de pavimentação, torna-se importante adotar medidas preventivas e realizar monitoramentos. Tem-se, então, que utilização de materiais não convencionais, como misturas de fosfogesso e solo tropical, pode ser considerada uma alternativa interessante do ponto de vista técnico e ambiental.

Palavras-Chave: Resíduo. Fosfogesso. Cal. Solos tropicais. Pavimentação. Ensaios laboratoriais.

ABSTRACT

The phosphogypsum, subproduct of the manufacture of the phosphoric acid, became the objective of studies, due that it requires the availability of large areas to be stored. The disposal this waste increases the cost of generating company and can even cause a series of environmental problems. In this context, It has been arisen the interest to study the application of phosphogypsum in pavement construction, to minimized environmental damage caused by its storage and to obtained low-cost pavement with satisfactory performance. The objective of this research was analyzed the behavior of mixtures composed of phosphogypsum (produced in Catalão-GO region), regional tropical soils and lime, to the implementation of waste in pavement. Laboratory tests of specific gravity of solids, consistency limits, grain size, compaction in the intermediate energy, expansion and California Bearing Ratio - CBR, Methodology "Miniatura Compactada Tropical" - MCT, were performed for evaluation of the soil, phosphogypsum, soil-mixtures of phosphogypsum, soil-lime and soil-phosphogypsum-lime behavior. Additional tests of simple compression strength, permeability and chemical analysis were also performed. The mixture was called Mixture 1 (90% soil + 10% phosphogypsum), Mixture 2 (80% soil + 20% phosphogypsum), Mixture 3 (70% soil + 30% phosphogypsum) Mixture 4 (97% soil + 3% limestone lime CHIII), Mixture 5 (94% soil + 6% limestone lime CHIII), Mixture 6 (91% + 9% limeston lime CHIII), Mixture 7 (81.9% Catalão-GO soil + 9.1% phosphogypsum + 9% lime CHIII), Mixes 8 (81.9% Catalão-GO soil + 9.1% phosphogypsum+ 9% dolomitic lime), Mixes 9 (84.6% Goiânia-GO soil + 9.4% phosphogypsum + 6% lime CHI). The results are valid for phosphogypsum generated through the dihydrate process obtained in Catalão-GO city. The results were concluded that between the soil-phosphogypsum mixtures, the mixture 2 showed the best performance and can be used in sub-base of pavements. For the lime-soil mixtures, the mixture 6 showed the possibility to be use on base of pavement with low traffic volume, by presenting CBR greater than 60%. Soil, lime and phosphogypsum mixtures showed no resistance to be used in layers of pavement due to the occurrence of chemical reactions between the three materials. These reactions cause the appearance of mineral etringita. They increase the plasticity and the values of expansion. In principle, the risk of contamination occurs in the subsoil or groundwater if the soil-phosphogypsum mixtures are used in works is minimum. However, when waste is used in pavement construction is necessary to adopt preventive measures and carry out monitoring. The use of unconventional materials, i.e. phosphogypsum and tropical soil mixtures, can be considered an interesting alternative from a technical, environmental and economic point of view.

Keywords: Subproduct. Phosphogypsum. Lime. Tropical soils. Pavement. Laboratory tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exploração mundial de rocha fosfatada (modificado de ZAPATA; ROY, 2004).....	25
Figura 2.2 – Localização dos depósitos fosfáticos no Brasil (BRANDÃO, 2002).....	28
Figura 2.3 – Diagrama do processo de produção do concentrado fosfático (BRUNO, 1985 modificado por CEKINSKI et al., 1990).....	30
Figura 2.4 – Material em diferentes etapas de beneficiamento: (a) rocha fosfática; (b) material britado, (c) material moído por via úmida; (d) poupa fosfática.....	31
Figura 2.5 - Processo de produção de P_2O_5 e geração do resíduo fosfogesso (CANUT, 2006).....	33
Figura 2.6 – Subproduto sólido, denominado fosfogesso.....	34
Figura 2.7 - Curva granulométrica do fosfogesso com e sem defloculante (MESQUITA, 2007).....	36
Figura 2.8 – Armazenamento do fosfogesso pelo método “a úmido” (CANUT, 2006)	42
Figura 2.9 – Armazenamento do fosfogesso em pilhas.....	42
Figura 3.1 - Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro (VILLIBOR et al., 2000).....	52
Figura 3.2 - Distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície da Terra (modificado de QUINONES, 1963 apud CARDOSO, 2002).....	53
Figura 3.3 - Tipos fundamentais de alteração das rochas (modificado de BUCKMAN; BRADY, 1960 apud CARDOSO, 2002).....	55
Figura 3.4 - Representação esquemática das unidades e camada octaédrica (GRIM, 1953 <i>apud</i> CARDOSO, 2002).....	56
Figura 3.5 - Representação esquemática das unidades e camada tetraédrica (GRIM, 1953 <i>apud</i> CARDOSO, 2002).....	56
Figura 4.1 – Esquema dos estados físicos, e limites de consistência.....	73
Figura 4.2 – Ábaco de classificação MCT.....	78
Figura 5.1 – Pilha de fosfogesso onde foi realizada a coleta das amostras.....	87
Figura 5.2 – Quarteamento do fosfogesso.....	88
Figura 5.3 – Mapa litológico da região de Catalão.....	89

Figura 5.4 – Aspecto do solo coletado na Indústria Copebrás Ltda.....	90
Figura 5.5 – Preparação das misturas: (a) solo-fosfogesso; (b) betoneira utilizada; (c) misturas dos materiais; (d) homogeneização.....	91
Figura 5.6 – Ensaio de granulometria: (a) peneiramento; (b) sedimentação.....	92
Figura 5.7 – Determinação da massa específica: (a) solo; (b) fosfogesso.....	93
Figura 5.8 – Determinação dos Limites de consistência: (a) limite de liquidez do solo; (b) limite de plasticidade do solo; (c) limite de liquidez dos fosfogesso; (d) limite de plasticidade do fosfogesso.....	94
Figura 5.9 – Metodologia MCT: (a) acondicionamento das amostras; (b) corpos-de-prova compactados; (c) tanque de imersão; (d) ensaio de perda de massa por imersão	95
Figura 5.10 - Preparação dos materiais: (a) moinho orbital; (b) sedimentação em coluna; (c) lâminas orientadas; (d) equipamento de difração de raios-X.....	97
Figura 5.11 – Compactação e Expansão: (a) corpo-de-prova compactado; (b) corpos-de-prova imersos.....	98
Figura 5.12 – Prensa utilizada no ensaio de CBR.....	99
Figura 5.13 – Preparação dos materiais para o ensaio de resistência a compressão simples: (a) solo; (b) fosfogesso; (c) Mistura 2; (d) Mistura 6.....	100
Figura 5.14 – Ensaio de resistência a compressão simples em andamento.....	100
Figura 5.15 – Preparação dos materiais para o ensaio de permeabilidade: (a) formação das camadas; (b) amostra compactada; (c) extração da amostras; (d) amostra preparada para execução do ensaio.....	101
Figura 6.1 – Exploração da rocha fosfática: (a) Mina de extração da rocha fosfática; (b) usina de britagem.....	102
Figura 6.2 – Pilha de homogeneização.....	103
Figura 6.3 – Pátio de disposição final do fosfogesso.....	103
Figura 6.4 – Lagoa de percolado.....	104
Figura 6.5 - Curvas granulométricas do solo com e sem defloculante.....	106
Figura 6.6 - Curvas granulométricas do fosfogesso com e sem defloculante.....	107
Figura 6.7 - Curvas granulométricas da Mistura 1 com e sem defloculante.....	107
Figura 6.8 - Curvas granulométricas da Mistura 2 com e sem defloculante.....	107
Figura 6.9 - Curvas granulométricas da Mistura 3 com e sem defloculante.....	1
Figura 6.10 - Curvas granulométricas da Mistura 4 com e sem defloculante.....	108
Figura 6.11 - Curvas granulométricas da Mistura 5 com e sem defloculante.....	108

Figura 6.12 - Curvas granulométricas da Mistura 6 com e sem defloculante.....	109
Figura 6.13 - Curvas granulométricas da Mistura 7 com e sem defloculante.....	109
Figura 6.14 - Curvas granulométricas da Mistura 8 com e sem defloculante.....	109
Figura 6.15 - Curvas granulométricas da Mistura 9 com e sem defloculante.....	110
Figura 6.16 - Curvas granulométricas dos materiais estudados com defloculante.....	110
Figura 6.17 - Curvas granulométricas dos materiais estudados sem defloculante.....	110
Figura 6.18 – Ensaio de limites de consistência: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade.....	112
Figura 6.19 – Gráfico de classificação MCT.....	114
Figura 6.20 – Difratoograma da amostra do solo de Goiânia-GO.....	119
Figura 6.21 – Difratoograma da amostra do solo de Catalão-GO.....	119
Figura 6.22 – Difratoograma da amostra de fosfogesso.....	120
Figura 6.23 – Difratoograma da amostra da cal dolomítica.....	120
Figura 6.24 – Difratoograma da amostra da cal calcítica CHI.....	121
Figura 6.25 – Difratoograma da amostra da cal calcítica CHIII.....	121
Figura 6.26 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 7.....	123
Figura 6.27 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 8.....	123
Figura 6.28 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 9.....	124
Figura 6.29 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 7.....	124
Figura 6.30 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 8.....	125
Figura 6.31 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 9.....	125
Figura 6.32 – Curvas do solo: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	128
Figura 6.33 – Curvas da Mistura 1: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	128
Figura 6.34 – Curvas da Mistura 2: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	129
Figura 6.35 – Curvas da Mistura 3: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	129
Figura 6.36 – Curvas da Mistura 4: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	129
Figura 6.37 – Curvas da Mistura 5: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	130
Figura 6.38 – Curvas da Mistura 6: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	130
Figura 6.39 – Curvas da Mistura 7: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	130
Figura 6.40 – Curvas da Mistura 8: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	13 ¹
Figura 6.41 – Curvas da Mistura 9: (a) compactação e saturação; (b) CBR.....	13
Figura 6.42 – Gráfico de resistência à compressão simples das amostras.....	132
Figura 6.43 – Corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência a compressão simples: (a) solo tropical; (b) fosfogesso; (c) Mistura 2; (d) Mistura 6.....	133

Figura 6.44 – Curvas de compactação.....	138
Figura 6.45 – Curvas de CBR.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Reservas nacionais de fosfatos (ANDA, 1987, modificado de CEKINSKI et al., 1990).....	27
Tabela 2.2 - Composição do fosfogesso da indústria de fertilizante Fosfertil (KOBAYASHI, 2000).....	37
Tabela 2.3 – Resultados das características químicas da massa bruta das amostras estudadas (MESQUITA, 2007).....	38
Tabela 2.4 – Concentrações de radionuclídeos no fosfogesso (modificado de FERNANDES; RIO; FRANKLIN, 2004).....	40
Tabela 2.5 – Concentração de íons nas bacias de deposição do fosfogesso (CASTILHOS JR. et al., 1998).....	45
Tabela 6.1 – Frações granulométricas dos materiais estudados.....	105
Tabela 6.2 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos.....	111
Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de limite de consistência.....	112
Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios da Metodologia MCT para o solo fino.....	114
Tabela 6.5 – Classificação SUCS e TRB das amostras.....	115
Tabela 6.6 – Resultados das análises químicas do solo e das misturas.....	117
Tabela 6.7 – Resultados das análises químicas do fosfogesso e cales.....	117
Tabela 6.8 – Resultados de compactação, expansão e CBR.....	127
Tabela 6.9 – resultados do ensaio de resistência a compressão simples.....	132
Tabela 6.10 – Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade.....	133
Tabela 6.11 – Resultado da análise de metais pesados encontrados nas amostras.....	134
Tabela 6.12 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras de água coletadas.....	134
Tabela 6.13 – Resultados dos ensaios de caracterização.....	136
Tabela 6.14 – Resultados de compactação, expansão e CBR.....	138
Tabela 6.15 – Resultado das análises químicas.....	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 – Descrição das amostras estudadas.....	86
Quadro 5.2 – Características das cales utilizadas.....	91
Quadros 6.1 – Minerais identificados na amostras	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	“American Association of State Highway and Transportation Officials”
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas
CBR	“California Bearing Ratio”
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte
DRX	Técnica de Difração de Raio X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRN	Fundo Rodoviário Nacional
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MCV	“Moisture Condition Value”
MO	Matéria Orgânica
NBR	Normas Brasileiras
NORM	“Naturally Occurring Radioactive Materials”
NP	NP (não plástico).
RCC	“Roller Compacted Concrete”
RCS	Resistência a Compressão Simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TENORM	“Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials”
TRB	“Transportation Research Board”
UTM	“Universal Transverse Mercator”

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
²²² Rn	Radônio
²²⁶ Ra	Rádio
²³² Th	Tório
²³⁸ U	Urânio
Al	Alumínio
c'	Coefficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade com Mini-MCV = 10
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CaHPO ₄ .2H ₂ O	Brushita
CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfato de cálcio dihidratado (fosfogesso)
CTC	Capacidade de troca catiônica
Δ	Variação
d'	Inclinação da parte reta do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes
DAP	Fosfato diamônio
e'	Índice da Classificação MCT
ϕ	Diâmetro da esfera
F	Fluor
Fe	Ferro
γ_d	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico aparente seco máximo
γ_s	Peso específico do material da esfera
γ_w	Peso específico do fluido
g/cm ³	Gramas por centímetros cúbicos
H	Hidrogênio
HF	Ácido fluorídrico
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
IP	Índice de plasticidade
KCl	Cloreto de potássio
kg	Kilograma
kg/dm ³	Kilograma por decímetro cúbico
μ	Viscosidade do fluido
MAP	Fosfato de monoamônio
MgO	Óxido de magnésio
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MR	Módulo resiliente
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
m/s	Metros por segundo
mR/h	Metros de radiação por hora
MPa	Mega Pascal
P ₂ O ₅	Anidrido fosfórico

NP	Não plástico
pH	Logaritmo negativo da concentração hidrogeniônica
Pi	Perda de massa por imersão expressa em porcentagem
ρ_s	massa específica dos grãos
SiO ₂	Sílica ou óxido de silício
SO ₃	Anidrido sulfúrico
SiF ₄	Silicato de fluor
Ti	Titânio
TiO ₂	Rutilo/anatásio
TSP	superfosfato triplo)
ton/m ³	Tonelada por metro cúbico
Zr(SiO ₄)	Zircão
w _L	Limite de liquidez
w _{ot}	Umidade ótima
w _P	Limite de plasticidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	22
1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2 O FOSFOGESSO.....	24
2.1 DEFINIÇÃO.....	24
2.2 ROCHAS FOSFÁTICAS.....	24
2.2.1 O beneficiamento da rocha fosfática.....	29
2.2.2 A produção do ácido fosfórico.....	31
2.2.3 Processos de formação do fosfogesso.....	33
2.2.4 Características do fosfogesso.....	35
2.2.4.1 Características Físicas.....	35
2.2.4.2 Características químicas.....	36
2.2.4.3 Características radiológicas.....	38
2.2.5 Disposição final do fosfogesso e impactos ambientais.....	41
2.2.6 Possíveis aplicações do fosfogesso.....	45
2.2.6.1 Agricultura.....	45
2.2.6.2 Estabilização Química.....	47
2.2.6.3 Pavimentação.....	48
3 SOLOS TROPICAIS.....	50
3.1 DEFINIÇÕES.....	50
3.2 GÊNESE E CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS.....	53
3.3 APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO.....	57
3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	59
4 PAVIMENTAÇÃO.....	62
4.1 DEFINIÇÕES.....	62
4.2 HISTÓRICO.....	63
4.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	64
4.3.1 Convencionais.....	64
4.3.2 Não convencionais.....	66
4.4 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	71
4.4.1 Convencionais.....	71
4.4.1.1 Caracterização dos Materiais.....	71
4.4.1.1.1 <i>Granulometria</i>	71
4.4.1.1.2 Limites de Consistência.....	72
4.4.1.1.3 Massa Específica dos Grãos.....	74
4.4.1.2 Classificação dos solos.....	74
4.4.1.2.1 <i>Sistema Unificado de Classificação (SUCS)</i>	74
4.4.1.2.2 <i>Sistema Rodoviário de Classificação</i>	75
4.4.1.2.3 <i>Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)</i>	77
4.4.1.3 Compactação.....	79
4.4.1.4 Expansão e “California Bearting Ratio” (CBR).....	79
4.4.1.5 Triaxial dinâmico.....	80

4.4.2 Complementares.....	82
4.4.2.1 Análises químicas.....	82
4.4.2.2 Difração de raios-X.....	82
4.4.2.3 Compressão simples.....	84
4.4.2.4 Permeabilidade.....	84
5 METODOLOGIA.....	85
5.1 INTRODUÇÃO.....	85
5.2 VISITA TÉCNICA.....	86
5.3 COLETA DOS MATERIAIS.....	87
5.3.1 Fosfogesso.....	87
5.3.2 Solo.....	88
5.3.3 Cales.....	90
5.4 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS.....	91
5.5 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	92
5.5.1 Caracterização.....	92
5.5.1.1 Análise granulométrica.....	92
5.5.1.2 Massa específica dos grãos.....	93
5.5.1.3 Limites de consistência.....	93
5.5.2 Classificação MCT.....	94
5.5.3 Análises Químicas.....	96
5.5.4 Difração de raios-X.....	96
5.5.5 Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR).....	98
5.5.6 Compressão simples.....	99
5.5.7 Permeabilidade.....	101
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
6.1 INTRODUÇÃO.....	102
6.2 VISITA TÉCNICA.....	102
6.3 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	104
6.3.1 Caracterização das amostras.....	104
6.3.1.1 Análise Granulométrica.....	104
6.3.1.2 Massa específica dos grãos.....	111
6.3.1.3 Limites de Consistência.....	112
6.3.2 Classificação dos materiais.....	114
6.3.2.1 Classificação MCT.....	114
6.3.2.2 Classificação SUCS e TRB.....	115
6.3.3 Análises Químicas.....	116
6.3.4 Difração de raios-X.....	118
6.3.5 Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR).....	126
6.3.6 Compressão simples.....	131
6.3.7 Permeabilidade.....	133
6.4 ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	134
6.5 COMPARAÇÃO ENTRE MISTURAS DE SOLO-CAL REALIZADAS COM SOLOS DA REGIÃO.....	135
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	143
7.1 CONCLUSÕES.....	143
7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.4 ASPECTOS GERAIS

Ao longo dos tempos, a humanidade intensificou o processo de urbanização e o desenvolvimento industrial sem se preocupar com o uso racional dos recursos naturais. A indiferença em relação ao tipo de material consumido gerou a “era do descartável”, o que resultou em um dos maiores problemas da atualidade. O crescimento acentuado da geração de resíduos sólidos e sua concentração espacial devido à urbanização diminuem as chances de assimilação dos resíduos pelo meio ambiente, sem que haja alterações, muitas vezes significativas, na qualidade da água, solo e ar.

O gerenciamento dos resíduos é visto como uma importante questão a ser solucionada, na medida em que a má operação traz constantes riscos à saúde pública e ao meio ambiente. A estrutura desse sistema abrange várias etapas com funções diversas, como planejamento estratégico, técnico, operacional, gerencial, recursos humanos, entre outros.

Conforme Zanta e Ferreira (2003), as diretrizes básicas de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos parte do princípio da redução da fonte, reaproveitamento, tratamento e disposição final adequada, visando a prevenção de poluição, a minimização de impactos ambientais e danos à saúde pública.

O princípio dos “3Rs”(reduzir, reutilizar e reciclar) tem sido uma ferramenta de grande importância, na qual trabalha-se, inicialmente, com a redução das quantidades de resíduos gerados, e em seguida procura-se o reaproveitamento desses materiais e finalmente busca-se a reciclagem.

A indústria da construção civil é grande geradora de resíduos e tem sido considerada como o ramo da atividade humana que pode melhor absorver esses resíduos. O reuso e a reciclagem podem contribuir significativamente para minimização de impactos ambientais. Pesquisas recentes comprovam que a utilização de produtos reciclados pode ser uma alternativa viável em substituição a matérias-primas tradicionalmente utilizadas, como por exemplo, estudos realizados por Mesquita (2007), Oliveira (2005), Silvestre; Parreira e Kobayashi (2001).

Sabe-se que o aproveitamento de resíduos já é praticado a algum tempo pelas indústrias. Atualmente, dentro do contexto de gestão ambiental, tem-se utilizado resíduos de indústrias de beneficiamento de minérios, por exemplo, bauxita e fosfogesso ou de escórias altos fornos de termelétricas, que apresentam potencial para alguma utilização. Esta prática tem, numa primeira avaliação, a vantagem de minimizar os problemas ambientais e econômicos decorrentes da disposição desses resíduos.

1.5 JUSTIFICATIVA

O impacto ambiental de atividades industriais é, em geral, intenso, pontual, limitado e preciso em termos de localização como ocorre numa mineradora. E a grande quantidade de resíduos gerados é de responsabilidade da empresa desde o acondicionamento até destino final adequado, sendo que, muitas vezes os subprodutos servem como matéria-prima para outras indústrias.

Empreendimentos dessa natureza envolvem parcelas pequenas de população nos seus impactos diretos e são bastante dependentes de fatores relativamente controláveis. Existem metodologias bem estabelecidas para avaliar e monitorar o impacto ambiental desses empreendimentos, onde os aspectos de projeto, engenharia e planejamento são passíveis de um alto grau de previsão e controle, sendo os resíduos o maior impacto gerado nessa atividade. Estes geralmente são bastante volumosos, ocupam grandes áreas e muitas vezes são abandonados pelos empreendedores após o término da atividade. Assim, verifica-se que uma destinação adequada para esses resíduos é imprescindível, sendo a reciclagem uma excelente alternativa.

O aproveitamento de resíduos através de estudos capazes de detectar suas potencialidades é encarado hoje como atividade complementar que pode contribuir para diversificação de produtos e minimização de custos finais, além de resultar em novas matérias-primas para uma série de setores industriais e ainda refletir um impacto positivo no meio ambiente.

Com a preocupação ambiental de disponibilizar áreas para servirem de estocagem de materiais produzidos por diversos tipos de indústrias, tem surgido o interesse de estudar a aplicação desses materiais em obras de pavimentação. Além da redução dos danos causados ao meio ambiente, no estado de Goiás existe a dificuldade de extração de cascalho, muito utilizado na confecção de base e sub-base de pavimentos, pois as jazidas ainda existentes encontram-se, geralmente em áreas de preservação ambiental ou distantes das obras. Assim,

executar pavimentos de baixo custo com desempenho satisfatório, utilizando-se de materiais não convencionais e ambientalmente corretos, pode se tornar uma solução viável para vários problemas ambientais (REZENDE, 2003).

Nesse sentido, tem-se o que fosfogesso é um subproduto da fabricação do ácido fosfórico, resultado da reação de ácido sulfúrico com a rocha fosfática. Do ponto de vista químico, o fosfogesso é constituído, principalmente, por sulfato de cálcio e enxofre. Encontram-se diversas aplicações na agricultura, algumas decorrentes de peculiaridades dos solos brasileiros. Também pode ser usado na construção civil, em materiais de construção ou leitos de estradas. Porém, mesmo tendo várias aplicações, as quantidades produzidas são elevadas, da ordem de mais de 6 milhões de toneladas por ano no Brasil e de 250 milhões de toneladas no mundo (RAIJ, 2003).

A produção do fosfogesso supera o consumo, resultando em pilhas do produto acumulado nas fábricas. Neste contexto, torna-se interessante a utilização prática do fosfogesso, dando-lhe uma destinação viável do ponto de vista técnico e ambiental. Como alternativa, surge, então, a sua aplicação em pavimentação.

1.6 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de misturas compostas de fosfogesso (produzido na região de Catalão-GO), solos tropicais regionais e cal, visando à aplicação desse resíduo em pavimentação.

1.3.3 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Caracterizar as misturas selecionadas para o estudo;
- Realizar a caracterização química das amostras;
- Realizar difração de raios-X para identificar os minerais presentes nas amostras selecionadas para o estudo;
- Realizar ensaios laboratoriais para avaliação do comportamento mecânico das amostras quando utilizadas em pavimentação;

- Analisar, de forma preliminar, a qualidade da água que percola no corpo-de-prova para verificar se existe risco de contaminação do solo e do lençol freático situados abaixo de uma estrutura de pavimento.
- Realizar um estudo comparativo de misturas solo-cal confeccionadas com diferentes solos tropicais (solos de Catalão-GO, Goiânia-GO e Brasília-DF).

1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido na forma de dissertação de mestrado, estando dividido em sete capítulos conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 relata os aspectos gerais da pesquisa contendo os objetivos e justificativa. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o fosfogesso relatando sua origem, características, impactos ambientais de sua disposição final e possíveis aplicações. O Capítulo 3 discorre sobre solos tropicais, sua ocorrência, processos de formação, mineralogia e aplicação na pavimentação. O Capítulo 4 relata sobre pavimentação, apresentando um breve histórico, tipos de pavimentos e ensaios laboratoriais aplicados a esta área. O Capítulo 5 apresenta a metodologia aplicada nesta pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. O Capítulo 7 discorre a respeito das conclusões obtidas, as considerações finais e apresenta sugestões para pesquisas futuras.

Capítulo 2

O FOSFOGESSO

2.1 DEFINIÇÃO

O fosfogesso é um subproduto ou resíduo sólido gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados durante a produção do ácido fosfórico H_3PO_4 . A sua denominação indica sua origem industrial (fosfo) e seu componente principal (gesso). Esse subproduto é sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e, portanto, apresenta a mesma composição do gesso natural. Devido à sua abundância e larga distribuição geográfica, o gesso tem um valor econômico baixo e, em muitos casos, o seu valor no solo antes da exploração é praticamente zero. Em face da competição econômica com o gesso, o uso prático do fosfogesso requer pesquisas inovadoras e contínuas (OLIVEIRA, 2005).

O fosfogesso não pode ser utilizado em muitas aplicações para substituir o gesso natural sem um processo caro de purificação. O nível de impurezas encontradas no fosfogesso depende da origem da rocha fosfática, do processo de produção e da eficiência da planta de processamento. Dessa forma, o uso do fosfogesso requer uma investigação contínua e criativa (CASTILHOS JR. et al., 1998).

Quando a indústria de fertilizantes produz uma tonelada de ácido fosfórico a partir da rocha fosfática gera como subproduto de 4,5 a 5,5 toneladas de fosfogesso. Muito pouco deste subproduto tem sido utilizado e sua disposição vem gerando sérios problemas ambientais (CASTILHOS JR. et al., 1998).

2.2 ROCHAS FOSFÁTICAS

A matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados é o minério de P_2O_5 , mais comumente designado de rocha fosfática pelos produtores de fertilizantes. Trata-se de material natural de reservas de teores adequados de fosfatos, que pode ser utilizado economicamente na produção de fertilizantes (CEKINSKI et al., 1990).

Segundo Zapata e Roy (2004) os quatro principais produtores de fertilizantes fosfatados: Estados Unidos, China, Marrocos e Rússia, são responsáveis por cerca de 72% da produção mundial. Os primeiros 12 produtores representam 93% do total mundial. Outros 20

países produzem os 7% restantes (Tradução nossa). A Figura 2.1 apresenta o mapa de rochas fosfáticas que estão atualmente em exploração.

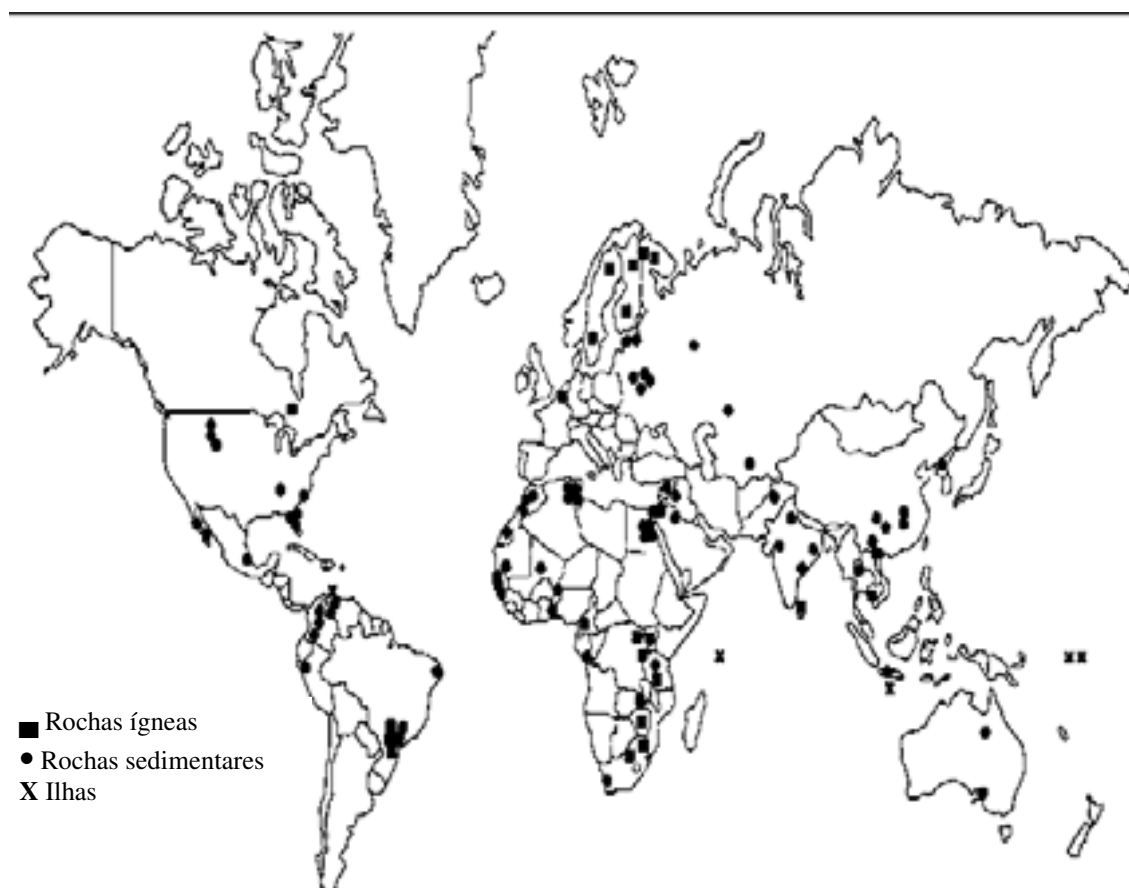


Figura 2.1 - Exploração mundial de rocha fosfatada (modificado de ZAPATA; ROY, 2004)

Ainda conforme Zapata e Roy (2004) uma fonte futura da produção de fosfato é a exploração dos depósitos marinhos. Depósitos deste tipo ocorrem na costa Sudeste dos Estados Unidos, na placa continental do Peru e Chile, na costa da Namíbia, Nova Zelândia e México. Nenhum desses depósitos marinhos são atualmente explorados e provavelmente não serão explorados enquanto os depósitos terrestres não se esgotarem (Tradução nossa).

Os depósitos de rochas fosfáticas são principalmente de origem ígnea e sedimentar, embora essas rochas possam também resultar do intemperismo, bem como de processos biológicos. 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%. Entretanto, cerca de 80% das reservas brasileiras são de origem ígnea, também chamadas magmáticas ou

eruptivas, cujos teores de P_2O_5 variam de 4% a 23%. Essas rochas encontram-se predominantemente, em Araxá-MG, Tapira-MG, Catalão-GO e Jacupiranga-SP. O principal mineral componente das rochas fosfáticas nacionais de origem ígnea é a apatita. (LIMA, 1989¹ apud OLIVEIRA, 2005).

As rochas fosfáticas de origem sedimentar estão localizadas principalmente em Pernambuco e Patos de Minas-MG, podendo-se destacar nesse caso a fosforita. A fosforita é um fosfato tricálcio, amorfo, 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 tório (GUERRA, 1979² apud OLIVEIRA 2005).

Sob condições de clima tropical e regime pluviométrico definido por duas estações distintas, seca e úmida, rochas contendo fosfatos de qualquer origem podem sofrer um conjunto de processos denominado laterização, que consiste na dessilicatização de sais minerais, transformando-os num externo de sexquíóxidos de alumínio (bauxitização) e/ou segníóxidos de ferro (CEKINSKI et al., 1990).

Em algumas ilhas oceânicas, o acúmulo de dejetos de aves, juntamente com seus esqueletos, pode gerar depósitos fosfáticos importantes, por exemplo, os que existem no Peru. São depósitos de guano que, além de P_2O_5 , contém ainda outros constituintes dos seres vivos, como nitrogênio (CEKINSKI et al., 1990).

Em função do baixo teor de P_2O_5 das rochas brasileiras, existe a necessidade de que elas sejam beneficiadas para se obter concentrados fosfáticos com teor de fósforo adequado ao processamento químico subsequente. As reservas brasileiras em termos de P_2O_5 representam cerca de 1% das reservas mundiais sendo que as maiores pertencem a Marrocos e aos Estados Unidos (CEKINSKI et al., 1990).

A estimativa das reservas brasileiras de rochas fosfáticas é de aproximadamente 4,0 bilhões de toneladas, que fornece uma reserva em torno de 400 milhões de toneladas de P_2O_5 como descrito na Tabela 2.1. Nesta tabela não foram computados as reservas de Irecê – BA, onde estima-se a existência de 15 milhões de toneladas de rocha fosfática com teores variando entre 16% e 38% de P_2O_5 (CEKINSKI et al., 1990).

¹ LIMA, R. M. F. **Novos Coletores na flotação do minério fosfático de Tapira, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 1989.

² GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. Secretaria de Planejamento da República. Rio de Janeiro, RJ, 1979.

Tabela 2.1 - Reservas nacionais de fosfatos (ANDA³, 1987, modificado por CEKINSKI et al., 1990)

Jazida	Reserva Total (Milhões t)	Teor médio reserva P ₂ O ₅		Observação
		(%)	(Milhões de t)	
Traufa/Pirocaua (MA)	25,0	21,0	5,2	(a)
Olinda (PE)	15,0	18,0	2,7	Paralisada
Paulista (PE)	20,0	18,0	3,6	Em estudo
Itatiaia (CE)	115,0	12,0	13,8	Em estudo
Araxá (MG)	455,0	14,0	63,7	Em lavra
Lagamar(MG)	3,5	30,0	1,2	Em lavra
Patos (MG)	414,0	11,3	46,8	Em lavra
Patrocínio (MG)	200,00	8,0	17,8	Paralisada
Tapira (MG)	716,0	8,7	62,3	Em lavra
Catalão (GO)	285,0	7,0	20,0	Em lavra
Ouvidor (GO)	80,0	11,0	8,8	Em lavra
Jacupiranga (SP)	75,0	5,3	4,0	Em lavra
Iperó (SP)	119,0	6,7	8,0	Paralisada
Registro (SP)	18,0	10,0	1,2	Paralisada
Anitápolis (SC)	320,0	8,5	27,2	Em estudo
Total	3.817,5		378,8	

(a) Fosfatos aluminosos

Segundo Lapidou-Loureiro e Melamed (2006) os materiais fosfáticos no Brasil ocorrem em sete ambientes geológicos distintos, sendo:

- Magmáticos – complexos alcalino-carbonáticos mesozóicos em que os minérios de mais elevados teores se formaram por enriquecimento de supergenico de carbonatitos apatíticos e/ou piroxenitos apatíticos: Catalão-GO, Tapira-MG, Araxá-MG, Jacupiranga-SP, Anitapolis-SC, Iperó-SP, Patrocínio-MG e Ouvidor-MG;
- Ortomagmáticos – complexos alcalinos-carbonatíticos, proterozóicos e metaformizados, nos quais ocorreram também concentrações residuais: Angico dos Dias-BA, Maecuru-PA;
- Metassedimentares – nas bacias intracratônicas de idade proterozóica: Patos de Minas-MG, Irecê-BA, Lagamar-MG, Itatiaia-CE;
- Sedimentogênicos – nas bacias marginais mezozóicas: Paulista/Igaraçu-PE, Goiânia-PE;
- Lateríticos – materiais fosfatados aluminosos resultantes da laterização de rochas sedimentares e metassedimentares, com teores elevados de fósforo: Taura e Pirocaua-MA;
- Lentes e veios de apatita em pegmatitos cortando calcários cristalinos e mixaxistos pré-cambrianos: centro do estado da Paraíba;

³ ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. **Plano nacional de fertilizantes**. São Paulo, 1987. 235p.

- Orgânicos – constituídos por excrementos de aves (guano): Ilha Rasa-PE. Sem interesse econômico pelas suas baixas reservas e localização.

A Figura 2.2 apresenta a localização dos depósitos fosfáticos no Brasil.



Figura 2.2 – Localização dos depósitos fosfáticos no Brasil (BRANDÃO, 2002)

Devido ao componente fósforo, a principal aplicação da apatita (rocha fosfática) é na fabricação de ácido fosfórico para fertilizantes que, tanto em escala mundial como nacional, consome cerca de 90% da sua produção, portanto apenas 10% se dedicam a outras aplicações. No Brasil, cerca de 95% da capacidade nominal de produção de concentrados apatíticos resulta de minérios associados a minérios alcalino-carbonatíticos, com composição mineralógica muito variável, até dentro da mesma jazida (LAPIDO-LOUREIRO; MELAMED, 2006).

2.2.1 O beneficiamento da rocha fosfática

No Brasil, as lavras de jazidas de fosfato, totalmente mecanizadas, são realizadas a céu aberto. Os equipamentos utilizados variam de empresa para empresa e de mina para mina. A produção de fertilizantes a partir de minérios fosfatados naturais é realizada em complexos industriais constituídos por unidades que podem agrupar-se numa mesma área ou atuarem separadamente.

A rocha fosfática é lavrada e transportada por caminhões para ser submetida à britagem, que é executada em dois estágios sucessivos, com objetivo da redução granulométrica do minério até o diâmetro final máximo em torno de 32 mm. O material britado é estocado em pilhas de homogeneização, que visam prover a usina de beneficiamento de material homogêneo em granulometria e teor de P_2O_5 (CEKINSKI et al., 1990).

O diagrama apresentado na Figura 2.3 demonstra o processo típico de produção do concentrado fosfático, realizado na maioria das indústrias produtoras de ácido fosfórico.

Das pilhas de homogeneização, o material é retomado e alimentado à usina, visando à concentração dos minerais de fósforo através das etapas relacionadas a seguir:

- Moagem e classificação: em geral, a moagem é feita num conjunto de moinhos de barras e de bolas, por via úmida, operando em circuito fechado com ciclones de classificação;
- Deslamagem: onde se processa a separação de partículas de tamanho menor a 20 μm através de hidrociclones;
- Condicionamento: nesta etapa, são adicionados vários reagentes ao material em suspensão, conhecidos como agentes coletores (cuja função é levar a partícula do minério desejado para o leito de espuma) e depressores (utilizados para evitar que determinados minérios flutuem);
- Flotação: a polpa condicionada é submetida à operação de flotação, cujo objetivo é alcançar a concentração dos compostos de fósforo pela separação de outros compostos diluentes; a operação de flotação é efetuada, em geral, em três etapas distintas, cada qual com sua própria bateria de células de flotação;
- Desaguamento e filtração: a polpa final da operação de flotação, conhecida como “concentrado de flotação” é submetida a uma operação de espessamento, sendo a seguir encaminhada à filtração, num filtro a vácuo.

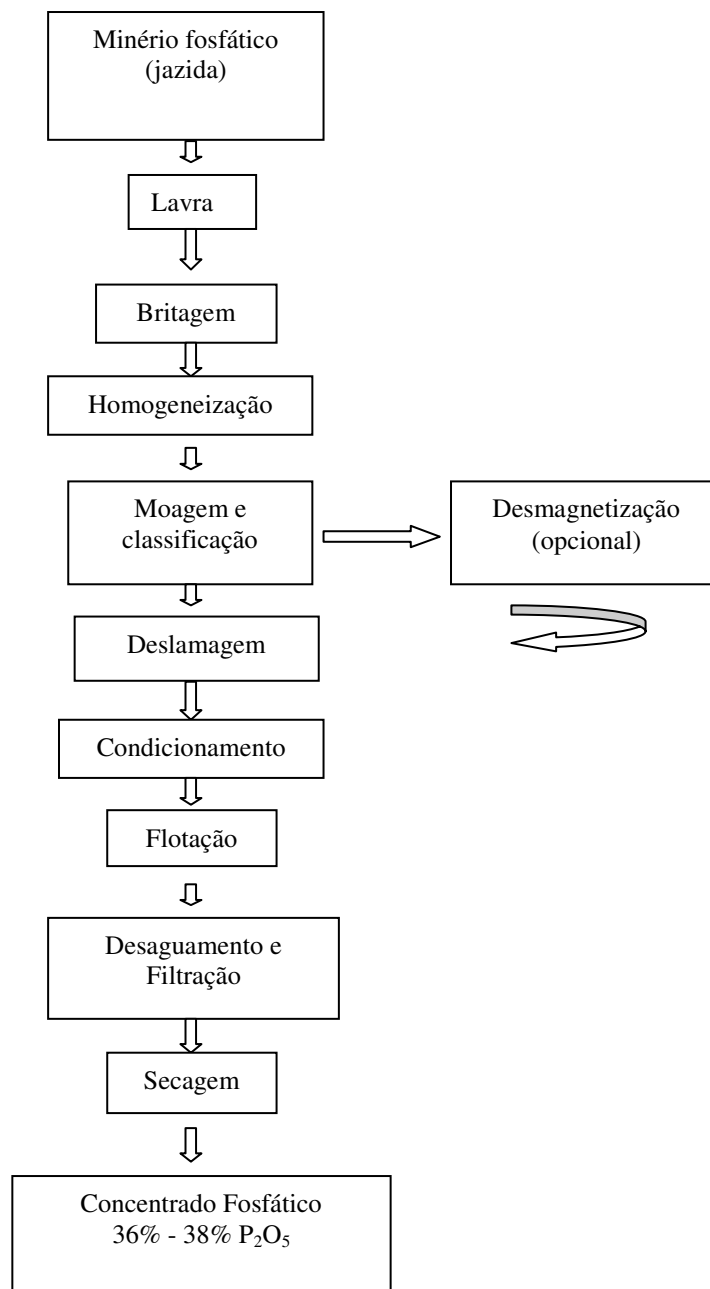


Figura 2.3 – Diagrama do processo de produção do concentrado fosfático (BRUNO⁴, 1985 modificado por CEKINSKI et al., 1990).

A Figura 2.4 apresenta o material em diferentes etapas do processo de beneficiamento, desde a rocha à polpa fosfática ou concentrado de flotação, que é encaminhado para a unidade de produção do ácido fosfórico.

⁴ BRUNO, M.A.C. **Concentração de energia na indústria de fertilizantes: manual de recomendações**. São Paulo, 1985. 486p.

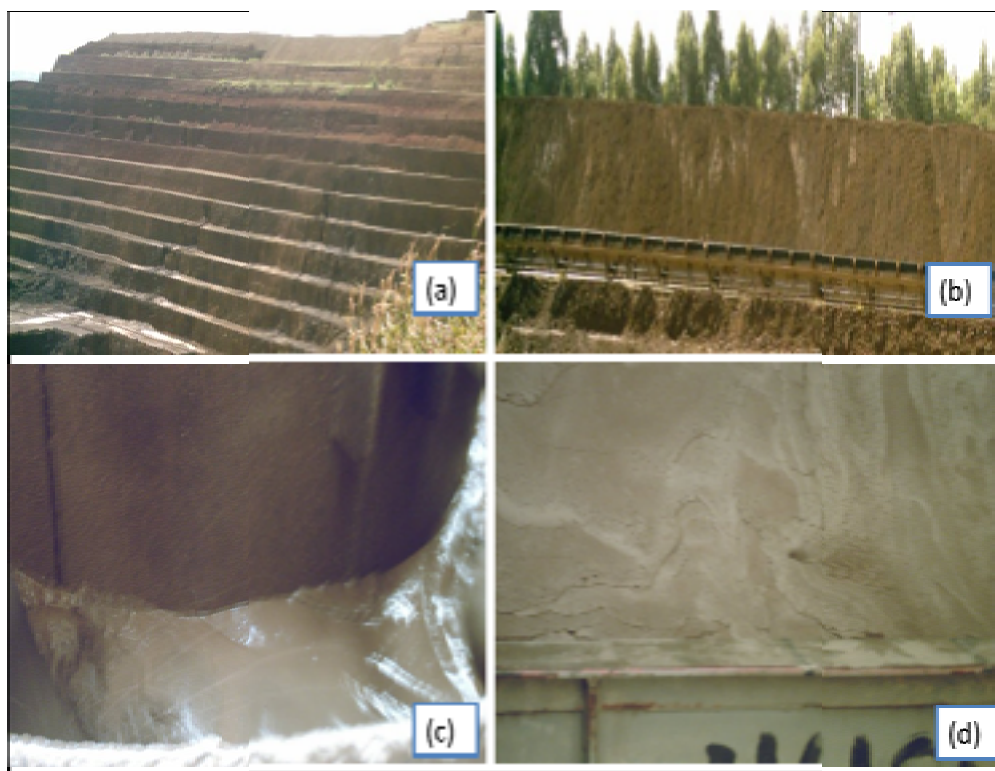


Figura 2.4 – Material em diferentes etapas de beneficiamento: (a) rocha fosfática; (b) material britado, (c) material moído por via úmida; (d) poupa fosfática.

2.2.2 A produção do ácido fosfórico

De acordo com Cekinski et al. (1990), a produção de ácido fosfórico na indústria de fertilizantes é feita mais comumente a partir de ácido sulfúrico e concentrado fosfático pelo processo via úmida, sendo que cerca de 85% da produção mundial de ácido fosfórico baseia-se neste tipo de processo. Sendo a fluorapatita, o principal constituinte mineral fosfático presente no concentrado, pode-se representar a reação de ataque do concentrado pelo ácido sulfúrico através da Equação 2.1.



Onde:

$n = 0, 1/2$ ou 2 , dependendo da forma de hidratação na qual o sulfato de cálcio cristaliza-se.

Esta equação representa o resultado global de dois estágios: reação de fluorapatita com ácido fosfórico, gerando fosfato monocálcico e reação do fosfato monocálcico com ácido fosfórico e sulfato de cálcio. Este concentrado contém muitas impurezas, sendo que vão ocorrer na prática várias outras reações. O HF (ácido fluorídrico) reage com a sílica e outras

impurezas, formando ácido fluossilício que, por sua vez, vai originar fluossilicatos e outros compostos (CEKINSKI et al., 1990).

A reação entre a apatita e o ácido sulfúrico permite a obtenção de uma série de fosfatos pela chamada rota sulfúrica. A rocha fosfática tratada com quantidade de ácido sulfúrico suficientes para dissolver o fosfato resulta no fertilizante chamado superfosfato simples. Quantidades maiores de ácido sulfúrico resultam em ácido fosfórico e fosfogesso, como mostrado na reação. O tratamento de rocha fosfática com ácido fosfórico resulta no fertilizante conhecido como superfosfato triplo. O ácido fosfórico tratado com amônia resulta nos fertilizantes conhecidos como fosfato monoamônico e fosfato diamônico (RAIJ, 2003).

O ataque do concentrado sulfúrico ocorre em reator agitado (para homogeneização do meio reacional e aumento da velocidade de reação), onde é produzido o ácido fosfórico 27% a 30% P_2O_5 e sulfato de cálcio dihidratado (fosfogesso), $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, como resíduo. Devido às impurezas existentes no concentrado fosfático podem ocorrer outras reações secundárias no reator.

Na lavagem dos efluentes gasosos do reator e do evaporador que contém fluoretos, ocorrem as reações representadas pelas Equações 2.2 e 2.1.



(Fluoreto de silício + água \rightarrow ácido fluossilícico + sílica)



(Acido fluorídrico + sílica \rightarrow ácido fluossilícico + água)

Como as reações que ocorrem no reator são exotérmicas e liberam gases nocivos, como os fluoretos, um sistema de exaustão e lavagem é utilizado, de modo a controlar a temperatura do reator e evitar o lançamento de gases poluentes na atmosfera. A suspensão (35% a 40% sólidos) proveniente do reator, composta de gesso (fosfogesso) e ácido fosfórico diluído, é bombeada para a etapa de filtração, onde é separado o ácido do gesso, que passa por um sistema de lavagem de dois estágios. Do ácido fosfórico filtrado nesta etapa, parte é utilizada como reciclo no reator e o restante destina-se a etapa de clarificação, sendo posteriormente concentrado (LAPIDO-LOUREIRO; MELAMED, 2006).

A clarificação consiste em promover a decantação de sólidos, que não foram separados na etapa de filtração ou que ainda estejam dissolvidos, possibilitando sua remoção. O ácido fosfórico clarificado (teor de 27% a 30%) é então enviado para a estocagem e, em

seguida, para a etapa de concentração. O ácido fosfórico diluído é aquecido em um trocador de calor de blocos de grafite a 80° C, antes de entrar no evaporador a vácuo, onde é separado o ácido concentrado da água contendo resíduos de flúor. O vapor da água passa por uma torre de absorção, onde compostos de flúor e sílica são transformados em ácido fluossilícico e retirados juntamente com outras impurezas, antes de serem condensados em um condensador barométrico (LAPIDO-LOUREIRO; MELAMED, 2006).

O ácido fosfórico, depois de passar no evaporador, já então com concentração de 52% em P_2O_5 , e isento de impurezas, é enviado para estocagem, para em seguida ser utilizado na fabricação de MAP (fosfato monoamônio) e DAP (fosfato diamônio), bem como, após a reação com a rocha fosfática, de TSP (superfosfato triplo) (LAPIDO-LOUREIRO; MELAMED, 2006).

2.2.3 Processos de formação do fosfogesso

A Figura 2.5 mostra o processo de produção do ácido fosfórico e formação do fosfogesso.

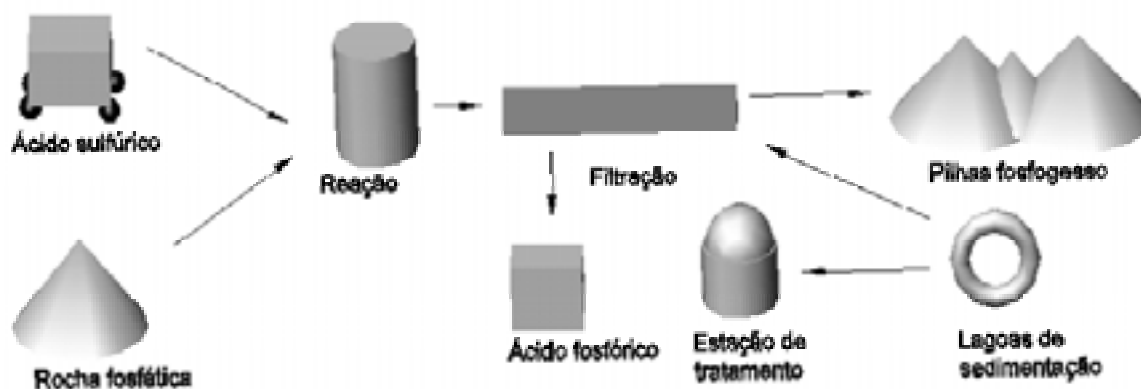


Figura 2.5 - Processo de produção de P_2O_5 e geração do resíduo fosfogesso (CANUT, 2006).

O fosfogesso é gerado na formação do ácido fosfórico, por via úmida pela indústria de fertilizantes fosfatados. Neste processo, após a rocha passar por um beneficiamento físico, é atacada com ácido sulfúrico, resultando, numa fase líquida, o ácido fosfórico, e outra fase sólida, o fosfogesso (Figura 2.6). São geradas cerca de quatro toneladas de fosfogesso para cada tonelada de ácido fosfórico produzido (SILVA; CIPRIANI; TADDEI, 2002).



Figura 2.6 – Subproduto sólido, denominado fosfogesso

A reação entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico pode ser obtida através de três processos distintos: processo di-hidratado, hemi-hidratado e hemi di-hidratado.

O processo di-hidratado é largamente utilizado em todo o mundo e atualmente o processo mais empregado no Brasil e requer um custo de capital relativamente baixo, mas, ao mesmo tempo, é o processo onde produz o fosfogesso com maior teor de impurezas (CANUT, 2006).

No processo dihidratado, o ácido sulfúrico e um ácido fosfórico fraco são alimentados ao reator em conjunto com o concentrado fosfático na granulometria adequada. É realizada uma pré-mistura do ácido sulfúrico e do ácido fosfórico fraco, possibilitando recuperação da energia liberada pela reação entre estes compostos. A fim de controlar a temperatura entre 78°C a 80°C existe a necessidade de resfriamento do sistema de reação. Uma das formas de exercê-lo consiste em promover a recirculação de parte da polpa em um resfriador a vácuo. Outra via bastante utilizada é a circulação forçada de ar através da polpa de reação (CEKINSKI et al., 1990).

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 ao 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 Oliveira (2005), o processo hemidratado é empregado na África, Europa e principalmente no Japão. O fosfogesso hemidratado é produzido em intervalos de temperaturas variando de 93°C e 132°C e produz ácido fosfórico hemidratado na proporção de 38% a 42% de P_2O_5 . A produção de uma tonelada de ácido fosfórico gera aproximadamente 4,3 toneladas de fosfogesso. As vantagens do processo hemi-hidratado para o processo di-hidratado são as concentrações mais altas de P_2O_5 , a dissolução mais rápida da rocha fosfática e a maior velocidade de filtração do ácido fosfórico. A maior concentração de P_2O_5 gera partículas mais finas de fosfogesso e com menores quantidades de impurezas.

Já o processo hemi di-hidratado segue o mesmo princípio do processo di-hidratado, com diferença que a etapa de solubilização de concentrado fosfático ocorre formação de hemi-hidratado, quer posteriormente é recristalizado para a forma dihidrato e filtrado nesta condição. O ácido fosfórico é, portanto, produzido na mesma faixa de concentração (28% a 30% de P_2O_5). A etapa final da concentração é alcançada em vapores a vácuo, conforme o procedimento já descrito. O produto final contém 50% a 54% de P_2O_5 (CEKINSKI et al., 1990).

O processo hemi di-hidratado combina as vantagens do processo di-hidrato (geração de um resíduo isento de impurezas) e a produção do processo hemidratado, ou seja, requer menos energia.

2.2.4 Características do fosfogesso

2.2.4.1 Características Físicas

A granulometria do fosfogesso varia de acordo com o processo de fabricação do ácido fosfórico, da origem mineralógica da rocha fosfática e do tempo de lixiviação do fosfogesso em depósitos. O grau de moagem da rocha durante a etapa inicial de produção do ácido fosfórico é um dos fatores que determinam a composição granulométrica do fosfogesso formado (CHANG, 1989).

O fosfogesso pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passantes na peneira nº 200 (SILVESTRE, 2002; KOBAYASHI, 2000). No entanto, num estudo realizado por Mesquita (2007) foi verificado que no ensaio de sedimentação sem o uso do defloculante, observa-se diferença entre as curvas granulométricas

obtidas para o fosfogesso (Figura 2.7), sendo que ocorreu aumento no teor de areia e redução na porcentagem de silte. Isto mostra que o defloculante age no material quebrando as ligações entre partículas menores que formam um torrão de diâmetro correspondente à fração areia. Conseqüentemente, tem-se um material mais fino quando o ensaio é feito com defloculante.

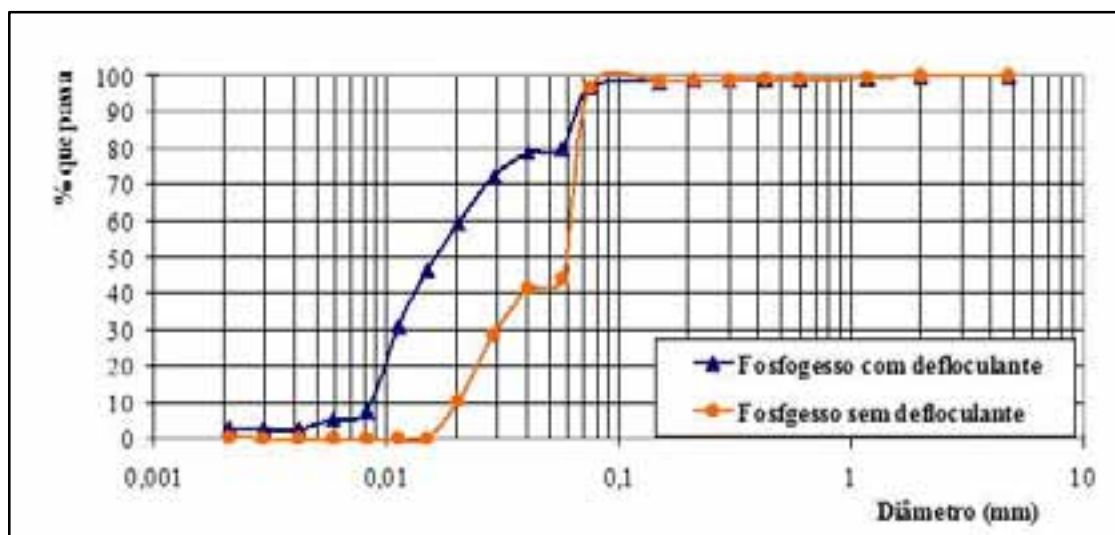


Figura 2.7 - Curva granulométrica do fosfogesso com e sem defloculante (MESQUITA, 2007).

Castilhos Jr. et al. (1998) estudaram a mineralogia do fosfogesso utilizando a Técnica de Difração de Raio X (DRX), que permite caracterizar a fase cristalina dos materiais e, em certos casos, ela pode ser útil para analisar os hidratos mal cristalizados. Sobre amostras de fosfogesso úmido a análise por DRX mostrou a presença de sulfato de cálcio dihidratado (gesso), brushita ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e traços de quartzo (SiO_2).

Segundo Silvestre (2002) os mesmos fatores responsáveis pelas características físicas do fosfogesso também interferem nas características químicas bem como nas características qualitativas e quantitativas de suas impurezas.

2.2.4.2 Características químicas

A composição química do fosfogesso varia com a natureza da rocha fosfática de origem e das operações industriais para a obtenção do ácido fosfórico. Desta forma, a concentração de cada elemento ou composto químico deste subproduto varia entre as indústrias. No processo úmido, 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 (MESQUITA, 2007).

No processo úmido, particularmente, a definição química do fosfogesso está relacionada aos processos de suas reações químicas entre suas matérias-primas e o grau de filtragem usado na separação entre ácido fosfórico e fosfogesso (OLIVEIRA, 2005).

Kobayashi (2000) estudou a composição química do fosfogesso, cujo resultado está apresentado na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição do fosfogesso da indústria de fertilizante Fosfértil (KOBAYASHI, 2000).

Compostos	Teor %
Umidade Higroscópica	0,11
Cal – CaO	18,80
SO ₃	31,50
Rn ₂ O ₃	44,30
P ₂ O ₅	1,07
Mg	0,09

O fosfogesso pode apresentar metais pesados em sua composição, sendo que quando esses elementos são encontrados em nível de concentrações acima das recomendadas pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), torna-se poluente oferecendo riscos como contaminação de solos e mananciais de água que estejam próximos dos depósitos de fosfogesso.

A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos por Mesquita (2007) para o ensaio de massa bruta do fosfogesso gerado em Catalão-GO, solo característico do Município de Goiânia-GO e Misturas entre eles denominadas A (50% de solo local + 50% fosfogesso), B (80% de solo local + 20% fosfogesso) e C (20% de solo local + 80% fosfogesso).

O fosfogesso apresentou como característica cor amarela, aspecto sólido (pó), umidade de 0,94% e pH (solução a 50%) de 6,88. A Mistura C apresentou cor bege, aspecto sólido, umidade de 1,83% e pH (solução a 50%) de 7,10. O solo apresentou cor marrom, aspecto sólido, umidade de 2,07% e pH (solução a 50%) de 7,22. Já as Misturas A e B apresentaram características de cor marrom claro, aspecto sólido, umidade de 5,93% e 5,03% e pH (solução a 50%) de 7,33 e 7,29, respectivamente. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o pH da amostra deve ser inferior a 2 e superior ou igual a 12,5 para se caracterizar como um material corrosivo. Com isso, as amostras não apresentam características de corrosividade. No teste “Point Filter” não há líquidos livres, portanto não há percolado junto do resíduo. Assim, observa-se que, com exceção do Zinco, o fosfogesso apresenta os mesmos

elementos presentes na massa bruta do solo. Já as Mistura A e C apresenta o Cádmio, mas em pequena quantidade (MESQUITA, 2007).

Tabela 2.3 – Resultados das características químicas da massa bruta das amostras estudadas (MESQUITA, 2007)

Parâmetros	Características da massa bruta (mg/kg)*					L.D. (mg/kg)*
	Fosfogesso	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	
Óleos e Graxas	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1%
Arsênio	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Berílio	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Cádmio	< 5	5	6	5	6	5
Chumbo	27	24	26	23	25	10
Cianeto	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Cobre	11	36	33	29	17	3
Cromo Total	36	166	89	125	59	5
Cromo Hexavalente	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Fenol	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Vanádio	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	20
Mercúrio	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Zinco	< 5	44	66	40	44	5
Selênio	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Níquel	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10

(*) L.D. – Limite de Detecção abaixo da sensibilidade analítica, resultados obtidos considerando-se massa (peso) para a análise igual a 2 (duas) gramas e a sensibilidade dos equipamentos utilizados

2.2.4.3 Características radiológicas

Tanto a utilização como a deposição do fosfogesso, apresenta vantagens e desvantagens decorrentes das impurezas nele contidas. Essas impurezas, metais pesados e radionuclídeos, naturais da cadeia do urânio e tório, dependem da composição da rocha fosfática original e do processamento químico e determinam, em grande parte, o gerenciamento ambiental das pilhas de deposição (ROSA, 1997).

A preocupação ambiental associada à deposição em pilhas decorre do fato de que o fosfogesso, embora composto principalmente de sulfato de cálcio, contém certas impurezas – metais pesados, ânions, e radionuclídeos das séries naturais – que podem percolar através da

pilha e atingir fontes de água superficiais e subterrâneas (SILVA; CIPRIANI; TADDEI, 2002).

Nas rochas fosfatadas, os vários membros da série natural do Urânio (^{238}U), Tório (^{232}Th) e seus produtos de decaimento encontram-se em equilíbrio radioativo. Após a digestão da rocha, em plantas que utilizam o processo por via úmida para a produção de fertilizantes, o equilíbrio é quebrado, havendo redistribuição dos radionuclídeos. Aproximadamente 86% do ^{238}U e 70% do ^{232}Th vão para o fertilizante, enquanto 80% do ^{226}Ra vai para o fosfogesso (JACOMINO, 2003).

Segundo Rajj (2003), com exceção da rocha de Italaia – CE, ainda não explorada comercialmente, as rochas fosfáticas nacionais apresentam baixos níveis de radioatividade natural, em comparação com as estrangeiras. Para os fosfogessos fabricados com origem de rocha nacional, análises realizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), detectaram atividade de ^{226}Ra de 37 a 407 Bq Hg^{-1} , sendo que 1 Bq = 1 dps (desintegração por segundo), unidade de atividade de radiação utilizada pelo Sistema Internacional (SI).

Devido à presença de urânio e tório nas rochas fosfáticas e a redistribuição desses elementos e de seus descendentes durante o processamento químico da rocha fosfática, a indústria de fertilizantes fosfatados é considerada um exemplo típico de fonte de radiação natural tecnologicamente aumentada. Fontes de radiação tecnologicamente aumentada é o termo atualmente utilizado para identificar aquelas fontes de radiação natural, decorrentes de uma alteração das condições em que se apresentavam originalmente no meio ambiente como consequência da adoção de uma determinada tecnologia, sem que o objetivo dessa prática seja a alteração provocada (SILVA, 2001).

O comportamento químico dos traços de elementos radioativos presentes na rocha fosfática confere aos produtos e subprodutos dessa indústria concentrações de atividades de urânio, tório e seus descendentes, superiores, em alguns casos, às encontradas na rocha fosfática. A concentração relativa de urânio e tório nas rochas fosfáticas está associada à sua origem. As rochas sedimentares apresentam concentrações mais baixas de urânio do que de tório, enquanto que nas rochas ígneas, preponderantes no Brasil, ocorre exatamente o contrário (MENZEL, 1968⁵; HABASHI, 1980⁶ apud ROSA, 1997).

Atualmente, a indústria da construção civil utiliza uma grande variedade de materiais, com diferentes origens e finalidades. Grande parte dos materiais de construção é de

⁵ MENZEL, R. G. **Uranium, radium and thorium content in phosphate rocks and their possible radiation hazard.** J. Agr. Food Chem, 1968.

⁶ HABASHI, F. **Application to phosphate rock.** Fert, 1980.

origem mineral e, portanto, apresentam concentrações de radionuclídeos de meia-vida que existe na crosta terrestre desde a sua formação. As concentrações em que esses radionuclídeos aparecem nos materiais de construção traduzem, na maioria das vezes, os níveis encontrados no solo da região. Com o aumento da umidade, a taxa de exalação aumenta até que seja atingida uma determinada concentração de água nos poros da matriz sólida. A partir desse ponto, ela decresce significativamente, o que pode ser explicado pelo fato de que, apesar do aumento na taxa de emanação, o transporte por difusão tende a diminuir com o aumento da concentração de água nos poros, uma vez que o coeficiente de difusão do radônio na água é menor do que no ar (ROSA, 1997).

A radioatividade é sempre prejudicial e problemática, mas os materiais radioativos artificiais podem apresentar radioatividade muito maior do que a radioatividade natural, ocasionando sérios problemas de disposição desses resíduos (RAIJ, 2003).

O gás radônio ^{222}Rn é resultado do decaimento do ^{226}Ra , uma impureza comumente encontrada no fosfogesso. O uso do fosfogesso como material de construção, principalmente em ambientes onde a taxa de ventilação é baixa, pode provocar impactos radiológicos devido à exalação do gás ^{222}Rn ser um risco de se obter doenças cancerígenas (SILVA, 1997).

A Tabela 2.4 mostra concentrações de radionuclídeos no fosfogesso em alguns países. Verifica-se que o fosfogesso produzido nos Estados Unidos e na Europa apresenta, em termos gerais, maiores concentrações de elementos radioativos, este resultado pode ser explicado pela origem da rocha fosfática que pode conter maiores concentrações de elementos radioativos e do processo de produção do ácido fosfórico.

Tabela 2.4 – Concentrações de radionuclídeos no fosfogesso (modificado de FERNANDES; RIO; FRANKLIN, 2004).

País	^{226}Ra (Bq/kg)	^{238}U (Bq/kg)	^{210}Pb (Bq/kg)	^{210}Po (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
EUA	2700 – 1358	22 – 451	348 – 1853	355 – 1765	11
Europa	15 – 1700	500	1300	900	10
África do Sul	45 – 48	64 – 73	76 – 132	-	205 – 284
Austrália	280 – 350	10 – 24	320 – 440	150 – 360	4 – 7

Segundo Mazzili (2005), a radioatividade medida no fosfogesso é da mesma magnitude das observadas nos fertilizantes, fato este que torna viável o reaproveitamento do fosfogesso como insumo aplicável na engenharia do meio ambiente.

Os resíduos considerados radioativos podem ser classificados segundo os termos NORM “Naturally Occurring Radioactive Materials” e TENORM “Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials”. O NORM trata-se de minérios que contêm material radioativo de ocorrência natural. Já TENORM são os resíduos ou subprodutos contendo material radioativo de ocorrência natural concentrado tecnologicamente. O resíduo fosfógeno se enquadra no termo TENORM, pois ocorre uma quebra do equilíbrio radioativo da rocha fosfática no processo de produção de fertilizantes e geração do fosfógeno (CANUT, 2006).

A preocupação com o uso indiscriminado do resíduo fosfógeno existe e deve ser avaliada através de projetos de pesquisas e trabalhos específicos a serem realizados envolvendo sempre o órgão responsável pelas ações de radioproteção no país (CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear), instituições acadêmicas e empresas responsáveis pela geração do resíduo.

O fato de a rocha fosfática brasileira ter alto teor do elemento tório pode explicar os baixos níveis de exalação de ^{222}Rn , ressaltando-se que o teor de radionuclídeos existentes na rocha é bastante influenciado pela característica geológica da mesma no local de sua extração (CANUT, 2006).

Mesquita (2007) realizou a leitura radiométrica do fosfógeno e de misturas de solo tropical e fosfógeno nas proporções de 50%, 80% e 20% para verificar se ocorre algum risco de contaminação radiométrica durante o processo de reaproveitamento do fosfógeno. Nesta etapa foram obtidas leituras 0,00mR/h, mostrando que não houve emissão de irradiação dos materiais estudados. Assim, estas misturas não apresentam nenhum risco de utilização.

2.2.5 Disposição final do fosfógeno e impactos ambientais

A disposição em áreas próximas às fábricas é a forma mais comum de descarte do fosfógeno, e é frequentemente adotada em quase todo mundo. Nesta situação existem duas alternativas: “a úmido” ou “a seco”. A disposição final realizada “a úmido” é a mais comum, onde o fosfógeno é descartado juntamente com a água residual da unidade industrial, na forma de polpa, através de bombeamento para lagoas de sedimentação, onde ele é decantado, e depois de seco é acumulado em pilhas em áreas especialmente destinadas para tal (CANUT, 2006).

As lagoas de sedimentação são limitadas por diques construídos com o próprio fosfogesso. A água ácida é separada e drenada para lagoas chamadas de “lagoas pulmões” (Figura 2.8). Estas lagoas funcionam para coletar a água da chuva e também a água escoada da polpa de fosfogesso para a recirculação na planta da fábrica de ácido fosfórico. O excesso de água das “lagoas pulmões” é geralmente enviado para estações de tratamento. O tratamento da água contaminada, para ser reutilizada para consumo, é muito dispendioso e por isso evitado pelas empresas fabricantes de ácido fosfórico (CANUT, 2006).



Figura 2.8 – Armazenamento do fosfogesso pelo método “a úmido” (CANUT, 2006).

O método de estocagem “a seco” é feito em pilhas em áreas próximas as indústrias, cuja umidade do material é de aproximadamente 10% (Figura 2.9).

A estocagem final do resíduo fosfogesso é sempre acompanhada de elevados gastos às empresas. A disposição em pilhas exige, quase sempre, a disponibilidade de grandes áreas, que, dependendo do preço das terras, pode elevar muito o custo da disposição. E, ainda, devem ser estabelecidos métodos de estocagem seguros com a finalidade de evitar possíveis contaminações causadas por elementos presentes no fosfogesso.



Figura 2.9 – Armazenamento do fosfogesso em pilhas

Segundo a Resolução 307 do CONAMA (2002), o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando em todos os casos em que seja possível, as condições de reutilização e de reciclagem.

Estudos realizados por Canut (2006) e Mesquita (2007), classificaram o fosfogesso como Classe II B e Classe II A, respectivamente. A classificação de resíduos não pode ser baseada apenas no critério da disposição final, mas deve também considerar a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

O termo impacto ambiental está definido na resolução 001 (CONAMA, 1986) e corresponde a:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

No que diz respeito ao conceito oficial de impacto ambiental, vale a observação de que este abrange apenas os efeitos da ação humana sobre o meio ambiente, desconsiderando os efeitos relativos aos fenômenos naturais, questionamento este levantado por Tommasi (1994), que considera “o conceito de impacto ambiental, basicamente, um conceito antropocêntrico”, por estar calcado nos efeitos das ações humanas sobre os ecossistemas, envolvendo também os efeitos das mesmas sobre a própria sociedade humana e sua economia.

A produção global anual de fosfogesso pode ser estimada em aproximadamente 130 milhões de toneladas, sendo 12,2 milhões de toneladas provenientes do Brasil, para os quais deve-se encontrar algum tipo de uso ou disposição eco-compatível, com custos toleráveis para a indústria produtora de ácido fosfórico (CASTILHOS JR. et al., 1998).

No Brasil o consumo aparente de fósforo pela agricultura tem crescido a taxas elevadas. De 48.200 toneladas em 1950 passou a ser de 3,4 milhões de toneladas em 2003, sendo que 49,3% são produzidas no Brasil (LAPIDO-LOUREIRO; MELAMED, 2006). Isto implica que houve um crescimento acentuado do fosfogesso e que os problemas causados pela

estocagem do mesmo afeta vários países, sendo cada vez mais importante o desenvolvimento de técnicas que tornem possível a utilização sustentável deste resíduo.

As pilhas de fosfogesso contêm grandes quantidades de materiais poluentes, que podem ser lixiviados pelas águas das chuvas e atingir mananciais subterrâneos ou superficiais. Para prevenir tais problemas, diversas técnicas são empregadas, como a impermeabilização do solo sob as pilhas e o controle da percolação e escoamento da água, através da construção de canais de drenagem. Todas essas técnicas, no entanto, não dispensam um constante monitoramento da área em torno das lagoas e pilhas para detectar possíveis percolações de elementos nocivos.

Dentre os principais impactos ambientais decorrentes da estocagem do fosfogesso pode-se destacar: contaminação atmosférica com fluoretos e outros elementos tóxicos, alteração das características físicas e químicas das águas superficiais e subterrâneas, emissão de gás radônio, inalação de poeiras radioativas, exposição direta a radiação gama e impacto visual (CASTILHOS JR. et al., 1998).

Outros problemas relativos à estocagem incluem o escoamento superficial, erosão e estabilidade das pilhas. Vários pesquisadores estão estudando a utilização de métodos de redução de fluoretos, radionuclídeos e metais pesados no fosfogesso por tratamento antes, durante e depois da produção do ácido fosfórico.

A periculosidade da disposição final do fosfogesso ocorre em função da concentração dos elementos contaminantes específicos. Inúmeros estudos mostraram que nem o radônio e os elementos traços, presentes no fosfogesso, poderão ser lixiviados das montanhas de fosfogesso para o subsolo.

Segundo Castilhos et al. (1998), a eliminação do fosfogesso através da deposição da lama em bacias é algumas vezes escolhida, tendo em vista que é a solução economicamente mais razoável. Todavia, existem algumas objeções embasadas sobre grande acidez e a concentração de íons encontrados na água do resíduo, conforme mostrado na Tabela 2.5, onde verifica-se a elevada acidez do fosfogesso e alta concentração íons de elementos quem podem comprometer a qualidade do solo e da água.

Em relação à contaminação atmosférica, podem ocorrer emissões de gás fluoreto que estão associadas à operação das pilhas. Entretanto, o transporte de partículas contendo F^- é um problema potencial também para pilhas inativas. As rochas fosfáticas podem conter até 4% de fluoretos que formam HF durante o processo de produção de ácido fosfórico. Os fluoretos permanecem na fase líquida, mas durante o processo, SiF_4 e HF gasosos podem ser formados, podendo causar danos à qualidade do ar (CASTILHOS JR. et al., 1998).

Tabela 2.5 – Concentração de íons nas bacias de deposição do fosfogesso (CASTILHOS JR. et al., 1998).

Íon	Concentração (mg/L)
Fosfato (P ₂ O ₅)	6,000 – 12,000
Fluoreto	3,000 – 5,000
Sulfato	2,000 – 4,000
Cálcio	350 – 1,200
Amônia	0 – 100
Nitrato	0 – 100
pH	1,0 – 1,5

2.2.6 Possíveis aplicações do fosfogesso

Para diminuir os expressivos volumes e custos de depósitos de fosfogesso gerado durante a fabricação do ácido fosfórico pelas indústrias de fertilizantes, tem-se desenvolvido muitos estudos para avaliar o uso desse resíduo, como forma de minimizar os possíveis impactos ambientais causados pela disposição do mesmo, além de inserir no mercado um novo produto com possibilidades viáveis para vários ramos de atividade. Atualmente tem-se verificado a utilização do fosfogesso em vários setores. A seguir, tem-se um resumo sobre alguns tipos de aplicação.

2.2.6.1 Agricultura

O fosfogesso tem sido utilizado na agricultura como fonte de nutrientes e para modificar certas propriedades físicas e químicas do solo. Assim, o fosfogesso é utilizado para reduzir a saturação do alumínio tóxico e como fonte de cálcio para solos tropicais, permitindo um maior aprofundamento das raízes das plantas e melhor absorção de água dos nutrientes do solo. Ele também é utilizado como redutor da alcalinidade e da salinidade de solos como alto teor de sódio. Além disso, o fosfogesso é fonte de enxofre para solos carentes deste elemento (CASTILHOS JR. et al., 1998).

O fosfogesso também é utilizado como condicionador de solos agrícolas, promovendo reduções significativas na resistência da camada compactada de solos altamente intemperizados (NUEMBERG et al; 2005).

Estudos recentes mostraram a eficiência do uso de fosfogesso em culturas de soja e feijão, em vários tipos de solo, sendo verificado que houve um incremento de 28% a 37% na produtividade da soja, enquanto o feijão apresentou um aumento de produção variando de 13% a 54% (OLIVEIRA, 2005).

O fosfogesso pode, entretanto, ser uma fonte potencial de riscos ambientais, como por exemplo, a assimilação de radionuclídeos e outros elementos pelas plantas e acúmulo radioativo no solo; contaminação de águas superficiais e subterrâneas.

Embora existam diversas razões para aplicação do fosfogesso, não se pode perder de vista aquelas que constituem as grandes necessidades. A principal, em nível mundial, é sem dúvida, o uso em solos alcalinos com excesso de sódio. A segunda necessidade importante, mais relevante no Brasil, é a aplicação em solos com subsolos ácidos. A terceira aplicação, em geral subestimada, é o fornecimento de enxofre. Em âmbito nacional, o uso do fosfogesso como insumo agrícola está previsto no Decreto nº 86.955, de 18 de fevereiro de 1982 (BRASIL, 1982). O material enquadra-se como fertilizante mineral simples, com garantias estabelecidas de mínimo de 16% de cálcio e 13% de enxofre e também como corretivo, na qualidade de condicionador de solo. Como obtenção, está indicada a alternativa do produto ser resultante da fabricação do ácido fosfórico (RAIJ, 2003).

O fosfogesso é largamente utilizado na agricultura de climas áridos ou semi-áridos para remover o sódio do solo. A reação está representada na Equação 2.4.



As quantidades aplicadas para a recuperação do solo dependem da capacidade de troca de cátions. Em solos ricos no mineral argila montmorilonita e matéria orgânica, as necessidades podem atingir dezenas de toneladas por hectare, mas as aplicações não são freqüentes e também não se trata de condição comum no Brasil, embora possa ocorrer no semi-árido nordestino. Na recuperação de solos sódicos não há substituto para o sulfato de cálcio (RAIJ, 2003).

A utilização de novas técnicas de manejo do solo pode produzir uma melhora significativa nos fatores limitantes de seu uso para fins agrícolas. Dentro deste contexto, têm sido desenvolvidos vários estudos sobre o uso agrícola do fosfogesso, verificando-se que uma grande variedade de frutas, legumes, forragem, sementes oleosas e grãos, cultivados em solos tratados com esse material, têm apresentado aumento na qualidade do produto e na colheita (OLIVEIRA, 2005).

Pesquisas sobre a aplicação de fosfogesso têm mostrado resultados positivos de sua atuação, principalmente, como fonte de cálcio e enxofre, na correção de solos sódicos e na correção de solos ácidos.

2.2.6.2 Estabilização Química

Gerrity et al. (1994) estudaram a resistência à compressão simples de misturas de fosfogesso e cimento com teores de cimento variando entre 8%, 10% e 12%. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios com carregamento de velocidade constante de 1,3 mm/min. Foram usadas duas energias, uma próxima a normal e a outra com 95% da energia relativa à do Proctor modificado. Foram comparados com o comportamento de misturas compostas de cimento e areia de rio. Foi concluído que para as misturas de fosfogesso e cimento compactadas com 95% da energia modificada e teor de cimento de 12% proporcionaram resistência à compressão simples superiores a 2,1 MPa, resistência mínima para 7 dias de cura, conforme a NBR 1336 (ABNT, 1990). As misturas de areia de rio com 10% de cimento compactados na energia normal e curadas no período de 7 dias mostraram resistência a compressão simples de 49,3% acima das misturas de fosfogesso e 12% de cimento, compactadas e curadas nas mesmas condições.

Digirmenicia; Okucub; Turabib (2005) estudaram a utilização de fosfogesso e cinzas volantes para estabilização de solos. Foram realizadas misturas de solos contendo 5%, 10% e 15% de cinza volante, e misturas contendo solo com 2,5% de cinza + 2,5% de fosfogesso; solo com 5% de cinza + 5% de fosfogesso e solo com 7,5% de cinza + 7,5% de fosfogesso. Foi concluído que houve redução da plasticidade do solo tanto nas misturas de solo-cinza volante quanto nas misturas de solo-cinza volante e fosfogesso. O peso específico aparente seco máximo aumenta com o aumento do teor de fosfogesso nas misturas. Já nas misturas de solo com cinza volante ocorre o contrário, ou seja, à medida que aumenta o teor de cinza volante o peso específico aparente seco máximo diminui. Neste estudo também foram realizadas misturas de solo com cimento, sendo verificado que estas misturas apresentaram melhor desempenho em termos de resistência à compressão simples, porém as misturas contendo cinza e fosfogesso também são viáveis e ainda representam um ganho ambiental e econômico em virtude do elevado custo do cimento (Tradução nossa).

Oliveira (2005) estudou a utilização de fosfogesso di-hidratado originários de três depósitos diferentes, denominados pilhas 1, 2 e 3. Esse sistema de numeração está relacionado com a idade das pilhas, sendo a número 1, a mais velha e considerada inativa. As pilhas 2 e 3

estavam ativas, ou seja, em uso. O critério de escolha das pilhas com idades diferentes baseou-se em avaliar se a mesma interfere na resistência a compressão simples.

Pesquisas iniciais, utilizando o material da pilha 3 produziram misturas com baixa resistência à compressão. Já os estudos realizados com o fosfogesso da pilha 2 produziram misturas com características de resistência a compressões mais aceitáveis. Este fato deve-se ao pH do fosfogesso, pois enquanto o material da pilha 3 era de 2,5; o encontrado no material da pilha 2 era de 5,2. Este estudo mostrou que a resistência alcançada com estabilização com cimento Portland obteve melhores resultados com depósitos inativos, com sete anos de idade, do que em depósitos ativos. Portanto nesta pesquisa chegou-se a conclusão que a acidez do material parece ser um fator primordial na resistência, refletindo no pH. Os depósitos ativos, com pH aproximadamente de 2,5 desenvolveram pouca ou nenhuma resistência a compressão, enquanto os depósitos de pilhas mais velhas mostraram alto grau de estabilização, (OLIVEIRA, 2005).

2.2.6.3 Pavimentação

O uso de fosfogesso em base e sub-base de pavimentos tem sido foco de muitas pesquisas, com o objetivo minimizar os possíveis impactos ambientais causados pela sua disposição, além de inserir no mercado um novo material que pode contribuir para a melhoria das propriedades do solo.

Um das características físicas marcantes do fosfogesso é sua finura, ou seja, possui alta porcentagem de finos. Por outro lado, o concreto rolado compactado (CCR) ou “Roller Compacted Concrete” (RCC) é uma técnica relativamente recente de construção de camadas de rolamento de pavimentos, que a cada dia ganha mais adeptos na área rodoviária, basicamente por sua simplicidade de operação. Nesta técnica o concreto tem que ter boa parte de seus vazios preenchidos por material fino para que o mesmo se transforme em uma massa completamente compatível (CASTILHOS et al., 1998), neste caso, o uso de fosfogesso como material fino pode ser viável.

Nos Estados Unidos, trechos de rodovias foram construídos utilizando o resíduo fosfogesso. Um exemplo do sucesso alcançado pelo uso do fosfogesso está localizado na cidade de La Porte no estado do Texas. Testes e monitoramentos realizados ao longo de 5 anos, após a construção de um trecho da malha viária, sinalizaram e indicaram que o pavimento sob tráfego intenso ainda apresenta boa capacidade de suporte, ocasião em que

utilizou-se na base misturas de fosfogesso e cimento nas proporções de 90% e 10%, respectivamente (CHANG et al., 1989).

Silvestre; Parreira e Kobayashi (2001) realizaram ensaios de avaliação da influência do tipo de cimento Portland para ensaios de Compressão Simples (RCS) e deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento para uso em construção de pavimentos. Como resultado, observaram que o tipo de cimento não tem efeito predominante no comportamento da mistura, se comparado com os efeitos das outras variáveis. Entretanto, a consideração do tipo de cimento é importante, visto que, a longo prazo, cimentos com teores elevados de aluminato tricálcico conduzem à diminuição de resistência e rigidez.

Estudos realizados por Mesquita (2007) mostraram o comportamento de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos em pavimentos, analisando a viabilidade técnica e ambiental dessa aplicação. O resultado desta pesquisa foi que o fosfogesso misturado a solos finos regionais pode ser utilizado na construção de aterros, camadas de reforço do subleito e até sub-base de pavimentos. No entanto, não é interessante a incorporação de elevados teores de fosfogesso na mistura, sendo recomendado trabalhar com teores inferiores a 30% devido apenas à questão de resistência mecânica. Com base nos estudos ambientais, nenhum problema foi detectado.

Capítulo 3

SOLOS TROPICAIS

3.1 DEFINIÇÕES

Nogami e Villibor (1995) definem os solos tropicais como aqueles que apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação no mesmo de processos geológicos ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas. As variações mineralógicas constatadas nos solos tropicais são muito maiores que nos solos de outras regiões.

Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos saprolíticos e os solos lateríticos.

Solo saprolítico é definido como aquele que resulta da decomposição ou desagregação “*in situ*” da rocha (considerada material consolidado da crosta terrestre), mantendo ainda, de maneira nítida, a estrutura (ou fábrica) da rocha que lhe deu origem (COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE, 1985⁷ apud NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Diferente dos solos superficiais lateríticos, os solos saprolíticos possuem a sua fração de areia e pedregulho constituída por uma grande variedade de minerais distintos do quartzo. Isso não exclui, entretanto, que em muitos solos saprolíticos haja também a possibilidade de o quartzo ser o mineral predominante ou mesmo exclusivo. Contribui, ainda, para complicar o efeito da mineralogia no comportamento dos solos saprolíticos, o fato de que muitos grãos são parcialmente intemperizados, sendo possível a existência de grãos com amplitude de variação quanto ao grau de intemperização. Dentre os vários minerais que podem ocorrer nos solos saprolíticos pode-se destacar o feldspato e a mica. Do ponto de vista prático pode-se ressaltar que os efeitos mais marcantes do aumento da porcentagem da mica no solo são: elevação do limite de liquidez e diminuição do índice de plasticidade; elevação de expansibilidade por um aumento de umidade; diminuição da massa específica aparente seca máxima quando compactado; elevação da umidade ótima de compactação, diminuição drástica da capacidade de suporte e redução sensível do módulo de resiliência (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

⁷ COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolítico soils.** Progress Report, 1985.

Os solos lateríticos são variedades de solo superficial pedogenético, típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Os solos superficiais lateríticos apresentam uma mineralogia relativamente simples. O quartzo é um mineral encontrado com muita frequência e, quase sempre, de maneira predominante nas frações areia e pedregulho desses solos. Quando não se especifica o mineral da fração areia e pedregulho, pode-se admitir que o constituinte é o quartzo. Este mineral imprime ao solo propriedades e comportamentos decorrentes de suas peculiaridades como elevada resistência à compressão; elevado módulo de elasticidade; elevada dureza; massa específica absoluta em torno de $2,65 \text{ g/cm}^3$; elevada estabilidade química, sendo atacado rapidamente somente pelo ácido fluorídrico e, lentamente, pelo processo de laterização (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Os solos lateríticos têm sua fração argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, de onde surge sua peculiar coloração avermelhada. Estes sais se encontram, geralmente, recobrando agregações de partículas argilosas. Os solos lateríticos apresentam-se, na natureza, geralmente não saturados, com índice de vazios elevado, daí sua pequena capacidade de suporte. Quando compactados, entretanto, sua capacidade de suporte é elevada, sendo por isto muito empregado em pavimentação e em aterros. Após compactado, um solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água (PINTO, 2006).

A quantidade e a proporção dos constituintes do solo determinam o valor da capacidade de troca catiônica (CTC). Nos solos desenvolvidos em condições tropicais e subtropicais, como em muitos solos brasileiros, predominam argilominerais (caulinita) e ocorrem elevados teores de óxido de ferro e de alumínio, o que resulta em baixa CTC (MEURER, 2004).

Os grãos de quartzo, quando presentes na fração areia dos solos lateríticos superficiais, apresentam freqüentemente algumas peculiaridades adicionais, que permitem identificar o seu caráter laterítico. Dessas peculiaridades pode-se destacar: presença de película de óxidos, que dá uma tonalidade avermelhada, rósea, arroxeadada ou amarelada ao conjunto; depressões, que indicam efeitos da dissolução lenta. Outros minerais resistentes a ação das intempéries podem também ocorrer nesses solos. Dentre eles, destacam-se aqueles designados genericamente de minerais pesados, sendo encontrados com maior frequência a magnetita, ilmilita, tilo, turmalina, zircão. A magnetita e a ilmilita podem, às vezes, ser os minerais predominantes da fração areia dos solos conhecidos por “terra roxa”, esses solos são

muitos freqüentes na região Centro-Sul e Sul do Brasil (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). A Figura 3.1 ilustra a ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro.

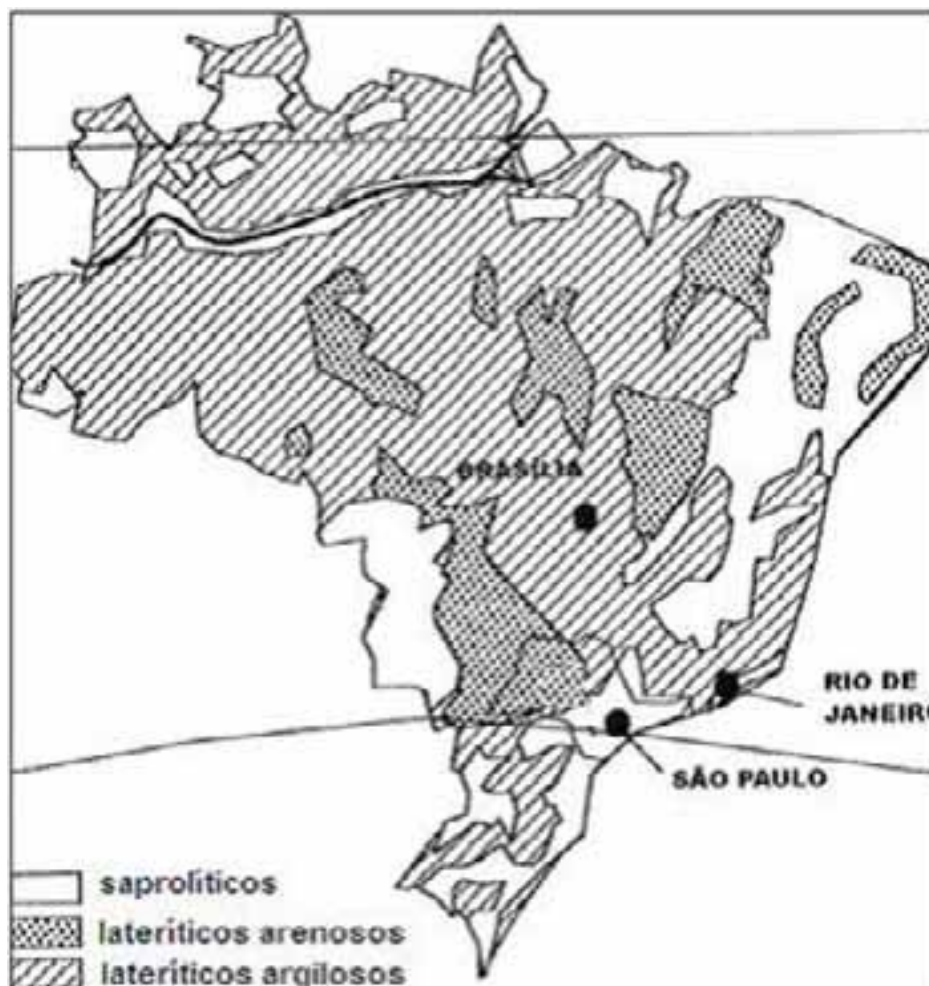


Figura 3.1 - Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro (VILLIBOR et al., 2000).

Segundo Gidigasú⁸(1976) apud Cardoso (2002), cerca de 40% das terras emersas do globo são recobertas por solos formados pelo intemperismo sincrônico (Figura 3.2). Condições de alta temperatura e forte umidade (características de regiões tropicais, limitadas a uma faixa balizada pelos paralelos 30°N e 30°S de latitude) favorecem a lateritização. Estes materiais formam uma extensa série de diferentes solos e que é denominada por vários termos: laterito, solo laterítico, solo tropical, entre outros.

⁸ GIDIGASU, M.D. (1976) *Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Netherlands, 570 p.

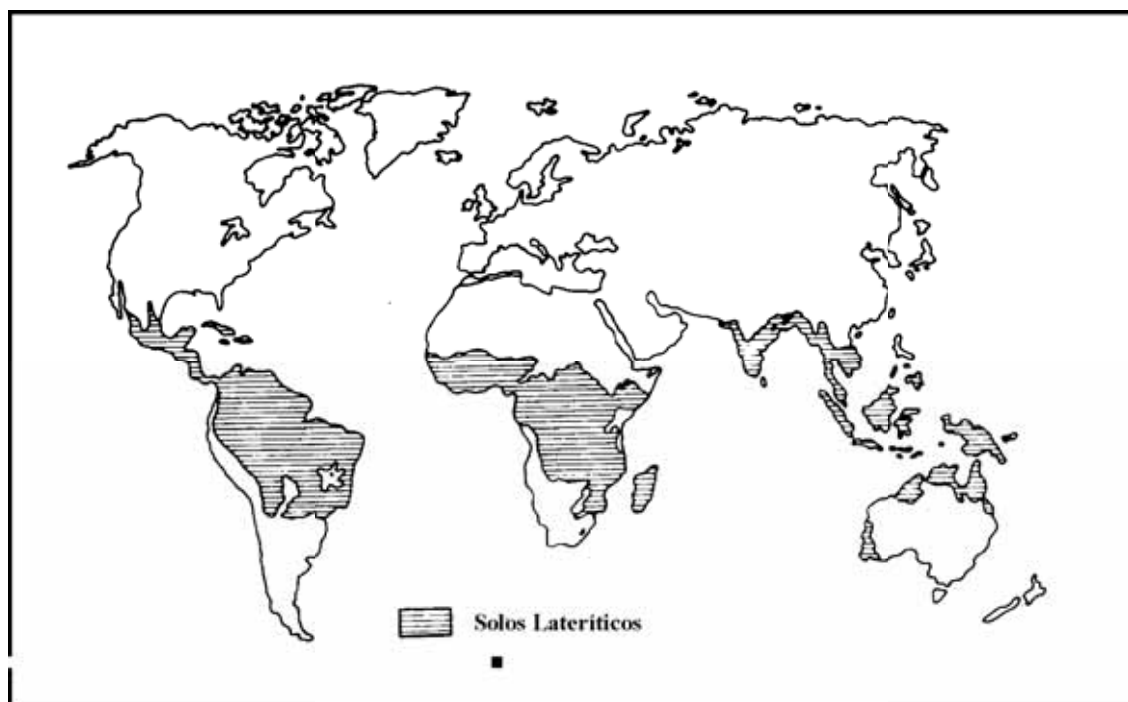


Figura 3.2 - Distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície da Terra (modificado de QUIÑONES⁹, 1963 apud CARDOSO, 2002).

3.2 GÊNESE E CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS

A maior influência da atividade biológica na formação do solo verifica-se na porção superior do manto de intemperismo, com o desenvolvimento de vegetação de porte cada vez maior. Entretanto, essa parte do manto é muito susceptível aos fatores climáticos, os quais determinam o tipo de intemperismo, bem como as condições de vida (biótopo) dos seres envolvidos (biocenose) na formação dos solos, sejam eles microorganismos ou seres mais desenvolvidos (plantas ou animais). O material-mãe influencia, até certo ponto, muitas propriedades do solo. Sua influência é maior nas regiões mais secas e frias, e nos estágios iniciais do desenvolvimento do solo. Nas regiões mais úmidas com o decorrer do tempo, outros fatores obscurecem a influência do material-mãe, fonte da matéria mineral do solo (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

De uma maneira geral, a matéria orgânica influi em muitas propriedades dos solos, tais como a absorção e a retenção de água, armazenamento de bases em formas trocáveis e a capacidade de fornecer nitrogênio, fósforo, água, enxofre e outros macro e micro-elementos nutritivos; influi ainda na estruturação do solo, proporcionando-lhe boa

⁹ QUIÑONES, P.J. (1963) **Compaction Characteristics of Tropically Weathered Soils**. PhD. Thesis, University of Illinois, USA, 134 p.

aeração, facilitando as operações de preparo do solo e controlando as perdas por erosão (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

A posição topográfica controla a formação de alguns oxissolos nas regiões tropicais. A origem desses solos difere, conforme estejam localizados nas chapadas ou nas vertentes. Nas chapadas, formam-se pelas reações normais do intemperismo e pelos processos pedogenéticos; nas vertentes, caracterizam-se por uma quantidade relativamente grande de umidade que se desloca lateralmente, procedente de vertentes mais acima. Os constituintes móveis liberados pelo intemperismo migram com essa água, sendo o ferro e o manganês mais móveis do que o alumínio, verificando-se uma segregação lateral desses elementos. O alumínio torna-se relativamente concentrado na chapada; o ferro na vertente abaixo; e o manganês sendo mais móvel, migra para baixo. O conteúdo de ferro nos oxissolos das vertentes é devido, principalmente, a precipitação de compostos de ferro cristalinos e amorfos nos vazios dos solos, e dos depósitos coluviais das vertentes (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

Nas regiões tropicais de baixa ou moderada altitude, em terrenos bem drenados, os solos praticamente não contem húmus mesmo sob densa cobertura vegetal. Nas regiões tropicais, o húmus encontra-se apenas em terrenos pantanosos. Isto ocorre devido, em grande parte, à atividade bacteriana nos trópicos. As bactérias são numerosas em todos os solos, porém seu máximo desenvolvimento é impedido pelas temperaturas relativamente baixas nas altas latitudes. Nessas regiões, a destruição de húmus devida aos referidos organismos é mais lenta do que sua formação e acumulação. Nos trópicos, as temperaturas mais elevadas favorecem consideravelmente o desenvolvimento das bactérias até atingir um máximo, sendo o húmus destruído tão logo seja formado. Nos pântanos, as águas impedem a presença de ar no solo impossibilitando a ação bacteriana, e desse modo, favorecendo a acumulação de húmus no solo. Os solos das regiões tropicais são ricos em óxidos de ferro e de alumínio, apresentando-se com coloração avermelhada ou amarelada pela oxidação do ferro (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

As reações químicas entre os minerais e as soluções meteóricas ou os componentes atmosféricos constituem o intemperismo químico é bem mais evidenciada nas regiões intertropicais. Segundo Carvalho (1995), os tipos de reações que acarretam as alterações químicas no ambiente superficial são: hidratação-desidratação, oxidação-redução, dissolução-precipitação, carbonatação-descarbonatação, hidrólise e queluviação.

De acordo com Cardoso (2002) os minerais dos solos são resultantes da dinâmica química do alumínio, do ferro e da sílica dentro do processo de laterização. A Figura 3.3

apresenta os tipos fundamentais de alteração das rochas, a natureza e estabilidade dos minerais e as características mais importantes dos produtos obtidos.

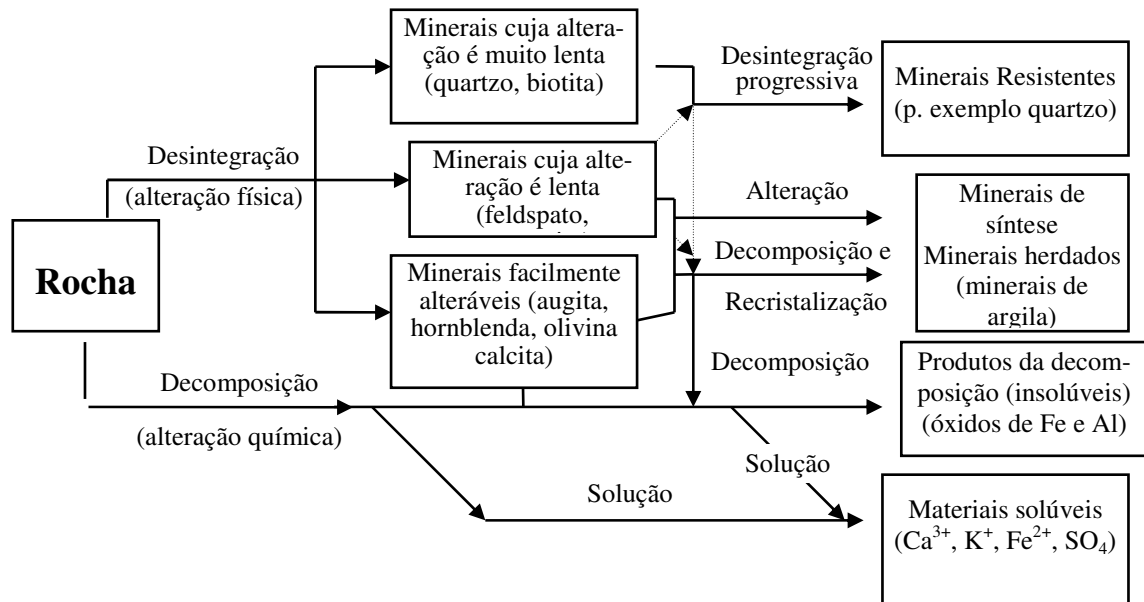


Figura 3.3 - Tipos fundamentais de alteração das rochas (modificado de BUCKMAN; BRADY¹⁰, 1960 apud CARDOSO, 2002).

Os efeitos da dominância dos processos de alteração física ou química são freqüentes. Os produtos obtidos, dos quais se apresentam apenas aspectos gerais, são sem dúvidas muito diferentes nas suas características. Convém afirmar que no segundo e terceiro grupos dos produtos obtidos (minerais de argila e produtos insolúveis) da sua composição, pode apresentar-se grande variedade e, portanto, intensidade diferente na manifestação de certas propriedades fundamentais. Atestam este fato a composição e propriedades dos vários minerais de argila e dos oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio (CARDOSO, 2002).

Os diversos minerais que constituem a crosta terrestre apresentam diferente resistência à alteração, uns decompondo-se rapidamente logo nos primeiros estágios da meteorização e outros persistindo mesmo após meteorização bastante intensa. No segundo caso, típico dos processos intempéricos das regiões tropicais de clima úmido, estão o quartzo (SiO₂), o rutilo/anatásio (TiO₂) e o zircão (Zr(SiO₄)) (CARDOSO, 2002).

Admite-se que os cristais dos minerais de argila são constituídos por lâminas de unidades estruturais, sobrepostas de forma análoga à que se verifica nos cristais de mica,

¹⁰ BUCKMAN, H.O; BRADY, N.C. The Nature and Properties of Soils. The MacMillan Company, New York, USA, 567 p, 1960.

estando os íons constituintes dispostos segundo um reticulado regular. Em vários minerais de argila, a estrutura está eletrostaticamente desequilibrada, como resultado, segundo se admite, da substituição de íons durante a formação dos minerais, sem ou com pequena alteração das dimensões das unidades estruturais e denominadas, por isso, substituições isomórficas (CARDOSO, 2002).

No reticulado de íons de muitos minerais de argila existem duas unidades (GRIM¹¹, 1953 apud CARDOSO, 2002):

- **Unidade Octaédrica** - constituída por um íon de alumínio, ferro ou magnésio que ocupa o centro de um octaedro cujos vértices são ocupados por íons O^- ou OH^- (Figura 3.4);

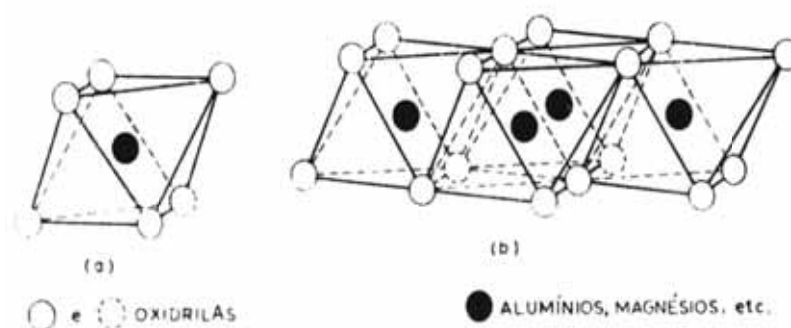


Figura 3.4 - Representação esquemática das unidades e camada octaédrica (GRIM¹¹, 1953 apud CARDOSO, 2002).

- **Unidade Tetraédrica** - formada por um íon de silício que ocupa o centro de um tetraedro cujos vértices são ocupados por íons O^- (Figura 3.5) ou, em certos casos, OH^- .

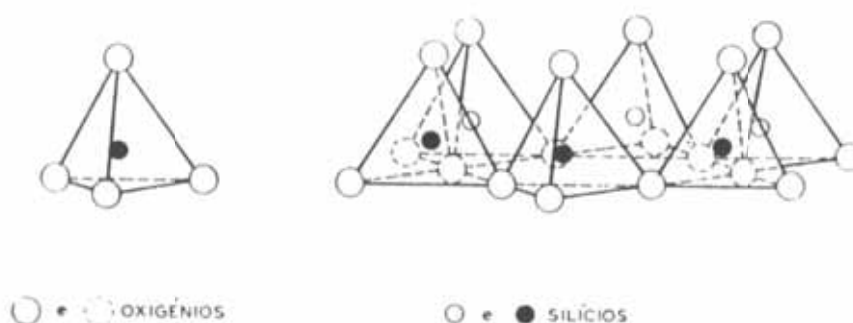


Figura 3.5 - Representação esquemática das unidades e camada tetraédrica (GRIM¹¹, 1953 apud CARDOSO, 2002).

A caulinita apresenta-se em cristais platiformes de contorno hexagonal, freqüentemente alongados numa direção. A superfície das partículas não tem em geral

¹¹ GRIM, R.E. *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 384 p, 1953.

dimensões inferiores a 0,3 - 0,4 μm e a sua espessura varia de 0,05 a cerca de 2 μm . Em resultado das suas características estruturais, a caulinita possui carga elétrica e poder de retenção de água fracos, em comparação com os minerais dos outros grupos; praticamente não apresenta expansibilidade; torna-se plástica para teor de umidade relativamente baixo (CARDOSO, 2002).

Na formação da montmorillonita e outros minerais do respectivo grupo, há sempre substituições isomórficas. A fórmula da montmorillonita natural difere consideravelmente da teórica e o valor da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, varia usualmente entre 3,0 e 7,0. Além disso, há sempre desequilíbrio elétrico, tendo os cristais excesso de cargas negativas resultantes de substituições isomórficas. A montmorillonita apresenta-se, em geral, em massas irregulares de partículas extremamente pequenas. Quando se conseguem observar pormenores das partículas individuais, verifica-se que são constituídas por minúsculas lamelas empilhadas. Algumas partículas têm espessura da ordem dos 2 μm . O comprimento e largura são provavelmente da ordem de 10 a 100 vezes a espessura. Em comparação com as partículas de caulinita, as de montmorillonita são bastante menores (CARDOSO, 2002).

As partículas da illita apresentam excesso de cargas negativas resultantes de substituições isomórficas, mas devem-se apenas a substituições de alumínio nas camadas octaédricas. Os íons potássio da estrutura parecem atuar como pontes que ligam as unidades umas às outras e, deste modo, ao contrário do que sucede com a montmorillonita, o reticulado das illitas é muito pouco expansível na presença da água e outros líquidos polares (CARDOSO, 2002).

3.3 APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO

O melhor aproveitamento de solos tropicais em pavimentação aconteceu no estado de São Paulo, nos anos 50, quando foram constatados valores de capacidade de suporte por meio do ensaio de “California Bearing Ratio” (CBR) extremamente elevados para variedades argilo-arenosos e argilas. Esta observação estimulou o emprego de solos locais para camadas de reforço do subleito e sub-bases. O comportamento altamente satisfatório destes pavimentos levou a adoção destes materiais para bases de pavimentos, sendo executados gradativamente segmentos experimentais em rodovias e no final da década de 60 em vias urbanas. O desempenho foi plenamente satisfatório, apesar de envolver materiais e espessuras consideradas inadequadas pelos procedimentos tradicionais (VILLIBOR et al., 2000).

Segundo Villibor et al. (2000), a condição essencial para o uso de solos lateríticos de granulação fina como bases, “in natura” ou através de misturas com agregados, é a ocorrência destes próximo as obras e condições ambientais adequadas. Segundo dados geológicos, pedológicos e climáticos disponíveis, estas condições existem em regiões de todos os estados brasileiros, exceto, em alguns do semi-árido nordestino. A maioria dos pavimentos executados com bases de solos lateríticos apresenta comportamento altamente satisfatório. Para o emprego de solos lateríticos em pavimentos urbanos, tanto o projeto geométrico quanto o de drenagem devem atender as seguintes características técnicas:

- Perfil longitudinal com declividade mínima de 1%;
- Seção transversal com declividade entre 3% a 4%;
- Obrigatoriedade de execução de guias e sarjetas;
- Recomendável a execução de passeio, preferencialmente com revestimento em concreto, para evitar infiltração da água por trás das guias e sarjetas;
- Execução de um sistema eficiente de captação de águas pluviais e servidas, evitando o acúmulo de água em pontos baixos;
- Execução de drenagem profunda para rebaixamento do lençol freático a pelo menos 1,50 m em relação à cota final de terraplanagem.

Geralmente, quando aplicam-se as normas tradicionais verifica-se através de ensaios de laboratório (granulometria, limites de liquidez e plasticidade, CBR ou Índice de Suporte Califórnia - ISC) que o solo laterítico não é indicado para a utilização em pavimentação, devido ao fato dos solos lateríticos apresentarem-se, na natureza, geralmente não-saturados e com índice de vazios elevados, gerando baixa capacidade de suporte (PINTO, 2000). No entanto, com a realização de pesquisas, verificou-se que a utilização desse material no campo e a definição de novos parâmetros (módulo resiliente e metodologia MCT – Miniatura Compactado Tropical) têm-se observado o seu bom desempenho (REZENDE, 2003).

As estruturas de pavimentos utilizados em países de clima temperado, se adotadas para vias urbanas em clima tropical, se encontrariam superdimensionadas em função do menor tráfego atuante, das diferentes condições ambientais e do tipo de solo do subleito. Levando em consideração a extensão do território brasileiro, o grande déficit de pavimentos, a pouca disponibilidade de material pétreo em algumas regiões, torna-se imprescindível a utilização de materiais locais em substituição aos materiais pétreos (VILLIBOR et al., 2000).

Nas regiões tropicais, ocorrem espessas camadas de solos lateríticos arenosos e argilosos, sendo os tipos argilosos mais freqüentes, a não ser em certas regiões, como por exemplo, no Noroeste do estado de São Paulo, onde predominam os tipos arenosos finos. Nesse contexto, é de extrema importância a utilização de argilas lateríticas em base de pavimento de baixo custo, principalmente nas zonas periféricas de crescimento urbano recente. O comportamento de pavimentos de baixo custo com base de argila laterítica está ligado às peculiaridades geotécnicas e de ocorrência das argilas lateríticas utilizadas (VILLIBOR et al., 2000).

De acordo com Villibor et al. (2000), os defeitos que mais afetam a vida de um pavimento com base de solo laterítico são:

- Excesso de material betuminoso, principalmente, em base com teor de umidade elevado e constituídas por solos coesivos, resultando em baixa penetração do ligante betuminoso e gerando uma superfície com excesso de ligante, provocando escorregamentos ou exsudação do ligante no revestimento;
- Aplicação de imprimadura sobre superfície com excesso de pó, inibindo a penetração do ligante betuminoso na base e gerando uma interface sem aderência e pouco coesiva;
- Penetração deficiente da imprimadura, gerando superfícies pouco coesivas.

A adoção de pavimentos com solos lateríticos para vias de tráfego muito leve tem se tornado uma alternativa extremamente interessante e vantajosa para Municípios de pequeno porte, conseguindo-se executar praticamente o dobro da área pavimentada com os mesmos recursos financeiros, quando da substituição de bases convencionais por bases com solos lateríticos (VILLIBOR et al., 2000).

3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Quando um solo não tem as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada, principalmente quanto a sua resistência, torna-se necessário corrigi-lo ou substituí-lo por outro, com a adição ou subtração de componentes, ou com a ação de componentes químicos (orgânicos ou inorgânicos). A escolha da técnica deve ser baseada na economia e ainda na finalidade da obra.

De acordo com Guimarães (1998) a estabilização dos solos pode ser obtida pelo uso de várias técnicas que podem ser reunidas em dois grupos:

- As que empregam meios mecânicos, como a correção da granulometria e plasticidade, com a adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes até a obtenção dos parâmetros estabelecidos por norma;
- As que empregam meios químicos, utilizando aditivos orgânicos ou inorgânicos, como materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland e outros.

A opção por um ou outro tipo de estabilização é influenciada por uma série de fatores, entre os quais os econômicos, a finalidade da obra e, em particular, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas. Particularmente, os solos das regiões tropicais úmidas têm recebido tratamentos eficientes sobre seus problemas, devido às significativas diferenças de suas propriedades e comportamentos. Por isso, vem exigindo estudos e pesquisas para se chegar a procedimentos mais apropriados (GUIMARÃES, 1998).

A estabilização de solos finos com a cal é uma alternativa de custo relativamente baixo, se comparada às soluções tradicionais, sendo que sua utilização em rodovias iniciou-se nos Estados Unidos, na década de 20. No Brasil, os primeiros relatos datam do final da década de 60 (OLIVEIRA, 2005).

Para os solos lateríticos o processo mais importante de estabilização é a ação pozolânica, devido à mineralogia destes solos apresentarem uma organização peculiar estável (associação dos argilo-minerais com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio), não apresentando problemas de plasticidade e expansão (mesmo quando muito argilosos) (FERREIRA, 2006).

Segundo Guimarães (1998), a adição da cal em solos promove, após alguns minutos de contato, mudanças nas propriedades físicas do solo. São alterados:

- A granulometria, pela floculação ou agregação das partículas originais. Isto se traduz por deslocamento da curva granulométrica para o lado grosseiro;
- Os Limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta. O índice de plasticidade diminui, face as variações dos limites de liquidez e plasticidade;
- Na compactação, observa-se que, para uma mesma energia, há diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;
- Em relação à expansão-contração, há redução dos valores de expansão e contração, isto é, menor variação volumétrica;

- E o aumento da capacidade de suporte, real parâmetro para definição do sucesso ou não da estabilização.

Outra ação, a longo prazo, está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. Os solos apesar de não se constituírem em pozolanas propriamente ditas podem apresentar uma fração argila com caráter pozolânico mais ou menos acentuado, dependendo da sua natureza mineralógica e textural.

Quando a cal é adicionada ao solo, seu pH, em geral entre 4,5 e 6,5, eleva-se para 11-12. São criadas, assim, as condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila e até o próprio quartzo podem reagir com a cal, formando aluminatos, silicatos, e aluminossilicatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, todos com influência no processo de estabilização pelas suas características cimentícias. Além da temperatura, o grau de cristalinidade dos minerais e o teor de água existente no sistema aparecem como fatores de influência na química solo-cal (GUIMARÃES, 1998).

Segundo Molina (2004), muitos resíduos não podem ser empregados sozinhos por apresentarem baixa capacidade de suporte. Misturas contendo fosfogesso e outros estabilizantes, como a cal, podem resultar em materiais adequados que apresentem algumas vantagens como: resistência a deformações; boa capacidade de retenção de água; boa capacidade de suporte; baixo peso e boa capacidade de neutralização de materiais orgânicos.

Capítulo 4

PAVIMENTAÇÃO

4.1 DEFINIÇÕES

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente a resistir a esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los; melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança; resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O pavimento classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento. Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, já que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos veículos, e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da via terminada após a conclusão dos cortes e aterros. O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento, conforto e segurança (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT, 2006) os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos, sendo que:

- Flexível: é aquele onde todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Como exemplo tem-se o pavimento constituído por uma base de brita ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica;
- Semi-Rígido: caracteriza-se por uma base cimentada com algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, uma camada de solo cimento, revestida por uma camada asfáltica;
- Rígido: é aquele onde o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Como exemplo tem-se o pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

4.2 HISTÓRICO

Uma das mais antigas estradas pavimentadas implantadas não se destinou a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas. Para a construção das pirâmides no Egito (2600-2400 a.C.), foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. O atrito era amenizado com umedecimento constante por meio de água, azeite ou musgo molhado (SAUNIER; DOLFOS; GEFFROY¹², 1936 apud BERNUCCI et al., 2008).

Na região geográfica histórica do Oriente Médio, nos anos 600 a.C., a Estrada de Semíramis cruzava o rio Tigre e margeava o Eufrates, entre as cidades da Babilônia (região da Mesopotâmia – em grego, região entre rios – que abrangia na antiguidade aproximadamente o que é hoje o território do Iraque) e Ecbatana (reino da Média, no planalto iraniano). Na Ásia Menor, ligando Iônia (Éfeso) do Império Grego ao centro do Império Persa, Susa (no Irã de hoje), há registro da chamada Estrada Real (anos 500 a.C.), que era servida de postos de correio, pousadas e até pedágio, tendo mais de 2.000 km de extensão. Na América Latina, merecem destaque as estradas construídas pelos incas, habitantes da região hoje ocupada pelo Equador, Peru, norte do Chile, oeste da Bolívia e noroeste da Argentina (BERNUCCI et al., 2008).

A pavimentação já foi objeto de estudos e prática de construções desde longa data, quando foram formuladas técnicas e procedimentos que se tornaram, com sucessivas

¹² SAUNIER, B.; DOLFOS, C.; GEFFROY, G. **Histoire de la locomotion terrestre**. L'Illustration. Paris, 1936.

atualizações, o estado da arte da Engenharia Rodoviária. A partir dos anos 50, as técnicas de pavimentação tiveram grande desenvolvimento, por meio de um intercâmbio entre Brasil e Estados Unidos nesta área, em virtude de uniformizar e normatizar as especificações de serviços e as técnicas de construção (FERNANDES; RIO; FRANKLIN, 2004).

Uma das primeiras estradas reportadas teve início em 1560, à época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá. Trata-se do caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga. Contudo, o grande impulso na construção rodoviária brasileira ocorreu nas décadas de 1940 e 1950, devido à criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946, oriundo do imposto sobre combustíveis líquidos e da criação da Petrobrás em 1953 (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo dados do DNIT (2006), aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é rodoviário. O modal ferroviário responde por 21%, o aquaviário por 14%, o dutoviário por 5% e o aéreo por menos de 1%. O modal de transporte rodoviário encontra-se em parte em estado deficiente, sendo os investimentos nas rodovias prioritários, não apenas por ser o modal mais utilizado, mas por existir menor investimento quando comparado aos demais modais. Destaca-se ainda que pelo modal rodoviário circulam 96% dos passageiros.

Sendo assim, verifica-se a existência de uma grande demanda nas construções de pavimentos rodoviários e urbanos o que implicará na necessidade de haver materiais disponíveis para serem utilizados nessas obras.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

4.3.1 Convencionais

As bases e sub-bases flexíveis são camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno ou ainda, pelas misturas desses materiais. Essas camadas puramente granulares são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de uma mistura de materiais que apresentam granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos (DNIT, 2006).

Quando esses materiais ocorrem em jazidas, com designações tais como cascalho, saibros, etc., tem-se o caso de utilização de materiais naturais (solo “in natura”). Muitas vezes, esses materiais devem sofrer beneficiamento prévio, como britagem e peneiramento, com vista ao enquadramento nas especificações. Quando se utiliza uma mistura de material natural

e pedra britada têm-se as sub-bases e bases de solo-brita. Quando se utiliza exclusivamente produtos de britagem têm-se as sub-bases e bases de brita graduada ou de brita corrida (DNIT, 2006).

As bases e sub-bases rígidas são camadas confeccionadas com concreto de cimento. Esses tipos de bases e sub-bases têm acentuada resistência à tração, fator determinante no seu dimensionamento. Podem ser distinguidos dois tipos de concreto:

- Concreto plástico: próprio para ser adensado por vibração manual ou mecânica;
- Concreto magro: semelhante ao usado em reforço de fundações, no que diz respeito ao pequeno consumo de cimento, mas com consistência apropriada à compactação com equipamentos rodoviários.

Em relação ao revestimento, o DNIT (2006) o classifica em dois tipos: revestimentos flexíveis e revestimentos rígidos.

Os revestimentos flexíveis betuminosos são constituídos por associação de agregados e materiais betuminosos. Esta associação pode ser feita de duas maneiras clássicas: por penetração invertida ou direta e por mistura.

- Revestimentos betuminosos por penetração invertida: são revestimentos executados através de uma ou mais aplicações de material betuminoso, seguida de idêntico número de operações de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometrias apropriadas;
- Revestimentos betuminosos por penetração direta: são os revestimentos executados através do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria apropriada, sendo cada camada, após a compressão, submetida a uma aplicação de material betuminoso e recebendo, ainda, a última camada, uma aplicação final de agregado miúdo;
- Revestimentos por mistura: o agregado é pré-envolvido como o material betuminoso, antes da compressão. Quando o pré-envolvimento é feito em usinas fixas resultam os pré-misturados propriamente ditos e, quando é feito na pista, têm-se os pré-misturados na pista (“road mixes”). Conforme os seus respectivos processos construtivos são adotados ainda as denominações: pré-misturado à frio, quando os tipos de agregados e de ligantes utilizados permitem que o espalhamento seja feito a temperatura ambiente e pré-misturado a quente quando os tipos de agregados e de ligantes são misturados e espalhados na pista ainda quentes.

No estado de Goiás, o material tradicionalmente utilizado na confecção de sub-bases e bases é o cascalho laterítico. Sabe-se que este é um material que apresenta ótimo desempenho para essa aplicação. No entanto, os órgãos municipais e estaduais, bem como as empresas têm encontrado dificuldade na exploração e utilização desse material. As jazidas existentes são poucas, seus licenciamentos ambientais são processos complexos e onerosos e suas localizações estão cada vez mais distantes das obras, aumentando o custo com a distância de transporte. Sendo assim, sua utilização está cada vez menos viável.

4.3.2 Não convencionais

Os estudos de materiais não utilizados tradicionalmente em pavimentação têm sido realizados com o objetivo de solucionar pelo menos um dos problemas listados a seguir:

- Necessidade de utilizar materiais com elevado desempenho mecânico, principalmente em vias de elevado volume de tráfego;
- Substituição de materiais convencionais que estão apresentando dificuldade de obtenção e utilização;
- Absorção de diversos tipos de resíduos, visando reduzir impactos ambientais devido à estocagem ou disposição inadequada.

Para melhorar o desempenho mecânico e, conseqüentemente, a vida útil dos pavimentos flexíveis, têm-se estudado principalmente a incorporação de produtos como polímeros na massa asfáltica. Polímeros são macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas e de cadeia longa, denominadas monômeros (MANO, 1985¹³, 1991¹⁴ apud BERNUCCI et al., 2008).

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misturado adequadamente e melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas (BERNUCCI et al., 2008).

¹³ MANO, E.B. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.

¹⁴ MANO, E. B. **Polímeros, produção e aplicação**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.

No caso da substituição de materiais tradicionais, como o cascalho laterítico tem-se a utilização dos solos tropicais, conforme descrito no capítulo 3, e adoção de processos de estabilização granulométrica ou química. Como no estado de Goiás, grande parte do solo encontrado pode ser caracterizada como argila laterítica, a cal aparece como uma boa opção.

A fabricação da cal e o seu emprego podem ser evidenciados nas civilizações egípcia, grega e romana. Estes estudos relatam o uso da cal na argamassa para construção de cais, de pavimentos e de edificações. Na América colonial, a simples calcinação do calcário foi um dos processos primitivos de fabricação adotada pelos colonizadores, mas, só recentemente sob a influência da pesquisa em engenharia química, que a fabricação da cal desenvolveu-se numa grande indústria, com um controle técnico exato, produzindo um material uniforme a custo mais baixo (SHREVE; BRINK, 1997).

Pela tradição, múltipla utilidade e benefícios sociais e econômicos, a cal é o principal produto derivado dos calcários/dolomitos/conchas calcárias. É obtida através de uma reação química simples – calcinação, mas requer conhecimento e habilidade para alcançar o padrão de qualidade ideal. A decomposição térmica dos calcários/dolomíticos/conchas calcárias resulta na formação de dois produtos – cal e dióxido de carbono. Esta reação, quimicamente bem estabelecida em relação às massas moleculares é reversível para ambos os carbonatos de cálcio e de magnésio (GUIMARÃES, 1998). A reação química pode ser representada pelas Equações 4.1 e 4.2. A termodinâmica fornece as duas informações básicas da calcinação, relacionadas com a reação e ligadas às condições de temperatura, calor e pressão.



O resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e cálcio magnésio (CaO-MgO), denominados genericamente de cal virgem ou cal aérea ou cal viva (GUIMARÃES, 1998).

A qualidade química do produto depende, primeiro, das características e das impurezas contidas na rocha que lhe deu origem. Assim recebe o nome de cal cálcica o produto com alto teor de óxido de cálcio; cal dolomítica quando possui relação entre óxidos de cálcio e de magnésio igual a molecular CaO/MgO; e de cal magnesiana quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a cal dolomítica (GUIMARÃES, 1998).

Dentre as rochas minerais utilizadas pelo homem destacam-se as rochas carbonatadas, que constituem 0,25% da crosta, encontram-se distribuídas não só nas formações mais antigas, quanto nas mais recentes. Em geral são sedimentos metamórficos ou não, ou mais raramente são rochas intrusivas, relacionadas à atividade vulcânica alcalina. Essas rochas são constituídas por 50% ou mais dos minerais calcitas, aragonita e dolomita. Entre os componentes minerais considerados como impurezas ou como secundários estão: quartzo, certos silicatos argilosos, óxidos metálicos de ferro e manganês, matéria orgânica, fosfatos, sulfetos, sulfatos e fluoretos. Os metais que acompanham mais freqüentemente a calcita e a dolomita são: titânio, cádmio, vanádio, cromo, cobalto, níquel, cobre, gálio, zircônio, molibdênio e estanho. As aplicações do calcário/dolomito são direcionadas pela composição física e química. Destacam-se as utilizações como agregados, pedras ornamentais, filer, meio filtrante, refratário, pigmento de tintas, pó de mineração, filer de misturas asfálticas, corretivo de acidez do solo, nas indústrias de vidro, cimento Portland, cerâmica, lã mineral, ração mineral, cimento de alvenaria e cal (OLIVEIRA, 2005).

A cal é vendida como cal viva (virgem) contendo não menos que 90% de CaO e de 0 a 5% de magnésio, além de pequena porcentagem de carbonato de cálcio, de sílica, de alumina e de dióxido férrico, presentes como impurezas (SHREVE; BRINK, 1997).

Quando provém de rochas carbonatadas puras, a cal virgem é um produto inorgânico, branco. Quando apresenta coloração creme, amarelada ou levemente cinza, é sinal que contém impurezas. Apresenta-se como cristais isolados ou conglomerados cristalinos, de dimensões e espaço intercristalinos variados, observáveis somente por microscopia (OLIVEIRA, 2005).

A cal hidratada é obtida pela calcinação de calcário, contendo argila; a natureza do produto obtido depois do contato com a água varia de uma massa mole até um cimento endurecido. A cal com grande teor de cálcio endurece apenas com a absorção do dióxido de carbono do ar, o que é um processo lento; a cal hidratada também endurece lentamente, mas pode ser usada submersa em água (SHREVE; BRINK, 1997).

A cal hidratada é o nome genérico de todas as formas de hidratos; mas a cal hidratada, propriamente dita, se apresenta como um pó seco, com 17% a 19% de água combinada, quando dolomítica normal e 24% a 27% de água combinada, quando cálcica ou hidratada sob pressão (OLIVEIRA, 2005).

A estabilização solo-cal provoca uma reação imediata reduzindo a plasticidade e a expansão dos materiais, sendo tradicionalmente atribuída à troca iônica, floculação das argilas e carbonatação. Em longo prazo ocorre um aumento progressivo da capacidade de suporte,

como resultado das reações pozolânicas que dão origem aos produtos cimentantes (FERREIRA, 2006).

Em relação à utilização de resíduos sólidos em pavimentação pode-se destacar: resíduos de construção e demolição, finos de pedreira e fosfogesso.

Devido a questões ambientais o uso de agregados reciclados de construção tem sido crescente em vários países e no Brasil. A aplicação em pavimentação tem sido muito procurada em função do grande consumo de materiais nesse tipo de obra e as suas características físicas e mecânicas adequadas, tornando o pavimento um local de disposição ideal para este resíduo. Os resultados laboratoriais de algumas pesquisas mostraram que o uso agregados reciclados atendem a norma ABNT NBR 15115 testados apresentaram baixa expansão em presença de água, e um valor de CBR adequado para uso em camada de reforço do subleito, sub-base ou mesmo base de pavimento em alguns casos (MOTTA et al., 2009).

Quintanilha (2008) estudou o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como constituintes estruturais de pavimentos flexíveis. Por meio de ensaios laboratoriais, as propriedades físicas e mecânicas de três dosagens contendo agregados reciclados foram determinadas, visando o seu emprego em camadas de reforço de subleito, sub-base e base. Juntamente com as análises laboratoriais, foi avaliado em conjunto um estudo de caso – duas pistas experimentais executadas em Goiânia, Goiás. Os resultados dos experimentos de laboratório mostraram que os agregados atendem às normas brasileiras para uso em bases e sub-base de pavimentos flexíveis. Os resultados dos ensaios de campo demonstram que os trechos analisados ainda apresentam bom comportamento estrutural, após um período de aproximadamente quatro anos de solicitação de tráfego, que corrobora a viabilidade técnica do uso de agregados de RCD.

Araújo (2008) estudou a utilização de resíduo de pedreira como material constituinte das camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. O resíduo estudado é oriundo do processamento da rocha do tipo micaxisto, sendo então denominado de pó de micaxisto, oriundo da pedreira do Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU-COMPAV). Foram estudadas as seguintes amostras: 1 (100% pó de micaxisto), 2 (20% pó de micaxisto e 80% solo), 3 (30% pó de micaxisto e 70% solo), 4 (solo), 5 (cascalho) e 6 (30% brita 1 e 70 % solo), para tanto foram realizados ensaios laboratoriais (Peso específico, Limites de consistência, Granulometria, Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio”) e de campo por meio dos ensaios de frasco de areia, “Speedy”, prova de carga sobre placa e penetrômetro dinâmico de cone, realizados durante a execução do trecho experimental. Sendo concluído que para o pó de micaxisto, o melhor

desempenho foi obtido para dosagem de 20 % (Amostra 2), comparáveis a materiais tradicionais, comprovando assim a possibilidade do uso desse resíduo em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Luz (2008) realizou estudos com o resíduo do setor de mineração de pedra britada da Região Metropolitana de Goiânia, importante provedor de recursos para o desenvolvimento econômico da região, além de grande gerador de resíduos oriundos de seu processo. A pesquisa iniciou-se pela caracterização físico-química de seu principal resíduo: o filer. Foram realizados ensaios de: caracterização, CBR, triaxial dinâmico, permeabilidade e compressão simples com dosagens variadas de solo argiloso laterítico com o filer. A partir dos resultados desses ensaios foi possível estabelecer que as dosagens de 30 % de filer dosado ao solo compactado na energia modificada e 20% de filer dosado ao solo compactado na energia intermediária podem ser aplicados, respectivamente, em base e sub-base de pavimentos flexíveis urbanos sujeitos a baixo volume de tráfego. Nesta pesquisa concluiu-se que o comportamento mecânico do trecho experimental executado com misturas solo-filer adéquam-se às condições estabelecidas pelas normas técnicas vigentes de pavimentação até o momento em que foram monitoradas, sendo que o seu comportamento mecânico é comparável com o obtido utilizando materiais convencionais.

Oliveira (2005) avaliou o comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal destinadas à construções de bases e sub-bases rodoviárias. As amostras dessas misturas foram submetidas a ensaios de compressão simples, compressão diametral e CBR. Os corpos-de-prova foram ensaiados sem imersão e após imersão previa por quatro horas. Para todos os teores de cal utilizados (0%, 3%, 5%, 7% e 10%) os corpos de prova foram compactados na energia Proctor modificado, sendo realizados vários teores de cura. Este estudo concluiu que valores crescentes de tempo de cura e cal conduziram a maiores valores de resistência e rigidez. Observou-se também que as misturas de fosfogesso e cal, no geral, apresentaram melhores resultados de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e coesão do que as misturas de solo-cal.

Mesquita (2007) estudou a incorporação de fosfogesso a solos finos locais e analisando a viabilidade ambiental e mecânica da utilização desta mistura em pavimentação. Para avaliar a questão mecânica, foram realizados ensaios laboratoriais (Peso específico, Limites de consistência, Granulometria, Compactação, Expansão e CBR, MCT e Módulo Resiliente), bem como análises químicas e ensaios ambientais, como lixiviação e solubilização em amostras de solos, fosfogesso e nas Misturas A (50% solo local + 50% fosfogesso), B (80% solo local + 20% fosfogesso) e C (20% solo local + 80% fosfogesso).

Com os dados obtidos pode-se verificar que o fosfogesso sozinho não pode ser utilizado em obras de pavimentação. Em relação aos ensaios ambientais, verificou-se que não há riscos de contaminação do meio ambiente, pois os materiais foram classificados como pertencentes à Classe II-A - Não inerte e Classe II - Não Perigoso. Nesta pesquisa, concluiu-se que misturas com teores inferiores a 30% de fosfogesso são viáveis do ponto de vista técnico.

Nesse contexto, verifica-se que o fosfogesso pode apresentar viabilidade de técnica para a construção de camadas de pavimentos flexíveis. Sendo assim, é importante realizar estudos que possam detectar suas potencialidades de utilização, considerando as questões técnicas, econômicas e ambientais. Podendo contribuir para a inclusão de um produto de baixo custo no mercado, e, ainda, refletir num impacto positivo no meio ambiente.

4.4 ENSAIOS LABORATORIAIS

4.4.1 Convencionais

4.4.1.1 Caracterização dos Materiais

Para a caracterização e classificação dos materiais são realizados ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica dos grãos. Os resultados obtidos são utilizados para classificação das amostras de acordo com o Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e Sistema Rodoviário de Classificação.

4.4.1.1.1 Granulometria

A análise granulométrica consiste da determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo.

Num solo, geralmente existem partículas de tamanhos diversos. Nem sempre é fácil identificar as partículas porque os grãos de areia, por exemplo, podem estar envoltos por uma grande quantidade de partículas argilosas, finíssimas, apresentando o mesmo aspecto de uma aglomeração formada exclusivamente por estas partículas argilosas. Para o reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo, realiza-se a análise granulométrica, que consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação. Quando há o interesse no conhecimento da distribuição granulométrica da porção mais fina do solo, emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes: a velocidade das partículas esféricas

num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ) e do diâmetro da esfera (ϕ) (PINTO, 2006).

Com os resultados obtidos nos ensaios de granulometria, traça-se a curva granulométrica, em um diagrama semi-logarítmico que tem como abscissa os logaritmos das dimensões das partículas, e como ordenadas as porcentagens, em peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada (porcentagem do material que passa). Na prática, utilizam-se faixas granulométricas entre as quais deverá se situar as curvas granulométricas do material a utilizar. Têm-se, assim, as faixas granulométricas dos materiais a serem utilizados como solo estabilizado ou as faixas granulométricas para materiais filtrantes dos drenos (DNIT, 2006).

4.4.1.1.2 Limites de Consistência

Só a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos sob ponto de vista da engenharia. A fração fina do solo tem uma importância muito grande neste comportamento. Quanto menores as partículas, maior a superfície específica (superfície das partículas dividida por seu peso ou por seu volume). O comportamento de partículas com superfícies específicas tão distintas perante a água é muito diferenciado. Por outro lado, as partículas de minerais de argila diferem acentuadamente pela estrutura mineralógica, bem como pelos cátions adsorvidos. Desta forma, para a mesma porcentagem de fração argila, o solo pode ter comportamento muito diferente, dependendo das características dos minerais presentes (PINTO, 2006).

Todos estes fatores interferem no comportamento do solo, mas o estudo dos minerais-argila é muito complexo. À procura de uma forma mais prática de identificar a influência das partículas argilosas, a engenharia substituiu por uma análise indireta, baseada no comportamento do solo na presença de água. Generalizou-se, para isto, o emprego de ensaios e índices propostos pelo engenheiro químico Atterberg, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônômico, adaptados e padronizados por Arthur Casagrande (PINTO, 2006).

Os limites permitem avaliar a plasticidade dos solos. Esta propriedade dos solos argilosos consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados sem variação de volume, sob certas condições de umidade. Entre os ensaios de rotina, objetivando a caracterização de um solo segundo sua plasticidade, estão a determinação do limite de

liquidez e a do limite de plasticidade. Quando a umidade de um solo é muito grande, ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. A seguir, à medida que se evapora água, ele endurece, passando do estado líquido para o estado plástico. A umidade correspondente ao limite entre os estados líquido e plástico é denominada limite de liquidez. Ao continuar a perda de umidade, o estado plástico desaparece, passando o solo para o estado semi-sólido. Neste ponto, a amostra de solo se desagrega ao ser trabalhado. A umidade correspondente a limite entre os estados plástico e semi-sólido é denominada limite de plasticidade. Continuando a secagem ocorre a passagem para o estado sólido (Figura 4.1). O limite entre esses dois últimos estados é denominado limite de contração (DNIT, 2006).

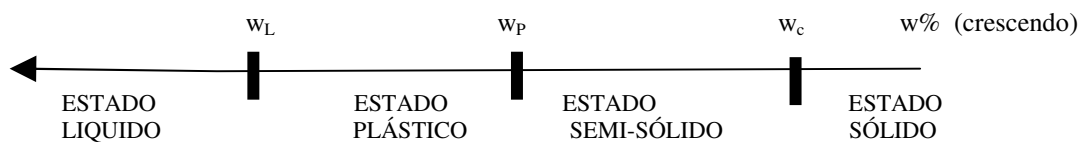


Figura 4.1 – Esquema dos estados físicos, e limites de consistência

A diferença numérica entre os limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_P) fornece o índice de plasticidade (IP). Este índice define a zona em que o terreno se acha no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e mínimo para as areias, fornece um valioso critério para se avaliar o caráter argiloso de um solo. Quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo. O índice de plasticidade é uma função da quantidade de argila presente no solo, enquanto o limite de liquidez e o limite de plasticidade são funções da quantidade e do tipo de argila.

Quando o material não tem plasticidade (areia, por exemplo), escreve-se $IP=NP$ (não plástico). O limite de liquidez indica a quantidade de água que pode ser absorvida pela fração do solo que passa pela peneira nº 40. Observa-se que quanto maior o w_L tanto mais compressível será o solo (DNIT, 2006). Todos os ensaios têm seus procedimentos definidos pelas Normas Brasileiras (NBR) publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.4.1.1.3 *Massa Específica dos Grãos*

Relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são denominadas massas específicas, e expressas geralmente em ton/m^3 , kg/dm^3 ou g/cm^3 .

De acordo com Senço (1997) a massa específica é a massa por unidade de volume apenas da parte sólida, excluindo-se todos os vazios, inclusive os ocupados pelo ar e os vazios nos poros das partículas.

No laboratório, determinam-se massas e as normas existentes indicam como se obter as massas específicas. Entretanto, na prática da engenharia, é mais conveniente trabalhar com pesos específicos (PINTO, 2006).

4.4.1.2 *Classificação dos solos*

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos diversos solos perante as solicitações de interesse da engenharia levou ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídos algumas propriedades. Desta tendência racional de organização da experiência acumulada, surgiram os sistemas de classificação dos solos (PINTO, 2006).

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

4.4.1.2.1 *Sistema Unificado de Classificação de solos (SUCS)*

O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) resultante de um trabalho conjunto do “Bureau of Reclamation” e do “Corps of Engineer”, assistido pelo professor Arthur Casagrande, da Universidade de Harvard, foi publicado, em 1953, pelo “Waterways Experiment Station”, como aperfeiçoamento e ampliação do sistema elaborado por Casagrande para aeroportos em 1943. O SUCS baseia-se na identificação dos solos de acordo com suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-lhes de acordo com seu comportamento quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações (DNIT, 2006). Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras. O primeiro aspecto a considerar é a porcentagem de finos presente no solo, considerando-se finos o material que passa na peneira nº 200 (0,075 mm). Se esta porcentagem for inferior a 50%, o

solo será considerado como um solo de granulação grosseira, G ou S. Se for superior a 50%, o solo será considerado de granulação fina, M, C ou O.

Sendo de granulação grosseira, o solo será classificado como pedregulho ou areias, dependendo de qual das duas frações granulométricas predominar. Quando a fração fina do solo for predominante, ele será classificado como silte (M), argila (C) ou solo orgânico (O), não em função da porcentagem das frações granulométricas silte ou argila, o que determina o comportamento argiloso do solo não é somente o teor de argila, mas também a sua atividade. São os índices de consistência que melhor indicam o comportamento argiloso (PINTO, 2006).

4.4.1.2.2 Sistema Rodoviário de Classificação

A classificação da “Transportation Research Board” (TRB) é muito empregada na engenharia rodoviária em todo o mundo, sendo originalmente proposta nos Estados Unidos. É também baseado na granulometria e nos limites de Atterberg. Neste sistema, também se inicia a classificação pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, só que são considerados solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na Classificação Unificada.

A seguir, são listados as características dos solo de cada um dos grupos e subgrupos deste sistema de classificação, relacionados a sua utilização em pavimentação.

- Grupo A-1 – o material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada, de fragmentos de pedra ou pedregulho, areia grossa, areia fina e uma aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. No entanto, este grupo também inclui fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc; que não contem aglutinantes no solo;
- Subgrupo A-1-a – inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante;
- Subgrupo A-1-b – inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa com ou sem aglutinante, de solo bem graduado;
- Subgrupo A-2 – este grupo inclui grande variedade de materiais, que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também os entre os materiais constituídos de silte e argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que

contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos;

- Subgrupos A-2-4 e A-2-5 – incluem solos contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos pelo grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico, excedendo os limites do grupo A-3;
- Subgrupos A-2-6 e A-2-7 – incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, exceção feita da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10% e porcentagem passando na nº 200, maiores que 15%, estão refletidos nos valores dos índices do grupo 0 a 4;
- Grupo A-3 – o material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena porcentagem de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositadas pelas correntes;
- Grupo A-4 – o solo típico deste grupo é siltoso não plástico ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº 200. Inclui também misturas de solo siltoso, com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices de grupo vão de 1 a 8, as porcentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo;
- Grupo A-5 – o solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado índice de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das porcentagens decrescentes de material grosso;
- Grupo A-6 – o solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os solos deste grupo sofrem comumente elevadas mudanças de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices de grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos;

- Grupo A-7 – o solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-6, com a diferença que possui a característica de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices de grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos;
- Subgrupo A-7-5 – encerra os materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevada mudança de volume;
- Subgrupo A-7-6 – inclui materiais com elevado índice de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

4.4.1.2.3 Classificação MCT (*Miniatura, Compactado, Tropical*)

Este sistema foi desenvolvido por Nogami e Villibor, com a finalidade básica de melhor caracterizar os solos tropicais. A técnica permite avaliar propriedades fundamentais dos solos associados à contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração de água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação, utilizando corpos-de-prova de dimensões reduzidas (50 mm de diâmetro x 50 mm de altura) (DNIT, 2006).

Essa sistemática inicialmente desenvolvida foi simplificada com a introdução do ensaio de compactação desenvolvido por Parsons (1976), envolvendo a determinação do parâmetro “Moisture Condition Value” (MCV), que adaptado a corpos-de-prova miniatura foi designado ensaio mini-MCV. Este ensaio permite determinar, dentre outras, uma propriedade empírica do solo (mini-MCV), que está associada a sua compactação: indicação do teor de umidade e energia de compactação mais adequados, identificação de solos problemáticos a compactação. Para fins de classificação dos solos lateríticos ou saprolíticos, foi introduzido por Nogami e Villibor um novo ensaio para avaliar o comportamento de corpos-de-prova obtidos no ensaio de mini-MCV, após imersão em água e sob condições padronizadas, resultando como subproduto uma nova sistemática classificatória de solos para fins rodoviários, denominada MCT – Miniatura Compactado Tropical (DNIT, 2006).

A metodologia MCT permite retratar as peculiaridades dos solos quando ao comportamento laterítico ou saprolítico, quantificando propriedades importantes para o uso em serviços rodoviários. Considera duas classes distintas de solos, ou seja, de comportamento laterítico (L) e de comportamento não laterítico (N) e sete subclasses correspondentes.

O coeficiente c' (coeficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade com Mini-MCV = 10) é obtido a partir das curvas de deformabilidade

resultantes do ensaio de compactação; e o índice e' (Equação 4.3) é calculado em função da perda de massa por imersão (DNIT, 2006) e da inclinação do ramo seco da curva de compactação (coeficiente d'), valores estes encontrados através do ensaio Mini-MCV. Segundo Nogami et al. (1993), é possível obter o grupo MCT em que os solos tropicais se enquadram através de um procedimento expedito táctil-visual, aproveitando-se a boa correlação entre o coeficiente c' e a contração de pastilhas de solo moldadas de maneira padronizada. A Figura 5.2 apresenta ábaco de classificação MCT.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (4.3)$$

Onde:

- e' = índice da Classificação MCT;
- P_i = perda de massa por imersão;
- d' = inclinação do ramo seco da curva de compactação.

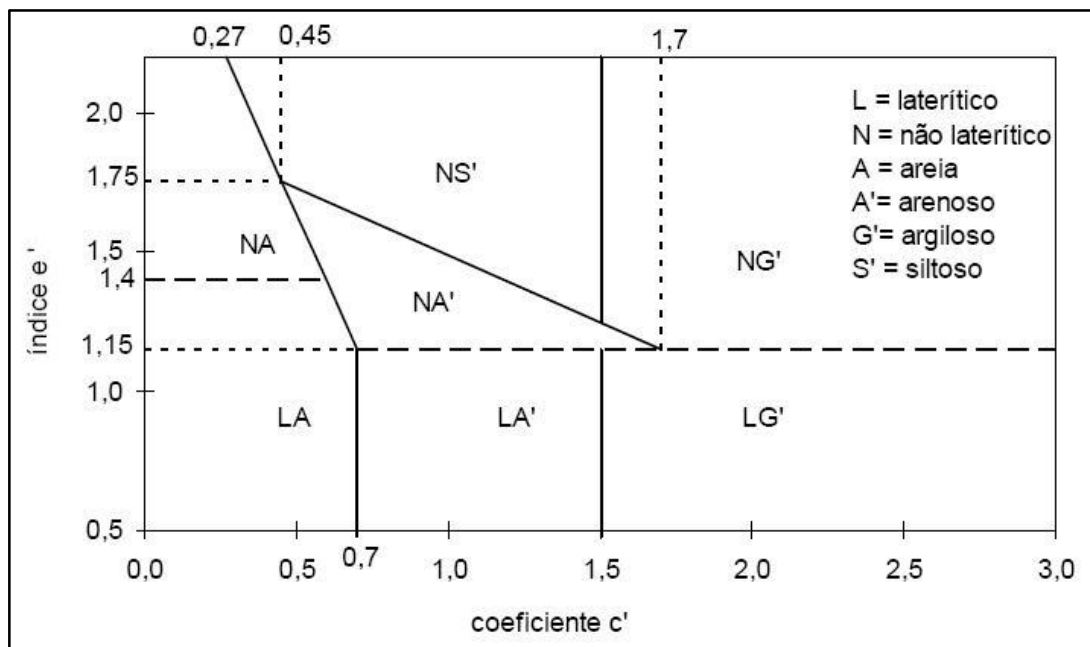


Figura 4.2 – Ábaco de classificação MCT.

4.4.1.3 Compactação

A compactação de um solo é a sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados. Em laboratório são utilizados soquetes com pesos definidos em norma.

A compactação é a operação que resulta o aumento da massa específica aparente de um solo, pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar; com a redução da porcentagem de vazios de ar, consegue-se também diminuir a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais integrantes do pavimento, durante a vida do serviço (DNIT, 2006).

O ensaio original para determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima de um solo é o ensaio de Proctor, proposto em 1933, pelo engenheiro americano que lhe deu o nome. Este ensaio consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico e é repetido para diferentes teores de umidades, determinando-se para cada um deles, a massa específica aparente seca. Com os valores obtidos traça-se a curva, onde se obterá o ponto correspondente a peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($w_{ot.}$).

De acordo com o esforço de compactação pode-se obter valores diferentes do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($w_{ot.}$). Proctor estudou esses esforços para vários casos. Atualmente, tendo em vista o maior peso dos equipamentos de compactação, tornou-se necessário alterar as condições do ensaio para manter a indispensável correlação com o esforço de compactação no campo. Surgiu, assim, o ensaio modificado de Proctor. Posteriormente, alguns órgãos rodoviários adotaram uma energia de compactação intermediária as dos ensaios de Proctor normal e modificada (DNIT, 2006).

4.4.1.4 Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR)

O ensaio de expansão é realizado após a compactação e tem como objetivo medir o valor de expansão do solo por meio da imersão dos corpos-de-prova em água por um período de quatro dias. O ensaio de “California Bearing Ratio” (CBR) pode ser realizado em todos os tipos de solo e é baseado na resistência de penetração do solo testado comparado com a de um pedregulho padrão.

O parâmetro “California Bearing Ratio” (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), é definido como a relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de forma padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada, ou material equivalente. Exige-se a pressão padrão de 1.000 psi (6,90 MPa) para a penetração de 0,1” (2,54 mm) ou 1.500 psi (10,35 MPa) para a penetração de 0,2” (5,08 mm). Para a execução do ensaio CBR, geralmente moldam-se corpos-de-prova com teores de unidade indicados pelos ensaios de compactação (SENÇO, 1997).

Com os pares de valores da fase de penetração, traça-se o gráfico que relaciona a pressão nas ordenadas e, as penetrações, nas abscissas. Se a curva apresentar ponto de inflexão, traça-se por ele uma reta seguindo o comportamento da curva, até que intercepte o eixo das abscissas. Esse ponto de interseção será a nova origem, provocando assim uma translação no sistema de eixos. Do gráfico obtém-se, por interpolação, as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0 mm. O resultado final para o CBR determinado será o maior dos dois valores encontrados correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0 mm.

Por meio do ensaio de expansão é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob o pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações da perda de resistência do solo com a saturação. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e ainda serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

4.4.1.5 Triaxial dinâmico

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada por meio do valor de CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída a fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Esta realidade acabou por dar ensejo à introdução, no país, de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos, permitindo assim avaliar comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos e efetuar-se uma abordagem mais realista dessa problemática no meio tropical (DNIT, 2006).

O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; ou seja, é a energia potencial de deformação (MEDINA, 1997).

A força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de um valor zero até um máximo, voltando a anular-se ou atingir um valor mínimo definido para voltar a atuar após pequeno intervalo de repouso (fração de segundo), de maneira a reproduzir as condições de campo. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que são calculadas as tensões e deformações produzidas. A frequência representa o volume ou fluxo de veículos (MEDINA, 1997).

Tal metodologia resultou na possibilidade de analisar e prever estados de tensão-deformação de estruturas de pavimentos por meio de programas computacionais, partindo-se de propriedades dinâmicas expressáveis em termos de valores de módulo resiliente. As deformações resilientes são deformações elásticas no sentido de que são recuperáveis. Entretanto, não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas e dependem de vários fatores que não são considerados no conceito convencional de elasticidade (DNIT, 2006).

A resiliência ou o Módulo Resiliente (MR) dos solos é determinado para várias tensões aplicadas e pode ter utilidade para projeto ou estudos de construção e restauração de pavimentos. Este ensaio se difere do CBR, principalmente, pela forma de aplicação do carregamento que, neste caso, é dinâmico. De acordo com Senço (1997), o MR de um solo é definido pela relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica recuperável ou resiliente (ϵ_R), conforme apresentado na Equação 4.4.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (4.4)$$

Onde:

- MR = módulo resiliente (MPa);
- σ_d = tensão desvio (MPa);
- ϵ_R = deformação específica.

4.4.2 Complementares

4.4.2.1 Análises químicas

Os ensaios químicos foram realizados com o objetivo determinar o complexo sortido, pH em água e pH em KCl. As análises químicas servem para a identificação do potencial hidrogeniônico (pH); determinação da matéria orgânica (MO); das bases trocáveis; da acidez e da capacidade de troca catiônica (CTC). Estes parâmetros são determinantes nas reações químicas.

O pH dos solos é de grande importância, pois é um fator que influencia fortemente na agregação das partículas e, conseqüentemente, na distribuição estrutural entre os vazios e sólidos do solo. O pH pode ser determinado tanto em H₂O como em KCl. A diferença aritmética entre os dois (kCl – água) é conhecida como Δ pH e pode ser positiva ou negativa. No primeiro caso, tem-se que na amostra ocorre predominância de oxi-hidróxidos de Fe e Al. Já no segundo, tem-se predominância de argilas silicatadas (CARDOSO, 2002).

De um modo geral, a energia de ligação do íon (H⁺) com os grupos funcionais dos argilominerais e dos óxidos é muito maior que a energia de ligação do mesmo com os grupos funcionais da matéria orgânica. Assim, a matéria orgânica dissocia seus íons mais facilmente, criando cargas negativas já em pH baixo (pH \leq 3). Essa propriedade, aliada a maior área superficial específica, faz com que a matéria orgânica seja a principal fonte de cargas elétricas negativa nos solos das regiões tropicais e subtropicais, onde predominam minerais como a caulinita, que apresenta poucas cargas negativas (MEURER, 2004).

Uma importante propriedade que os solos apresentam é a capacidade de troca catiônica (CTC). A CTC expressa a quantidade de cátions que o solo pode reter. Os íons adsorvidos nas superfícies da fase sólida do solo, por estarem ligados a essas superfícies por ligações eletrostáticas, podem ser trocados por outros íons (MEURER, 2004).

4.4.2.2 Difração de raios-X

Utilizada desde a década de 30 para determinação da estrutura cristalina dos solos, a difratometria de raios-X é essencial para caracterização mineralógica dos argilominerais e de outros constituintes de granulação fina dos solos, dos sedimentos e das rochas pelíticas, bem como o da determinação da estrutura de compostos orgânicos e inorgânicos naturais ou sintetizados (GUIMARÃES, 1999).

Produtos de alteração de rochas, os solos podem conter minerais constituintes da rocha mãe sobre eles, cuja alteração intempélica atuou menos intensamente, ou seja, são solos mais jovens. Aqueles minerais, por vezes, preservam suas feições características, ou podem se apresentar como uma mistura de produtos de alteração, guardando ainda relação com a composição dos minerais da rocha primária. Nestes solos são encontrados mais comumente os feldspatos e as micas (ambos mais ou menos alterados para argilominerais), o quartzo, alguns óxidos de ferro, raramente carbonatos, além de argilominerais herdados da própria rocha-mãe. Os solos mais maduros são constituídos essencialmente por argilominerais (herdados e produtos de alteração), quartzo, óxidos e hidróxidos metálicos (Al, Fe, Ti, Mn), particularmente aqueles formados em solos lateríticos (GUIMARÃES, 1999).

Os minerais que possuem uma estrutura cristalina bem definida, repetida de forma organizada por dimensões relativamente grandes (maior que a fração argila), são evidenciados em difratogramas de raio-X por picos bem definidos, estreitos e simétricos. Ao contrário, os minerais com estrutura cristalina mal definida cujos cristais são menores que a fração argila, formam picos pouco intensos e largos.

Na fração argila da maioria dos solos, predominam minerais de estrutura mal definida, como os argilominerais e vários hidróxidos, enquanto são menos freqüentes os minerais bem cristalizados como o quartzo, os feldspatos, as micas os carbonatos, além de óxidos e hidróxidos. Os argilominerais interestratificados, comuns nos solos apresentam maior problema de identificação já que representam empilhamentos variáveis de camadas distintas (GUIMARÃES, 1999).

A técnica de difratometria de raios-X consiste em determinar as distâncias mantidas pelos átomos formadores dos cristais (distancias interplanares), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de raios-X incidente e o plano atômico que difrata e, do comprimento de onda desses raios. Esta técnica tem sido muito utilizada na análise de inúmeros materiais como: materiais cimentícios, rochas, solos e concretos, a fim de identificar os minerais constituintes de cada material. Deve-se ressaltar, entretanto, que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite provavelmente não serão captados.

Este ensaio surge para explicar o comportamento de materiais não convencionais a serem utilizados em pavimentação e para auxiliar na seleção daqueles que podem apresentar melhor potencial de utilização.

4.4.2.3 Resistência à compressão simples

Este ensaio consiste na determinação da resistência a compressão não confinada (ou simples), de corpos-de-prova constituídos por solos coesivos, mediante a aplicação de carga axial, com controle de deformação. Este ensaio se aplica apenas a solos coesivos que não expulsam água durante a fase de carregamento do ensaio que retêm uma resistência após o alívio das pressões confinantes de campo, tais como argila ou solos cimentados saturados.

Este ensaio torna-se necessário quando estuda-se a utilização de solos estabilizados quimicamente, pois para esses materiais o ensaio de CBR é considerado limitado.

4.4.2.4 Permeabilidade

Experimentalmente, Darcy, em 1859 verificou que diversos fatores influenciavam a vazão da água. Baseado na Lei de Darcy foi desenvolvido o ensaio de permeabilidade para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

Quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, a determinação pelo permeâmetro de carga constante é pouco precisa. Emprega-se, então, o de carga variável. O coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é igual a um. Ele costumeiramente é referido em m/s e, como para solos o seu valor é muito baixo, é expresso pelo produto de um número inferior a 10 por uma potência de 10.

Nos estudos de pavimentação, este ensaio não é comum de ser realizado, mas seus resultados podem ser importantes para auxiliar na escolha de materiais não convencionais a serem utilizados.

Capítulo 5

METODOLOGIA

5.1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de misturas compostas de fosfogesso, solos tropicais finos e cal para serem utilizados em pavimentação. A definição das amostras selecionadas para o estudo foi realizada com base nos resultados obtidos por Mesquita (2007) e Faria (2007).

Mesquita (2007) concluiu que nas misturas de fosfogesso com solos tropicais finos seria recomendado utilizar menos de 30% de fosfogesso. Por este motivo, neste trabalho foram estudadas misturas de solo com 10%, 20% e 30% de fosfogesso.

Faria (2007) mostrou a existência de ganho significativo da capacidade de suporte com a incorporação de cal nas misturas de fosfogesso e solo. Sendo assim, nesta pesquisa estudou-se o comportamento do solo estabilizado com 3%, 6%, e 9% de cal. A porcentagem de cal que apresentou melhor desempenho (9%), foi definida para ser utilizada na confecção da mistura fosfogesso, solo e cal.

Como o fosfogesso utilizado no estudo é produzido na cidade de Catalão-GO, o solo selecionado para a pesquisa também foi coletado nesse mesmo município. No entanto, como nos trabalhos de Faria (2007) e Mesquita (2007) foram utilizados o solo de Goiânia-GO, neste estudo optou-se também por avaliar uma das misturas com este solo na expectativa de verificar se ocorrem mudanças significativas quando o solo não é o mesmo.

Além disso, tentou-se verificar também se o tipo de cal (calcítica ou dolomítica) utilizada nas misturas interfere nos resultados obtidos.

Sendo assim, foram definidas 11 amostras para serem pesquisadas, conforme apresentado no Quadro 5.1. Com essas amostras foram realizados vários ensaios de laboratório.

A seguir estão apresentadas todas as etapas desenvolvidas durante a realização do trabalho, bem como a descrição dos ensaios laboratoriais executados com as amostras de solo, fosfogesso e as misturas.

Quadro 5.1 – Descrição das amostras estudadas

Amostras	Descrição	Denominação
1	100% Solo tropical de Catalão-GO	Solo de Catalão-GO
2	100% Fosfogesso	Fosfogesso
3	90% solo de Catalão-Go + 10% fosfogesso	Mistura 1
4	80% solo de Catalão-GO + 20% fosfogesso	Mistura 2
5	70% solo de Catalão + 30% fosfogesso	Mistura 3
6	97% Solo de Catalão + 3% cal calcítica CHIII	Mistura 4
7	94% Solo de Catalão + 6% cal calcítica CHIII	Mistura 5
8	91% Solo de Catalão + 9% cal calcítica CHIII	Mistura 6
9	81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal CHIII	Mistura 7
10	81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica	Mistura 8
11	84,6% solo Goiânia-GO + 9,4% Fosfogesso + 6% Cal CHI	Mistura 9

5.2 VISITA TÉCNICA

A visita técnica na indústria localizada em Catalão-GO foi realizada com o objetivo de conhecer todas as unidades de produção do ácido fosfórico. Esta visita foi realizada no período de cinco dias, de 08 a 12 de abril de 2008, no qual foi verificado todo o processo de formação do fosfogesso, desde o beneficiamento da rocha fosfática à disposição final do resíduo

A Copebrás produz e comercializa fertilizantes fosfatados, além de ser a maior produtora no mercado interno da principal matéria-prima utilizada em detergentes e sabões em pó, nas suas três unidades industriais: em Ouvidor-GO, Catalão-GO e Cubatão-SP.

A produção de rocha fosfática beneficiada é de 99 mil toneladas por ano. As unidades de Ácido Sulfúrico, Ácido Fosfórico e Granulação de Fertilizantes, possuem uma produção de fertilizantes fosfatados de aproximadamente 121 mil toneladas/ano na unidade de Catalão-GO (MESQUITA, 2007).

Em 2008, foram produzidos 596.236,66 toneladas de fosfogesso na indústria de Catalão-GO, sendo dispostos no pátio de estocagem de resíduos da indústria.

5.3 COLETA DOS MATERIAIS

5.3.1 Fosfogesso

O fosfogesso utilizado nos ensaios é do tipo dihidratado e foi coletado no pátio de estocagem do resíduo localizado dentro da unidade Copebrás, situada no município de Catalão-GO. A Copebrás possui uma empresa terceirizada, responsável pela formação das pilhas de fosfogesso, monitoramento e vendas.

Foram coletados aproximadamente 400 kg de fosfogesso em quatro pontos distintos da pilha que apresentava o material mais seco do pátio de fosfogesso da indústria (Figura 5.1), sendo 100 kg em cada ponto. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de 50 kg para o transporte do material até o Laboratório de Mecânica de Solos da Escola de Engenharia Civil - UFG, em Goiânia-GO.

Em seguida, o fosfogesso foi distribuído em bandejas e seco em temperatura ambiente, levando aproximadamente sete dias neste processo de secagem. O material seco foi destorroado e misturado com o auxílio do quarteador para obtenção de uma amostra representativa e em quantidade suficiente para realização dos ensaios laboratoriais (Figura 5.2).



Figura 5.1 – Pilha de fosfogesso onde foi realizada a coleta das amostras.



Figura 5.2 – Quarteamento do fosfogesso

5.3.2 Solo

O solo coletado para o estudo foi retirado na área interna da indústria Copebrás, próximo a mina de extração da rocha fosfática, no município de Ouvidor-GO, cujas coordenadas geográficas são: UTM Norte 7.990.919 m e Este 202.752 m, no dia 11 de abril de 2008. A Figura 5.3 apresenta o mapa litológico da região de Catalão-GO e a localização do ponto de coleta do solo.

Foram coletados aproximadamente 600 kg de solo argiloso, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de 50 kg para serem transportados até o Laboratório de Mecânica de Solos da Escola de Engenharia Civil – UFG em Goiânia-GO (Figura 5.4).

A escolha do local de retirada teve como objetivo um futuro aproveitamento da mistura de solo local e fosfogesso produzido na região em pavimentação, visando minimizar os custos com transporte de material para outras regiões além de dar uma destinação econômica e ambientalmente viável para o resíduo.

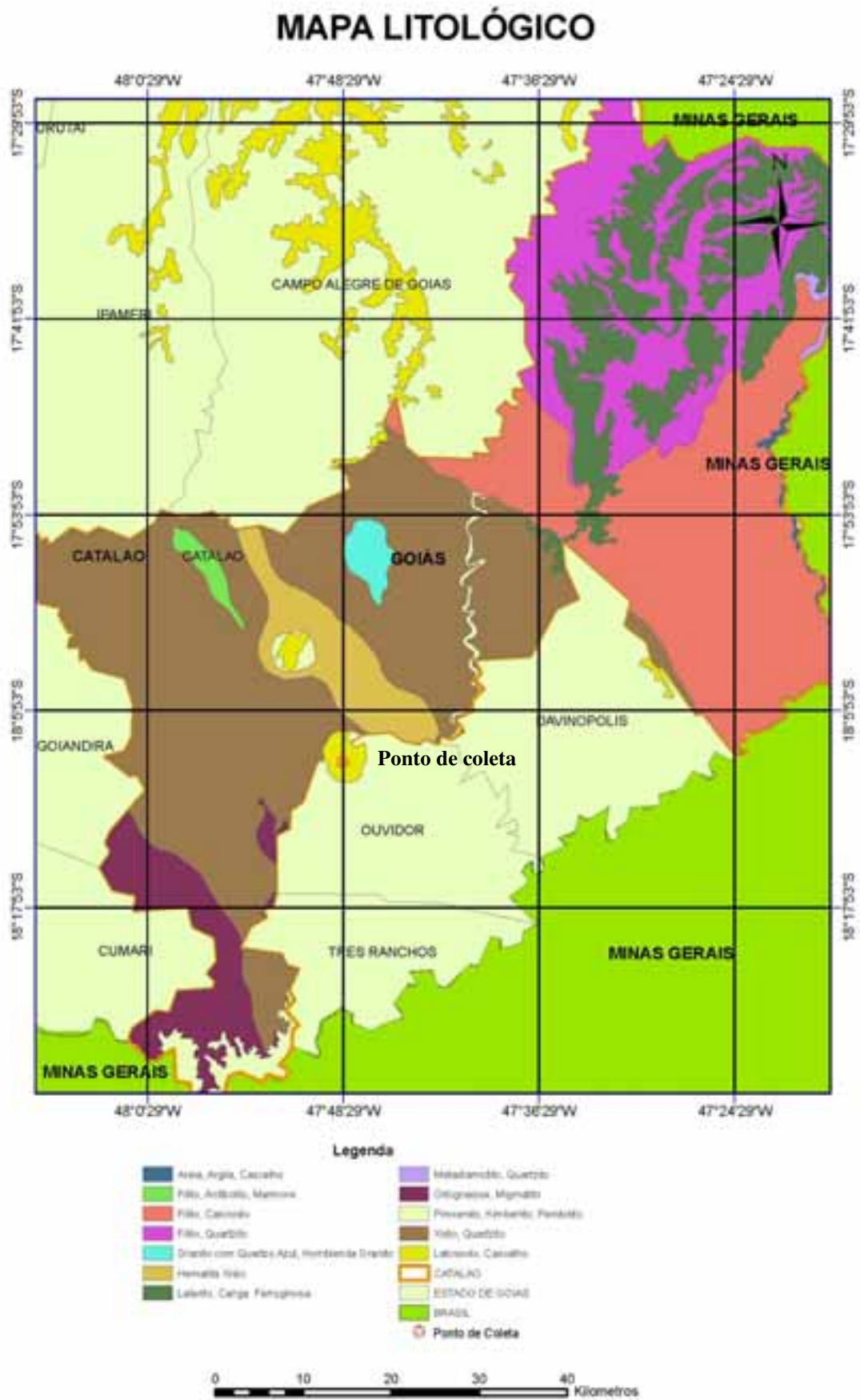


Figura 5.3 – Mapa litológico da região de Catalão-GO



Figura 5.4 – Aspecto do solo coletado na Indústria Copebrás Ltda.

5.3.3 Cales

A cal calcítica é a mais comumente encontrada no mercado da região onde o estudo foi realizado. Durante a aquisição e coleta dos materiais para esta pesquisa, a cal hidratada do tipo CHIII era mais fácil de ser encontrada nas lojas de material de construção. Por esse motivo, ela foi utilizada em quase todas as misturas definidas para o estudo.

No entanto, pelo fato do estudo apresentado por Faria (2007) ter sido realizado com a cal hidratada do tipo CHI, na amostra onde o solo de Goiânia-GO foi utilizado (Mistura 9), optou-se por manter o mesmo tipo de cal. Em princípio, não espera-se a existência de alterações significativas nos resultados. A principal diferença entre a cal CHI e a cal CHIII é que a primeira possui maiores teores de hidróxido de cálcio e menos impurezas.

Por sugestão dos profissionais da empresa Copebrás, foi realizada uma mistura com a incorporação de cal dolomítica com o objetivo de melhorar a característica de dureza da mistura e conseqüentemente aumentar a resistência a deformações, capacidade de suporte e neutralização de materiais orgânicos.

A cal calcítica CHI e a cal calcítica CHIII foram compradas no mercado de local (Goiânia-GO) e a cal dolomítica foi doada pela empresa Qualical Ltda. O Quadro 5.2 apresenta as características das cales utilizadas no estudo e estas foram fornecidas pelos seus fabricantes.

Quadro 5.2 – Características das cales utilizadas

Componentes (%)	Cal calcítica CHI	Cal calcítica CHIII	Cal dolomítica
Hidróxido de cálcio	95 - 98	90 - 95	80
Hidróxido de magnésio	< 5	< 5	29
Carbonato de cálcio	---	< 5	---
Óxido de cálcio	---	< 10	---

5.4 PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

Com auxílio do repartidor de amostra ou pelo processo de quartearmento, reduziu-se o solo e o fosfogesso até obter uma amostra representativa e homogênea em quantidade suficiente para preparação das misturas nas proporções definidas e realização dos ensaios.

Para a formação de cada mistura pesava-se o solo e o fosfogesso, previamente secos e destorroados em temperatura ambiente, em quantidade suficiente para a formação de cada mistura, sendo calculado o valor das porcentagens em relação ao peso dos materiais. Em relação às cales, não houve preparação das mesmas devido o material apresentar-se seco e com granulometria imprópria para o peneiramento (muito fino), sendo utilizadas diretamente nas misturas após a definição das dosagens. Para uma melhor homogeneização das misturas foi utilizada uma betoneira (Figura 5.5).

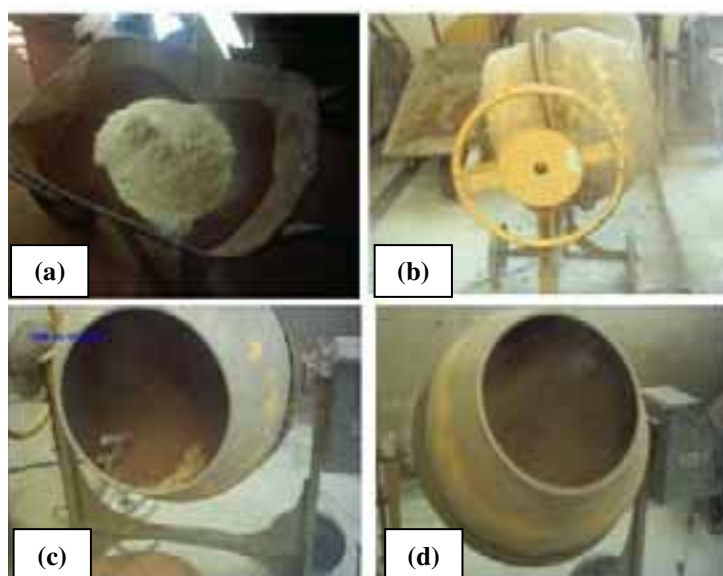


Figura 5.5 – Preparação das misturas: (a) solo-fosfogesso; (b) betoneira utilizada; (c) misturas dos materiais; (d) homogeneização

5.5 ENSAIOS LABORATORIAIS

5.5.1 Caracterização

Para a caracterização das amostras foram realizados os seguintes ensaios: granulometria por sedimentação com e sem defloculante, massa específica dos grãos e limites de consistência, no Laboratório de Mecânica de Solos – UFG. Com os resultados obtidos, os materiais foram classificados de acordo com sistemas da “Transportation Research Board” – TRB e Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS.

5.5.1.1 Análise granulométrica

A determinação das frações granulométricas deu-se por meio de peneiramento e sedimentação, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, para a determinação das frações de argila e silte de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984a). Também foi realizado o ensaio de sedimentação sem o uso do defloculante, sendo que a escolha deste procedimento é justificada por estudos anteriores terem mostrado que ocorre diferença nas frações granulométricas de solos tropicais quando o ensaio é realizado com e sem defloculante (REZENDE, 2003). A Figura 5.6 apresenta as fases do ensaio de granulometria.

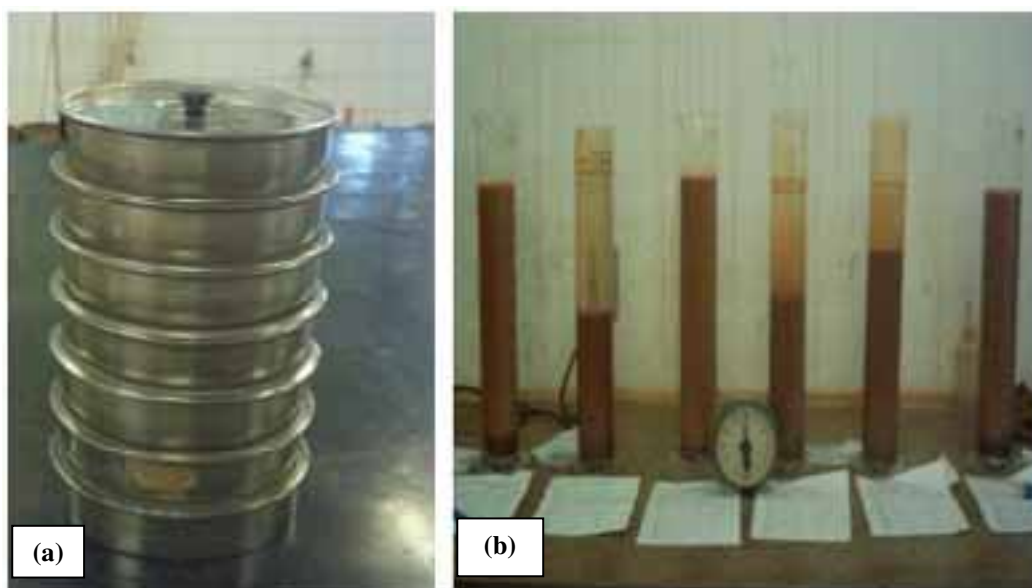


Figura 5.6 – Ensaio de granulometria: (a) peneiramento; (b) sedimentação

5.5.1.2 Massa específica dos grãos

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado pelo método do picnômetro das partículas menores que 4,8 mm de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1988), como observado na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Determinação da massa específica: (a) solo; (b) fosfogesso

5.5.1.3 Limites de consistência

Nos ensaios de limites de consistência são definidos o limite de liquidez (w_L) de acordo com NBR 6459 (ABNT, 1984b), limite de plasticidade (w_P) de acordo com NBR 7180 (NBR, 1984c) e índice de plasticidade (IP). No limite de liquidez é observada a transição do estado líquido para o plástico.

A amostra que contém apenas os finos de solos é homogeneizada com teores de água convenientes e crescentes e o resultado é expresso em porcentagem. No limite de plasticidade é observada a transição do estado de consistência plástico para o estado de consistência semi-sólido, com crescente aumento da umidade. Quando o limite de plasticidade não pode ser determinado devido à natureza do material, este é considerado como não plástico (NP).

O índice de plasticidade é determinado em função da diferença encontrada entre os limites de liquidez e plasticidade e indica se o solo pode absorver grandes quantidades de

água. Esta absorção pode provocar o aumento sensível de volume do solo. Se isto ocorrer, o solo será inconveniente como suporte, pois a sua estabilidade estará prejudicada. A Figura 5.8 apresenta o ensaio de limites de consistência realizado para o solo de Catalão-GO e para o fosfogesso.

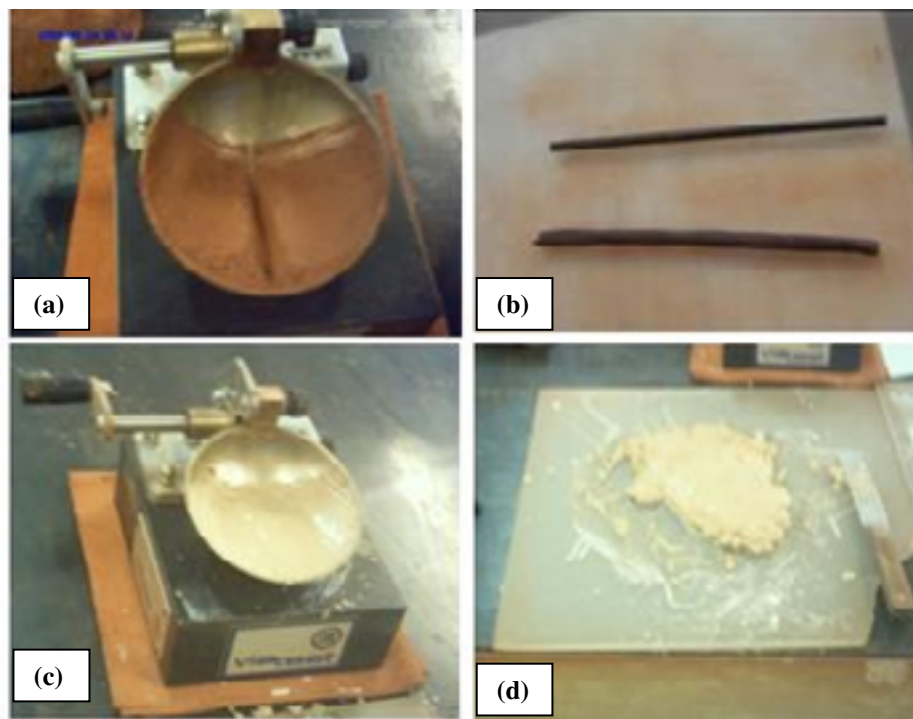


Figura 5.8 – Determinação dos Limites de consistência: (a) limite de liquidez do solo; (b) limite de plasticidade do solo; (c) limite de liquidez dos fosfogesso; (d) limite de plasticidade do fosfogesso

5.5.2 Classificação MCT

Para a realização da classificação do solo utilizando a metodologia MCT foram executados dois ensaios, sendo eles: compactação pelo método mini-MCV e perda de massa por imersão, realizados no Laboratório de Solos de FURNAS. Para tanto foram executadas as seguintes etapas:

- Preparação da amostra – efetuada de acordo com a norma ME 258 (DNER, 1994a), sendo que as amostras foram previamente secas ao ar livre e passadas na peneira de 2 mm. Foi adicionada água nas quantidades determinadas pela norma e em seguida acondicionadas em sacos plásticos para evitar a perda de umidade, como observado na Figura 5.9 (a);

- Compactação – Para efetuar a compactação foram necessários quatro moldes, funil, assentador e espátula. A compactação foi realizada utilizando o soquete do tipo leve sobre o solo no molde;
- Perda de massa por imersão – Este ensaio foi efetuado de acordo com a norma ME 256 (DNER, 1994b), que tem por objetivo, prescrever o método de determinação da perda de massa por imersão em água de solos tropicais compactados, em laboratório com uso de equipamento miniatura, visando sua classificação e previsão de sua estabilidade superficial à ação das intempéries. Os corpos-de-prova compactados foram deslocados, com uso do extrator, de maneira que seu topo ficasse 10 mm, externo ao cilindro, como observado na Figura 5.9 (b). Os moldes com os corpos-de-prova foram transferidos para um tanque de imersão (Figura 5.9 c), permanecendo por 24 horas, podendo ser verificado na Figura 5.9 (d). Após o ensaio foi determinado o valor de perda de massa por imersão (P_i).

Após o término do ensaio foi possível traçar as curvas de compactação, relacionando a massa específica aparente seca com a umidade dos corpos-de-prova, determinando-se o valor de d' , inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes. Também foram determinadas as curvas de deformabilidade, onde se relaciona a quantidade de golpes com o valor da diferença entre a altura do corpo-de-prova após um número de golpes n e a altura do corpo-de-prova após $4n$ golpes (an), fornecendo o coeficiente c' e o mini-MCV para cada teor de umidade. Com os valores dos coeficientes c' e do índice e' pode-se efetuar a classificação do solo ensaiado por meio do ábaco de classificação MCT (FIGURA 4.2).

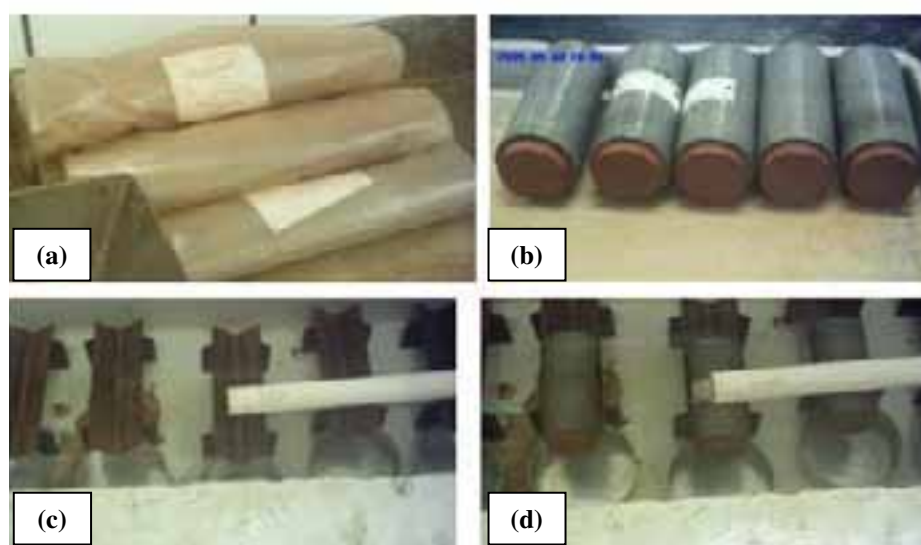


Figura 5.9 – Metodologia MCT: (a) acondicionamento das amostras; (b) corpos-de-prova compactados; (c) tanque de imersão; (d) ensaio de perda de massa por imersão

5.5.3 Análises Químicas

As análises químicas das amostras foram realizados em um laboratório privado credenciado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) localizado no município de Goiânia-GO.

Foram realizadas análises de macro e micronutrientes, pH em água, pH em KCl e capacidade de troca catiônica (CTC) de acordo com métodos da EMBRAPA (1997). A CTC expressa a quantidade de cátions que o solo pode reter na forma de complexos de esfera-externa. Os íons adsorvidos nas superfícies da fase sólida do solo, na forma de complexos de esfera-externa, por estarem ligados a essas superfícies por ligações eletrostáticas, podem ser trocados (substituídos) por outros íons da solução do solo.

Para realização da análise química foram selecionadas as amostras de solo, fosfogesso, misturas de solo e fosfogesso (Misturas 1, 2 e 3), misturas de solo, fosfogesso e cal (Misturas 7, 8 e 9). Entre as misturas de solo-cal apenas a Mistura 6 (91% solo de Catalão + 9% cal calcítica CHIII) foi selecionada para análise química por esta ter sido a dosagem que apresentou melhor desempenho em termos de capacidade de suporte.

Estudos mostraram que o fosfogesso pode apresentar em sua composição alguns metais pesados (CASTILHOS et al. 1998). Por isso, neste trabalho, também foi realizada análise de metais pesados nas amostras de solo, fosfogesso e nas misturas de solo-fosfogesso e solo-cal que apresentaram melhor desempenho em termos de CBR.

Alem disso, durante a realização do ensaio de permeabilidade com as amostras, foram coletadas amostras de água que percolava no corpo-de-prova para ser realizado a análise preliminar de metais pesados, no Laboratório do Fundo de Fomento à Mineração (FUNMINERAL), avaliando seu potencial de contaminação. Vale ressaltar que esta análise é preliminar, sendo necessário um número maior de coletas de água para afirmar de forma mais precisa se há possibilidade de contaminação da água.

5.5.4 Difração de raios-X

A metodologia adotada para a preparação e análise das amostras foi estabelecida nos procedimentos do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A., onde o ensaio foi realizado. A Figura 5.10 apresenta a preparação das amostras e o equipamento utilização na difração de raio-X.

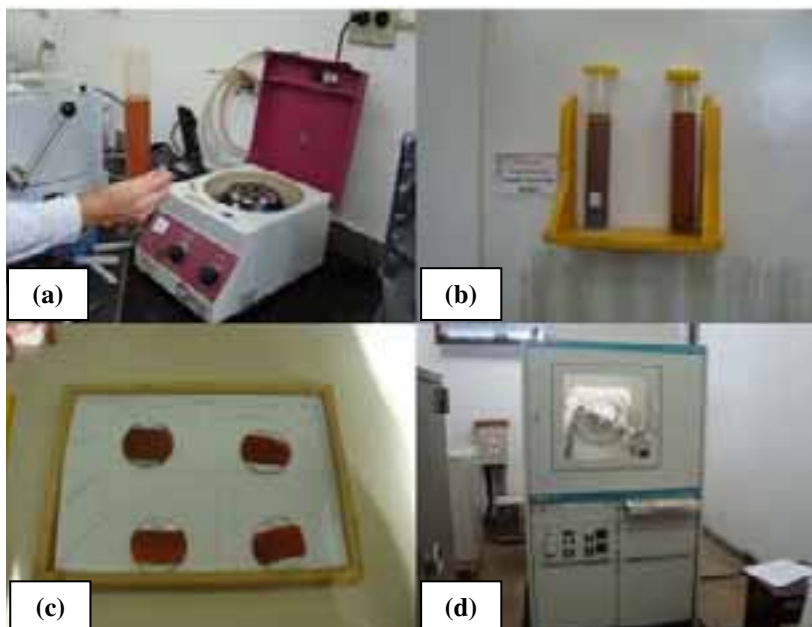


Figura 5.10 - Preparação dos materiais: (a) moinho orbital; (b) sedimentação em coluna; (c) lâminas orientadas; (d) equipamento de difração de raios-X

As amostras foram submetidas a uma moagem prévia em moinho orbital até sua total moagem (100% passante na peneira 325 mesh), para obtenção de material representativo de granulação bem fina. Em seguida, parte do material moído de cada amostra foi levada ao Difratorômetro de Raios-X para análise pelo método do pó não-orientado (análise integral). Nas amostras de solos, além da análise integral, procedeu-se à separação, por sedimentação em coluna, da fração argila destas amostras seguida por montagem em vidro de três lâminas orientadas para cada registro, ou seja, apenas com deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a “lama” para orientação.

Nessas lâminas, fez-se uma análise natural (apenas com secagem ao ar), após saturação com etileno-glicol em dessecador colocado sobre chapa aquecida a 50°C, por 12 horas, para garantir a completa saturação da atmosfera interna e assim, possibilitar a identificação dos argilominerais expansivos, caso existam. Após a retirada das amostras do dessecador, as mesmas foram levadas imediatamente ao difratômetro de raios-X para análise (análise glicolada).

Outro tratamento dado às amostras foi a calcinação da “fração argila” a 550°C, por 3 horas (análise calcinada). Esta análise indica a presença de minerais que sofrem retração, parcial ou total, de sua estrutura nestas condições (caulinita, gibbsita, goethita etc.).

Pelo fato de alguns materiais terem apresentado expansão elevada, foram realizadas análises de raios-X de amostras compactadas com e sem imersão. As amostras foram compactadas com os valores de umidade e peso específico aparente seco próximos aos

valores ótimos encontrados nos ensaios de compactação. Em seguida, foram imersas em água durante quatro dias e posteriormente foi realizada a difração de raios-X. Nas amostras compactadas sem imersão, a difração foi realizada após a compactação.

5.5.5 Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR)

A compactação foi realizada na energia Proctor Intermediária de acordo com NBR 7182 (ABNT, 1986), no qual foram obtidos os seguintes parâmetros: curva de compactação, teor de umidade ótima (w_{ot}) e o peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}). Após a compactação (Figura 5.11 a) os corpos-de-prova foram imersos em água durante quatro dias para realização do ensaio de expansão de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 1987), sendo efetuada diariamente a leitura do extensômetro para determinação do valor de expansão das amostras estudadas (Figura 5.11 b).

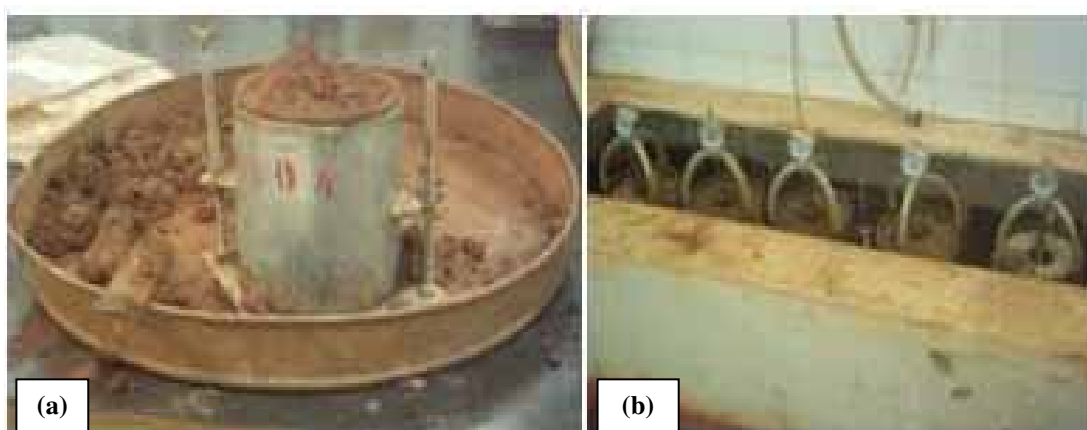


Figura 5.11 – Compactação e Expansão: (a) corpo-de-prova compactado; (b) corpos-de-prova imersos em água

Com a conclusão do ensaio de expansão, foi realizado o ensaio de “California Bearing Ratio” (CBR) que consiste na aplicação de um carregamento estático em um corpo-de-prova sob condição saturada (após quatro dias de imersão), conforme NBR 9895 (ABNT, 1987). Este carregamento se dá por meio da penetração de um pistão de diâmetro padronizado, em velocidade constante, acompanhado de registros de cargas de reação por meio de um anel dinamométrico ou célula de carga acoplados à prensa (Figura 5.12).

A realização do ensaio de CBR teve como objetivo principal definir, em laboratório, os valores de CBR dos materiais estudados avaliando a possibilidade de aplicação em camadas de pavimentos flexíveis. Os ensaios de compactação e CBR foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFG.



Figura 5.12 – Prensa utilizada no ensaio de CBR

5.5.6 Compressão simples

O ensaio de compressão simples foi realizado de acordo com a NBR 12770 (ABNT, 1983a) para obtenção da tensão de ruptura dos materiais. O ensaio foi executado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFG.

Para realização deste ensaio foram selecionadas as amostras de solo, fosfogesso e as misturas de solo-fosfogesso e solo-cal que apresentaram o melhor desempenho em termos de CBR. Os corpos-de-prova foram compactados com os valores de umidade e peso específico aparente seco próximos aos valores ótimos encontrados nos ensaios de compactação. Para tanto, utilizou-se um molde cilíndrico metálico resultando em corpo-de-prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Os resultados obtidos foram comparados, avaliando-se a possibilidade de utilização desses materiais em camadas de pavimentos flexíveis. A Figura 5.13 apresenta a moldagem dos corpos-de-prova para realização do ensaio. Ressalta-se que nesta pesquisa não foi estudada a influência do tempo de cura na resistência das amostras.

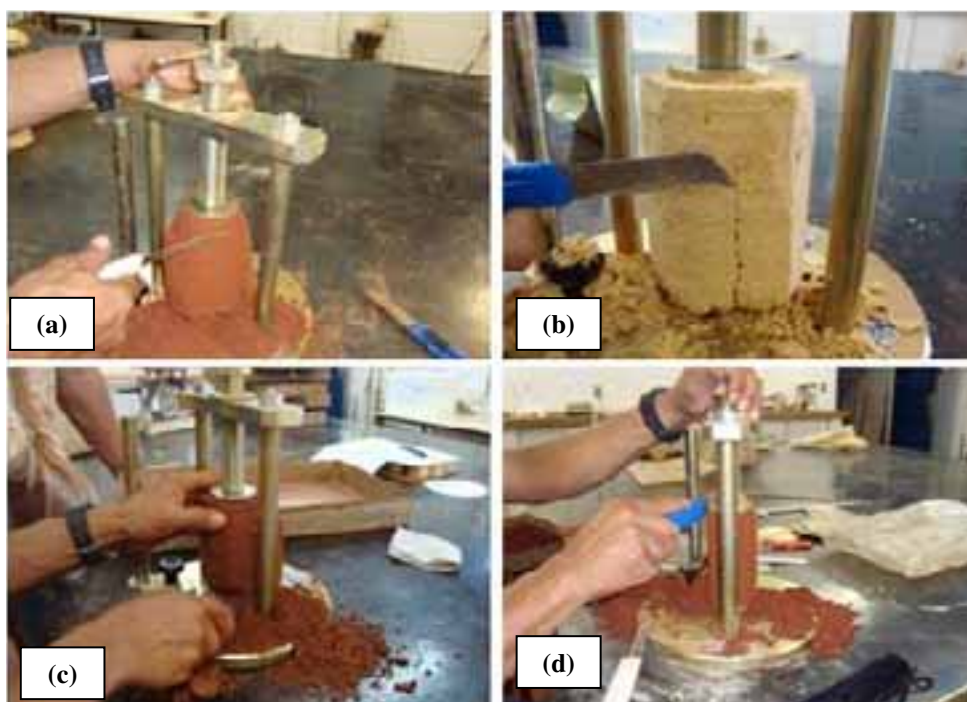


Figura 5.13 – Moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio de resistência a compressão simples: (a) solo; (b) fosfogesso; (c) Mistura 2; (d) Mistura 6

Inicialmente, foi utilizada uma prensa eletrônica para realização dos ensaios. Porém, com o resultado do primeiro ensaio, verificou-se que ela estava programada para interromper o ensaio assim que a tensão máxima fosse atingida. Sendo assim, os demais ensaios foram realizados em outra prensa que não apresentava esta limitação. A Figura 5.14 mostra o ensaio em andamento.



Figura 5.14 – Ensaio de resistência a compressão simples em andamento

5.5.7 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 1983b), sendo executado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFG. Neste ensaio foram determinados os coeficientes de permeabilidade a carga variável, com a água percolando através das amostras em regime de escoamento laminar. A Figura 5.15 apresenta a preparação das amostras para realização do ensaio.

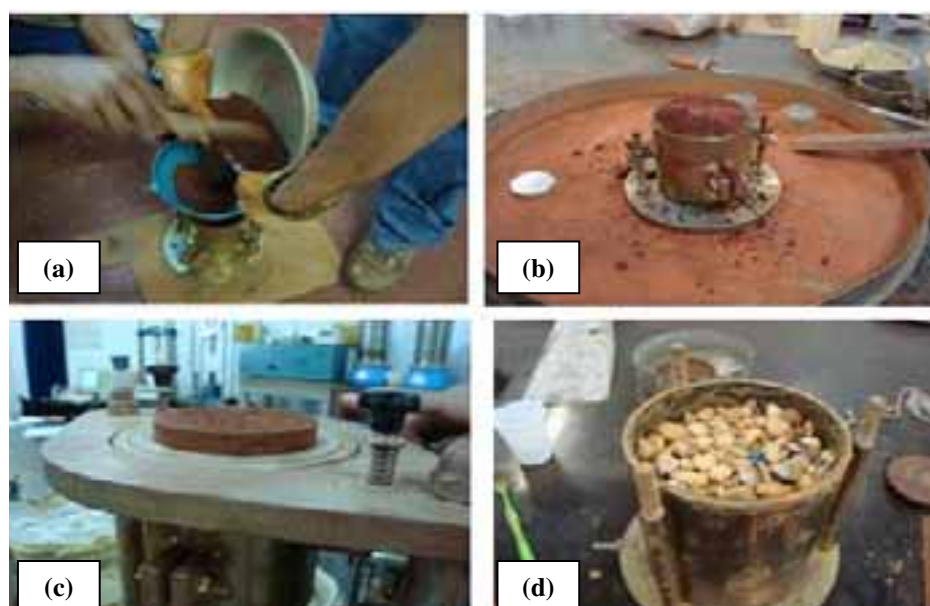


Figura 5.15 – Preparação dos materiais para o ensaio de permeabilidade: (a) formação das camadas; (b) amostra compactada; (c) extração da amostras; (d) amostra preparada para execução do ensaio

Assim como no ensaio de resistência à compressão simples, para o ensaio de permeabilidade também foram selecionadas as amostras de solo, fosfogesso e as misturas de solo-fosfogesso e solo-cal que apresentaram o melhor desempenho em termos de CBR, sendo os corpos-de-prova compactados com os valores de umidade e peso específico aparente seco próximos aos valores ótimos encontrados nos ensaios de compactação. Os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos foram comparados entre si.

Capítulo 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios laboratoriais realizados para avaliação do comportamento das amostras de fosfogesso, solo tropical e das misturas compostas de solo e fosfogesso; solo e cal; solo, fosfogesso e cal. Primeiramente, são apresentadas as imagens do processo de fabricação do ácido fosfórico, cuja produção gera o fosfogesso, resíduo que é o principal foco desta pesquisa. Em seguida, têm-se os resultados dos ensaios de caracterização, classificação, análises químicas e difração de raios-X dos materiais. Posteriormente, são apresentados os resultados dos ensaios de compactação, expansão e “California Bearing Ratio” – CBR; permeabilidade e resistência a compressão simples.

6.2 VISITA TÉCNICA

A visita técnica teve como objetivo conhecer o processo de obtenção do fosfogesso, desde o beneficiamento da rocha fosfática à disposição final. A Figura 6.1 apresenta a mina de extração da rocha fosfática e o material britado.



Figura 6.1 – Exploração da rocha fosfática: (a) Mina de extração da rocha fosfática; (b) usina de britagem

A rocha fosfática é extraída e transportada por caminhões para ser britada. Após alcançar a granulometria desejada, o material britado é estocado em pilhas de homogeneização (Figura 6.2), seguindo por meio de correias transportadoras para a usina de beneficiamento.



Figura 6.2 – Pilha de homogeneização

Durante a visita a usina, foi observado todo o processo de beneficiamento do material, da moagem por via úmida até a adição de reagentes químicos para alcançar a concentração de compostos de fósforo.

Após o beneficiamento, o material segue por meio de correias transportadoras para a unidade do ácido fosfórico, onde ocorre a reação do concentrado fosfático com o ácido sulfúrico. Durante este processo, tem-se a obtenção do fosfogesso, que é estocado em pilhas no pátio de disposição final (Figura 6.3).



Figura 6.3 – Pátio de disposição final do fosfogesso

Durante a etapa final da visita técnica, pôde-se conhecer o sistema de tratamento de percolado; composto por canaletas, lagoa de contenção de efluente ácido (Figura 6.4) e

estação de tratamento de efluentes líquidos (ETEL). A lagoa de contenção é impermeabilizada com geomembrana e também recebe águas de chuvas drenadas da pilha de fosfogesso.



Figura 6.4 – Lagoa de percolado

6.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

6.3.1 Caracterização das amostras

6.3.1.1 Análise Granulométrica

A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria das amostras de solo, fosfogesso e das misturas compostas por:

- 90% solo de Catalão-GO + 10% fosfogesso (Mistura 1);
- 80% solo de Catalão-GO + 20% fosfogesso (Mistura 2);
- 70% solo de Catalão-GO + 30% fosfogesso (Mistura 3);
- 97% solo de Catalão-GO + 3% cal calcítica CHIII (Mistura 4);
- 94% solo de Catalão-GO + 6% cal calcítica CHIII (Mistura 5);
- 91% solo de Catalão-GO + 9% cal calcítica CHIII (Mistura 6);
- 81,9% solo de Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal calcítica CHIII (Mistura 7);
- 81,9% solo de Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica (Mistura 8);
- 84,6% solo de Goiânia-GO + 9,4% Fosfogesso + 6% cal calcítica CHI (Mistura 9).

Em seguida, são apresentadas as curvas granulométricas dos ensaios realizados com e sem o defloculante hexametáfosfato de sódio. Pode-se verificar que, todas as amostras estudadas obtiveram frações granulométricas diferentes quando os ensaios foram realizados

na presença ou ausência do defloculante. Esse comportamento indica que as misturas apresentam a mesma tendência do solo tropical selecionado para a pesquisa.

Tabela 6.1 – Frações granulométricas dos materiais estudados

Amostras	Com defloculante				Sem defloculante			
	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo	0,29	22,15	19,22	58,30	0,29	36,16	63,54	0,00
Fosfogesso	0,00	23,85	71,53	4,62	0,00	24,78	75,22	0,00
Mistura 1	0,43	29,38	56,93	13,26	0,43	11,84	87,73	0,00
Mistura 2	0,35	25,20	68,63	5,83	0,35	10,26	86,66	2,73
Mistura 3	0,19	30,01	65,55	4,16	0,19	23,59	76,22	0,00
Mistura 4	0,22	42,12	28,64	29,03	0,22	52,36	47,14	0,00
Mistura 5	0,21	47,52	32,36	19,92	0,21	68,14	31,65	0,00
Mistura 6	0,21	43,42	44,63	11,75	0,21	51,29	48,51	0,00
Mistura 7	0,11	62,51	37,39	0,00	0,11	26,33	73,56	0,00
Mistura 8	0,28	29,37	67,32	3,02	0,28	31,87	67,85	0,00
Mistura 9	0,27	36,79	59,88	3,06	0,27	68,43	31,31	0,00

Comparando os resultados dos ensaios de granulometria para o solo, realizados com e sem defloculante (Figura 6.5), observa-se variação nos resultados, sendo que com defloculante tem-se maior quantidade de argila. Já sem defloculante observa-se que não existem partículas de argila e que houve um aumento nas porcentagens de silte e areia quando comparada com a amostra com defloculante. Este tipo de comportamento confirma a suspeita de que o solo selecionado para a pesquisa é tropical, cujas concreções formadas pela cimentação de partículas menores foram desfeitas pelo defloculante.

O fosfogesso pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passantes na peneira nº 200. Ao ser realizado o ensaio de sedimentação com o uso do defloculante, observa-se que ocorreu um pequeno aumento no teor de argila e uma diminuição no teor de silte e areia (Figura 6.6). Este resultado também foi verificado por Mesquita (2007), porém o teor de silte aumentou na presença do defloculante.

Analisando as curvas granulométricas obtidas nos ensaios realizados com defloculante das amostras de solo-fosfogesso, denominadas Misturas 1, 2 e 3 (Figuras 6.7; 6.8; 6.9, respectivamente), tem-se que estas apresentam partículas maiores que o solo (maior quantidade de silte do que argila, sendo que o maior ganho foi na fração silte). Isto indica que

pode estar havendo algum tipo de reação entre solo e o fosfogesso que impedem que as ligações das partículas sejam desfeitas mesmo na presença do defloculante.

Nas curvas com defloculante das Misturas 4, 5 e 6 (Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, respectivamente), observou-se que, com o aumento do teor de cal, a porcentagem de silte tende a aumentar. Provavelmente, existem agregações, mas estas não são estáveis na presença do defloculante. Nas curvas sem defloculante, tem-se a granulometria semelhante para as Misturas 4 e 6. A mistura com 6% de cal (Mistura 5) apresenta maior quantidade de areia e menor teor de silte quando comparadas com as Misturas 4 e 6.

O solo de Catalão-GO apresenta variações nas curvas granulométricas quando estabilizado com fosfogesso ou cal (Misturas 1, 2, 3, 4, 5, e 6). Com a cal o teor de areia é maior, indicando a maior ocorrência de reações de floculação. Quando misturado com fosfogesso e cal, apresentou granulometria diferente, em função do tipo de cal. Com a cal calcítica (Mistura 7) ocorreu aumento na porcentagem de areia com o uso do defloculante (Figura 6.13). Com a cal dolomítica (Mistura 8), as curvas com e sem defloculante ficaram semelhantes (Figura 6.14).

Avaliando o solo de Goiânia-GO estudado no trabalho de Mesquita (2007), na Mistura 9 com solo, fosfogesso e cal calcítica (Figura 6.15), tem-se diferença no comportamento quando comparada com mistura semelhante realizada com o solo de Catalão-GO (Mistura 7). Enquanto na Mistura 7 observa-se aumento no teor de areia com o uso do defloculante (fato constatado também nas Misturas 1, 2 e 3), na Mistura 9 ocorre o contrário. Este fato pode ser explicado pela mudança no solo utilizado nas misturas, sendo que esta questão será melhor avaliada com os resultados obtidos no ensaio de difração de raios-X.

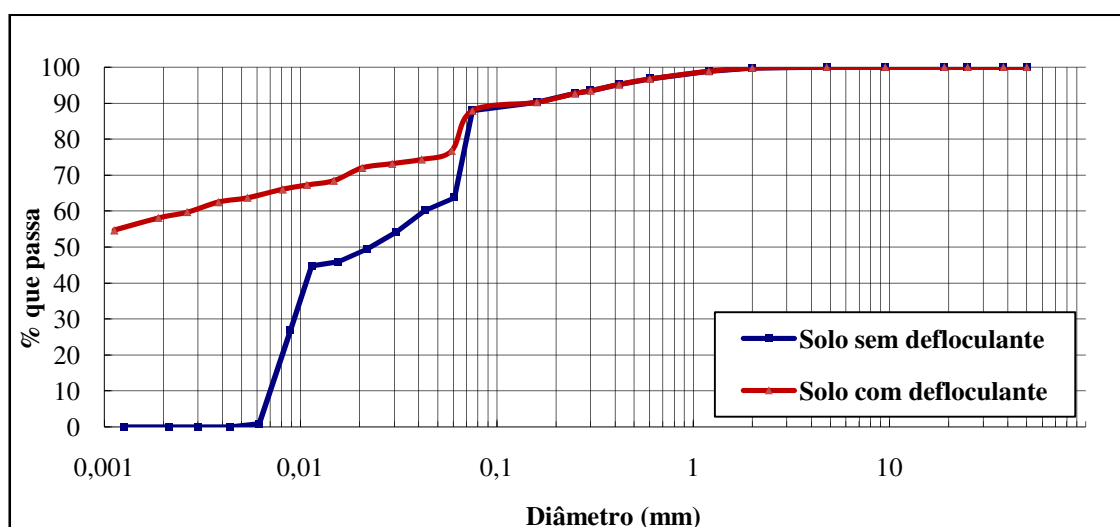


Figura 6.5 - Curvas granulométricas do solo com e sem defloculante

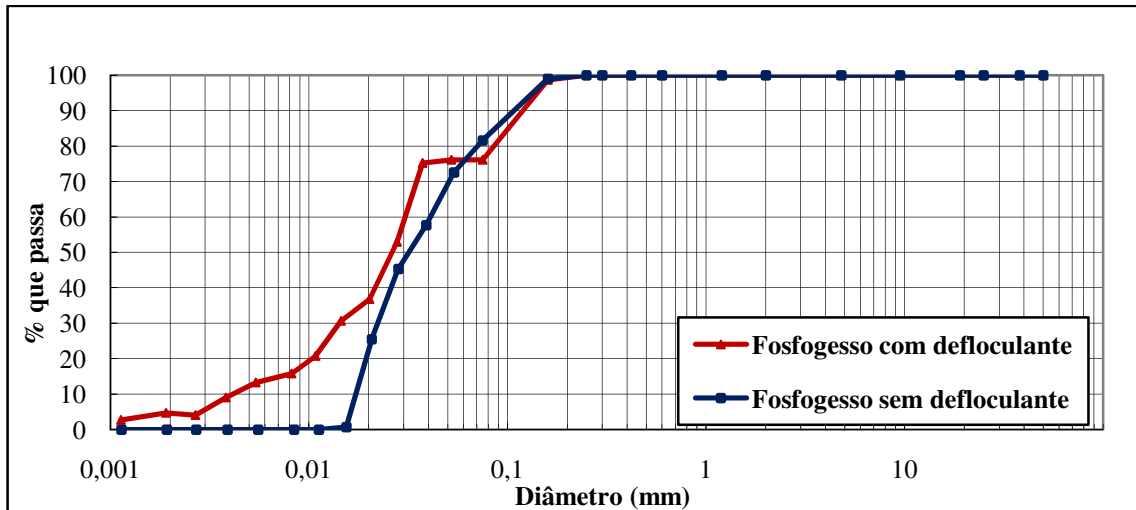


Figura 6.6 - Curvas granulométricas do fosfogesso com e sem defloculante

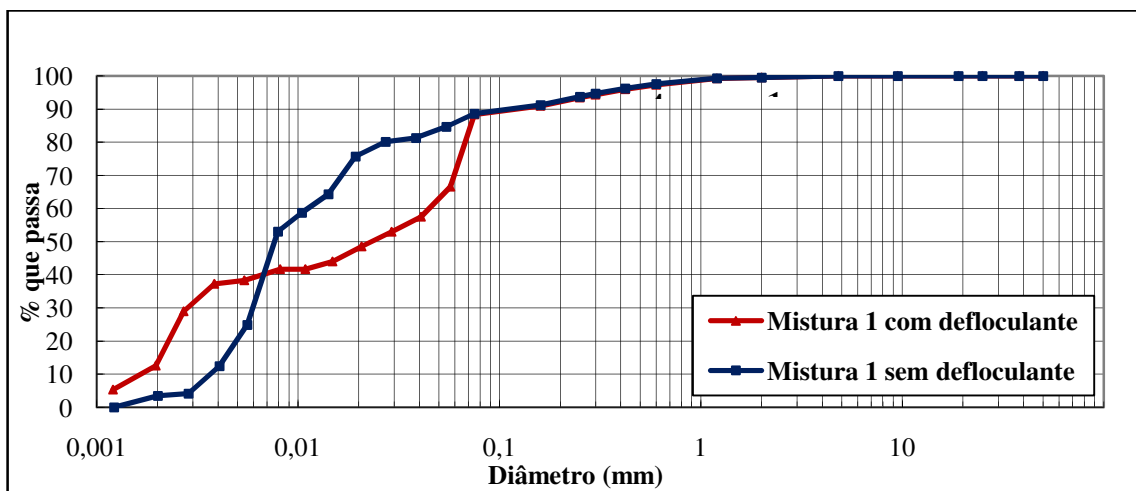


Figura 6.7 - Curvas granulométricas da Mistura 1 com e sem defloculante

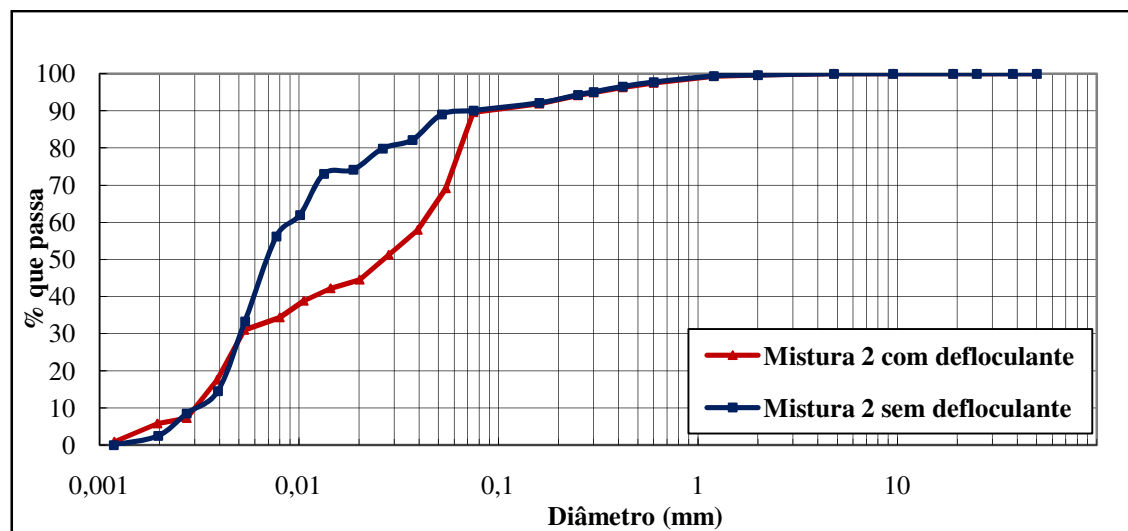


Figura 6.8 - Curvas granulométricas da Mistura 2 com e sem defloculante

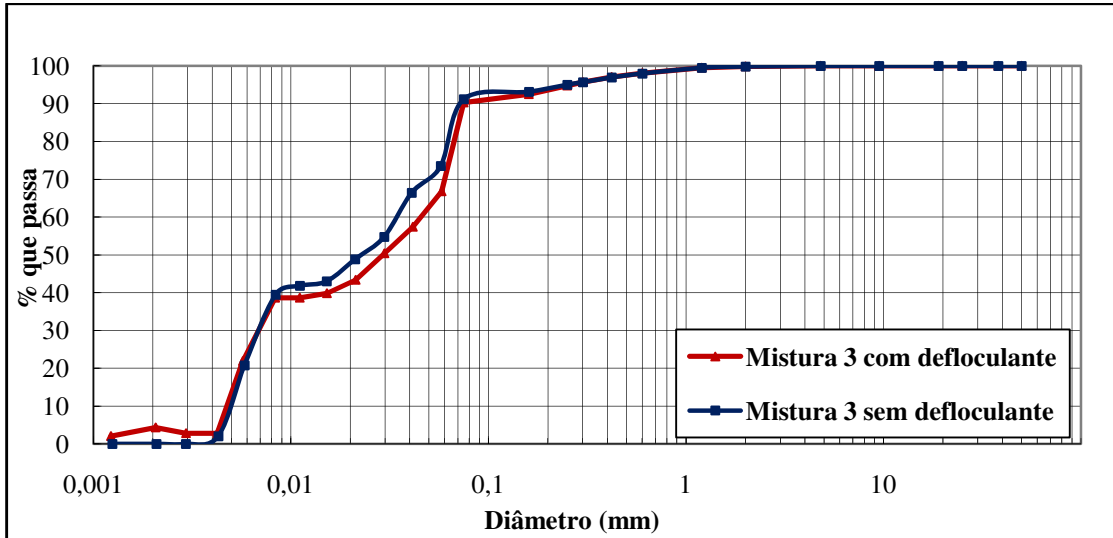


Figura 6.9 - Curvas granulométricas da Mistura 3 com e sem defloculante

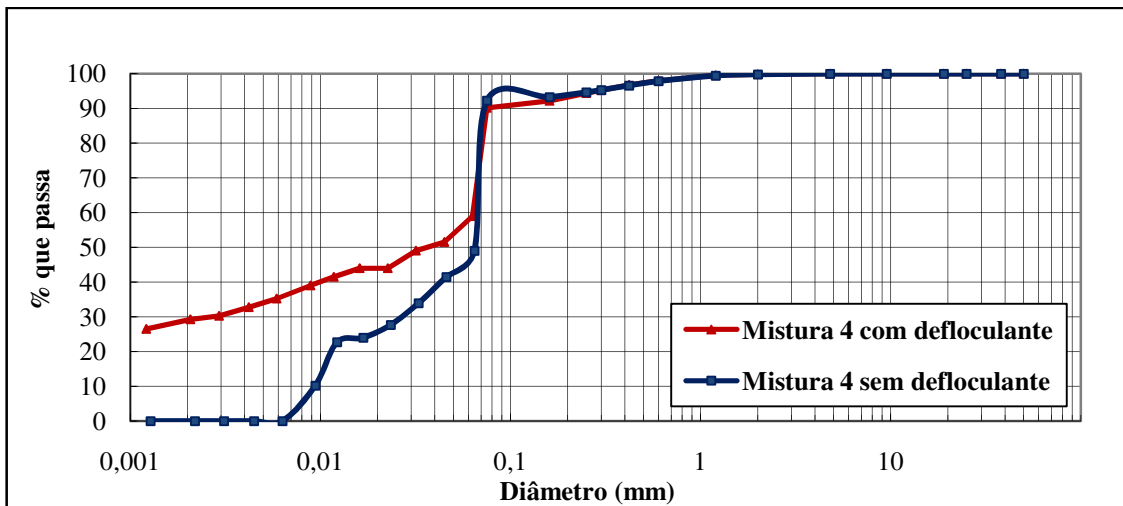


Figura 6.10 - Curvas granulométricas da Mistura 4 com e sem defloculante

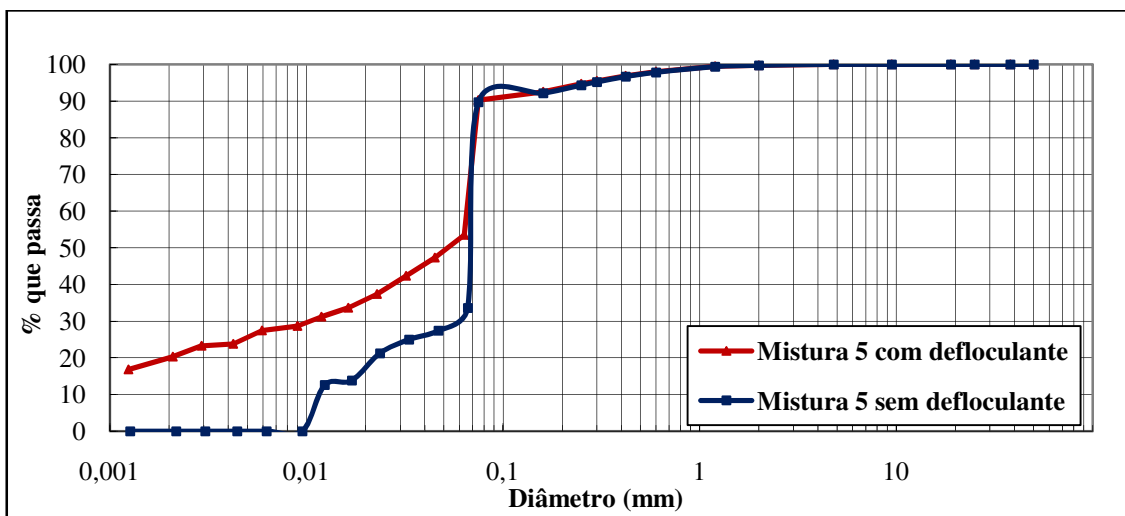


Figura 6.11 - Curvas granulométricas da Mistura 5 com e sem defloculante

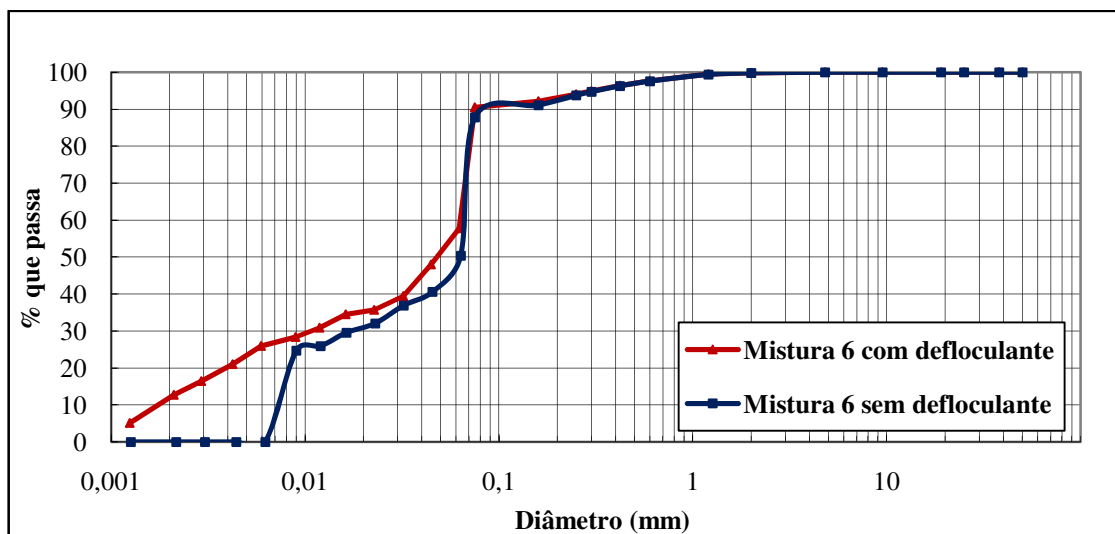


Figura 6.12 - Curvas granulométricas da Mistura 6 com e sem defloculante

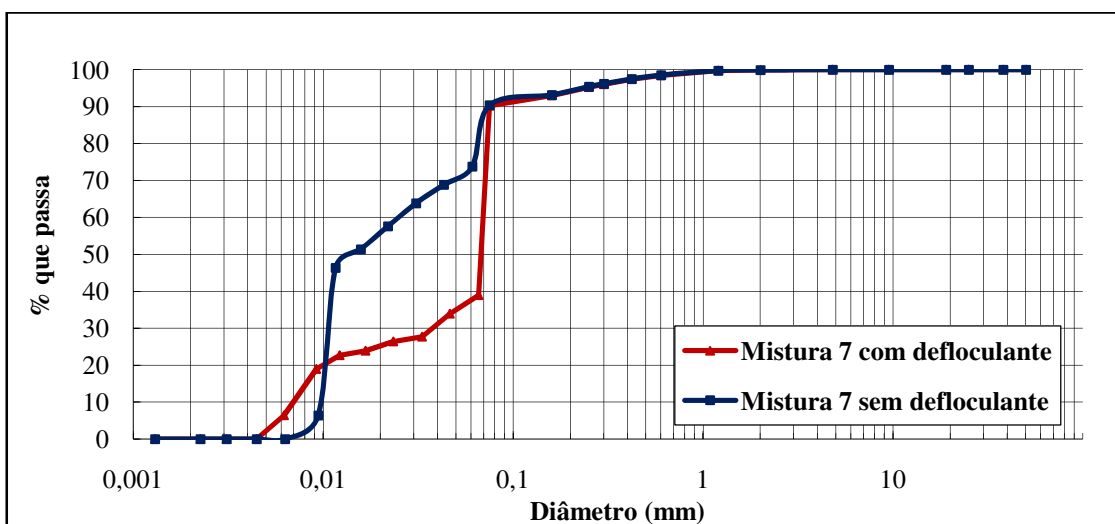


Figura 6.13 - Curvas granulométricas da Mistura 7 com e sem defloculante

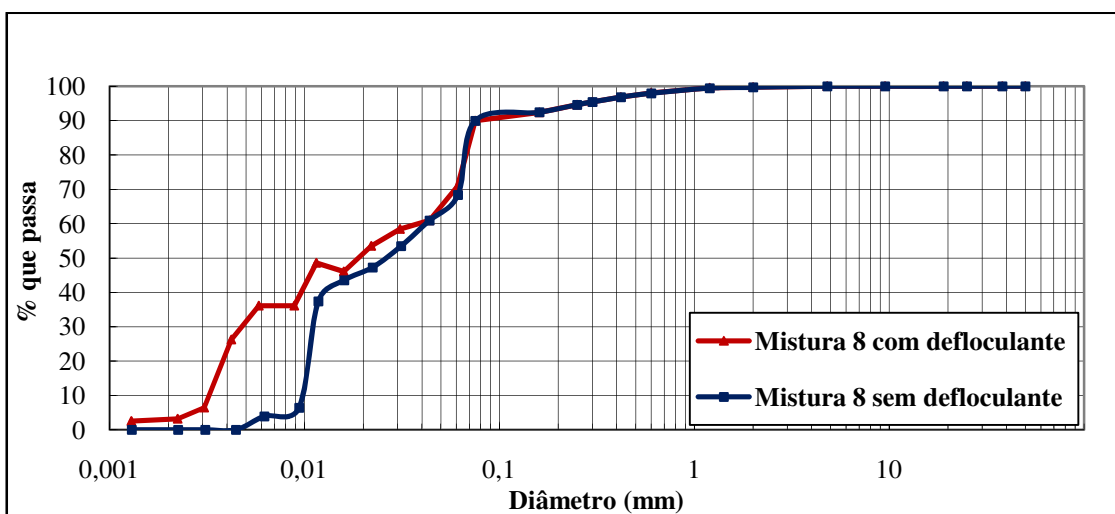


Figura 6.14 - Curvas granulométricas da Mistura 8 com e sem defloculante

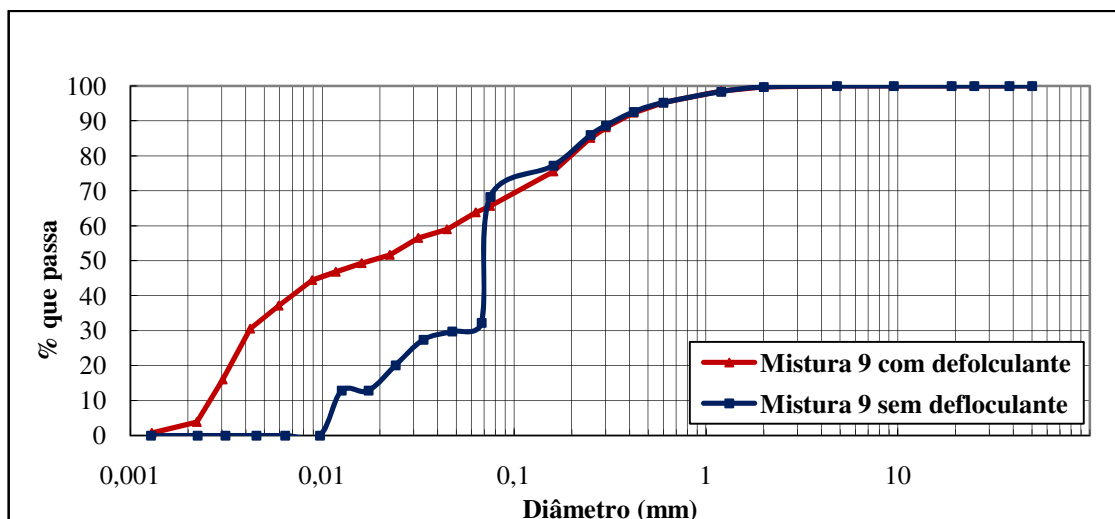


Figura 6.15 - Curvas granulométricas da Mistura 9 com e sem defloculante

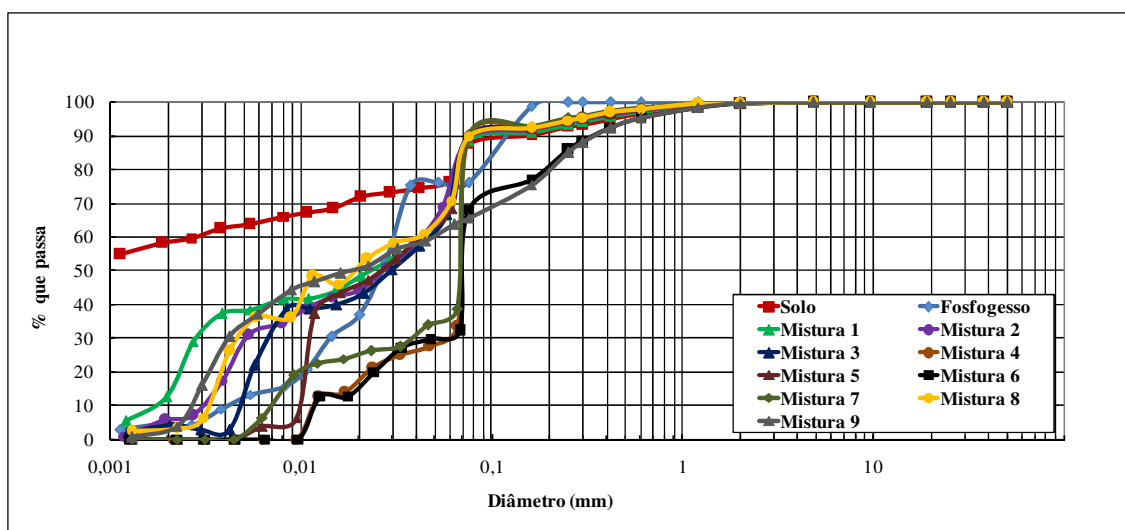


Figura 6.16 - Curvas granulométricas dos materiais estudados com defloculante

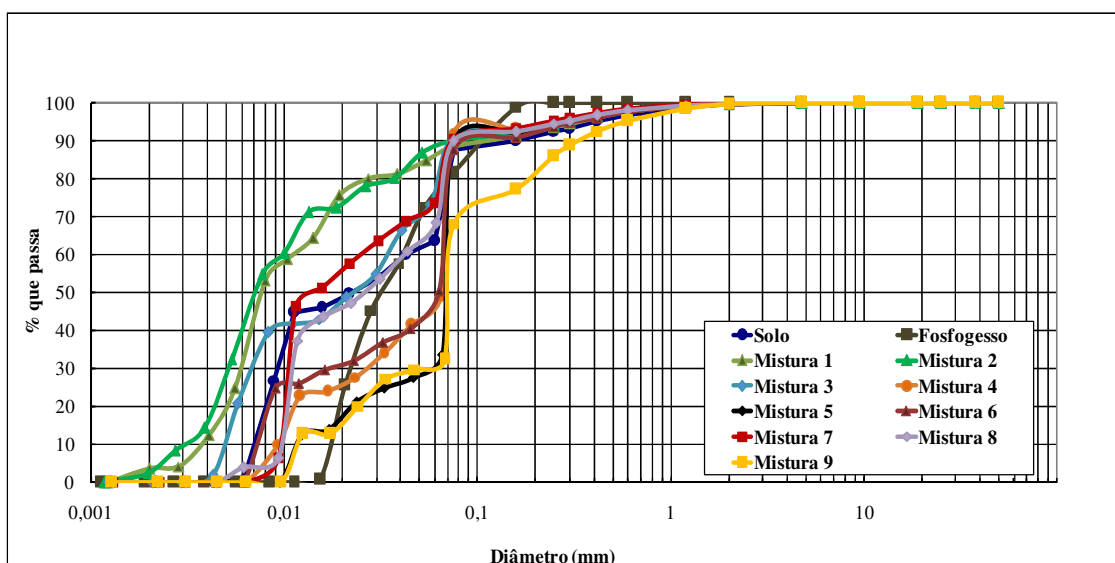


Figura 6.17 - Curvas granulométricas dos materiais estudados sem defloculante

6.3.1.2 Massa específica dos grãos

Os valores obtidos na determinação da massa específica dos grãos estão dispostos na Tabela 6.2. O solo apresentou valor de massa específica comumente encontrado na região. O fosfogesso apresentou valor de $3,542 \text{ g/cm}^3$, sendo este resultado próximo do valor obtido por Mesquita (2007), que é de $3,359 \text{ g/cm}^3$. Estes valores próximos podem ser devido à origem do fosfogesso desta e da referida pesquisa que são provenientes da mesma empresa, localizada no Município de Catalão-GO.

Com relação às Misturas 1, 2 e 3 (misturas de solo e fosfogesso) pôde-se verificar que houve um aumento considerável na massa específica com a adição de fosfogesso.

A incorporação de cal ao solo (Misturas 4, 5 e 6) causa pouca variação na massa específica dos grãos em relação ao valor encontrado para o solo tropical, ocorrendo apenas um pequeno aumento deste valor à medida que aumentou-se a proporção de cal nas misturas.

Com relação às Misturas 7 e 8, os valores de massa específica dos grãos são próximos. Este resultado pode ser explicado devido à utilização da mesma proporção de solo, fosfogesso e cal, mudando apenas o tipo de cal utilizada.

A Mistura 9 apresentou valor de massa específica menor em relação as misturas de solo, fosfogesso e cal, podendo este fato ser explicado pela diferença na proporção dos materiais utilizados na mistura.

Tabela 6.2 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos

Materiais Estudados	Propriedade $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Solo	2,967
Fosfogesso	3,542
Mistura 1	3,075
Mistura 2	3,176
Mistura 3	3,148
Mistura 4	2,930
Mistura 5	2,952
Mistura 6	2,974
Mistura 7	2,942
Mistura 8	2,959
Mistura 9	2,914

Obs: ρ = massa específica dos grãos

6.3.1.3 Limites de Consistência

O ensaio de limite de liquidez e de plasticidade para o fosfogesso foi considerado inexecutável, pois a pasta de fosfogesso não apresentou a trabalhabilidade necessária para a realização destes ensaios (Figura 6.18). Assim, pôde-se verificar que o fosfogesso é um material não plástico, conforme constatado também por Mesquita (2007).

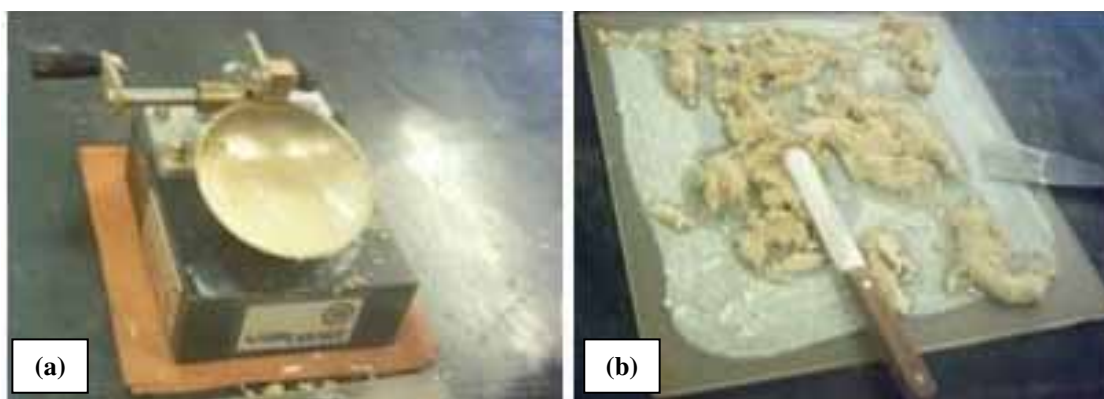


Figura 6.18 – Ensaio de limites de consistência: (a) limite de liquidez; (b) limite de plasticidade

Os valores obtidos de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para os demais materiais estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de limite de consistência

Amostras	Propriedades		
	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)
Solo	54,0	33,0	21,0
Fosfogesso	---	---	NP
Mistura 1	47,0	32,4	14,6
Mistura 2	48,2	33,2	15,0
Mistura 3	48,5	33,3	15,2
Mistura 4	42,0	31,2	10,8
Mistura 5	41,4	33,3	8,1
Mistura 6	44,5	34,0	10,5
Mistura 7	72,5	46,5	26,0
Mistura 8	91,9	53,9	38,0
Mistura 9	43,2	32,5	10,7

Obs: w_L = limite de liquidez; w_p = limite de plasticidade;
IP = índice de plasticidade.

Verifica-se que a adição de fosfogesso ao solo (Misturas 1, 2, 3) gerou redução no limite de liquidez e no índice de plasticidade. No entanto, observa-se que esta redução atingiu níveis maiores quando a cal foi utilizada (Misturas 4, 5, 6). Em termos de limite de plasticidade não foram observadas mudanças significativas nos valores. Assim, constata-se que a estabilização química deste solo com cal apresenta melhores resultados do que com o fosfogesso. No entanto, o fosfogesso aparece como uma alternativa viável considerando, inclusive, os ganhos ambientais envolvidos.

Os valores obtidos para as Misturas 1, 2 e 3 (90% solo de Catalão-GO + 10% fosfogesso; 80% solo de Catalão-GO + 20% fosfogesso; 70% solo de Catalão-GO + 30%, respectivamente) estão bem próximos, ou seja, o aumento da proporção de fosfogesso na mistura não causou mudanças significativas nos limites de consistência das mesmas. Esse comportamento também foi verificado para as Misturas 4, 5 e 6 (97% solo de Catalão-GO + 3% cal calcítica CHIII; 94% solo de Catalão-GO + 6% cal calcítica CHIII; 91% solo de Catalão-GO + 9% cal calcítica CHIII, respectivamente).

Com relação às Misturas 7 e 8 (81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal calcítica CHIII; 81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica, respectivamente), verifica-se que o resultado dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade atingiram valores elevados. Este resultado indica que ocorrem reações químicas entre os materiais utilizados, que tornam as misturas mais plásticas. Esta constatação inviabiliza a utilização dessas misturas em pavimentação.

Já a Mistura 9 (81,9% solo Goiânia-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal CHI) apresentou valores de limites de consistência menores, na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para as misturas de solo e fosfogesso (Misturas 1, 2 e 3) e solo-cal (Misturas 4, 5 e 6). Isto indica que o solo utilizado nas amostras estudadas é determinante no comportamento dessas misturas.

Algumas hipóteses podem ser mencionadas para explicar esse comportamento: no solo de Catalão-GO pode existir algum mineral que reage com o fosfogesso e a cal ou a adição de água na mistura dos três materiais pode desencadear alguma reação química ou ainda favorecer a formação de um novo mineral. Isto mostra a necessidade de serem realizados ensaios como análise química e difração de raios-X para obter uma explicação para este fato.

6.3.2 Classificação dos materiais

Com os resultados de caracterização as amostras selecionadas nesta pesquisa foram classificadas de acordo com a classificação MCT, SUCS e TRB.

6.3.2.1 Classificação MCT

O solo de Catalão-GO foi classificado utilizando a metodologia Miniatura Compactado Tropical (MCT), sendo executados dois ensaios: compactação pelo método mini-MCV (“Moisture Condition Value”) e perda de massa por imersão. Os valores dos índices obtidos estão apresentados na Tabela 5.4, que permitem classificar o solo como argiloso de comportamento laterítico (LG’). A Figura 6.19 apresenta o ábaco de classificação MCT, confirmando o solo tropical característico e comumente encontrado na região.

Tabela 6.4 – Resultados dos ensaios da Metodologia MCT para o solo fino

c'	d'	Pi (%)	e'	Grupo MCT
2,1	100	0	0,6	LG'

Obs: c' = Coeficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade com Mini-MCV = 10; d' = Inclinação da parte reta do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes; Pi = Perda de massa por imersão expressa em porcentagem; e' = Índice da Classificação MCT

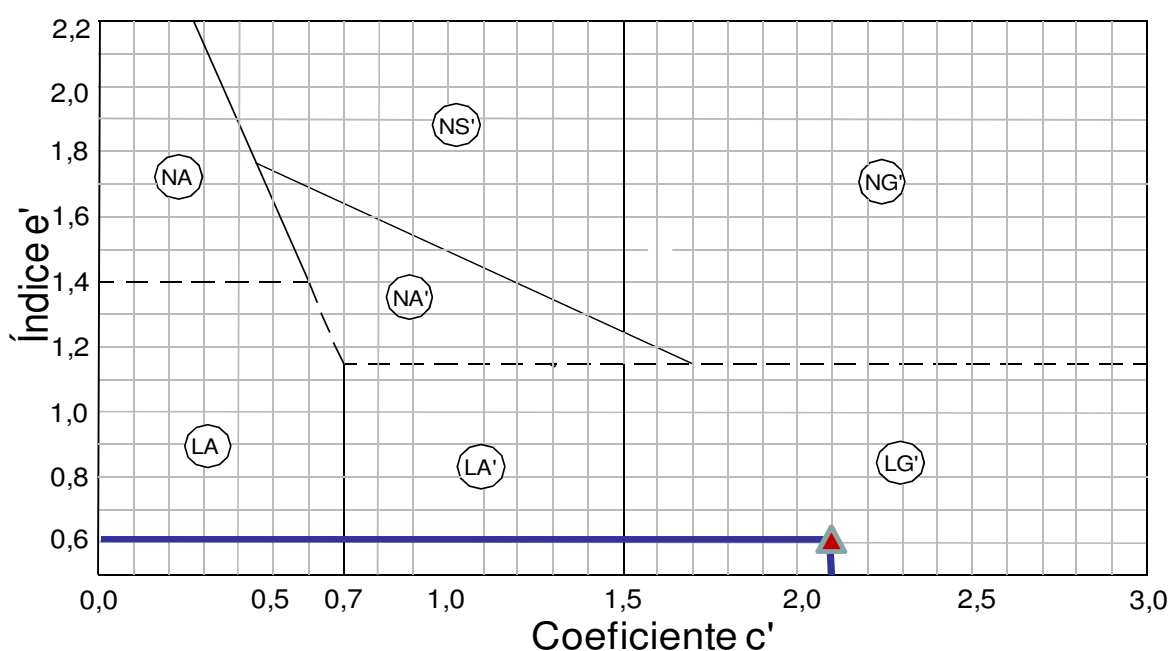


Figura 6.19 – Ábaco de classificação MCT

6.3.2.2 Classificação SUCS e TRB

A partir dos resultados de granulometria com defloculante e dos limites de consistência, as amostras foram classificadas de acordo com o Sistema de Classificação Unificado (SUCS) e a classificação com finalidades rodoviárias “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO) também conhecida como “Transportation Research Board” (TRB), dispostos na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Classificação SUCS e TRB das amostras

Amostras	Classificação	
	SUCS	TRB
Solo	MH	A7-5
Fosfogesso	ML	A4
Mistura 1	ML	A7-5
Mistura 2	ML	A7-5
Mistura 3	ML	A7-5
Mistura 4	ML	A7-5
Mistura 5	ML	A-5
Mistura 6	ML	A7-5
Mistura 7	MH	A7-5
Mistura 8	MH	A7-5
Mistura 9	ML	A7-5

De acordo com o sistema SUCS, o solo estudado foi classificado como um silte de alta compressibilidade (MH), já no sistema TRB, corresponde a um solo argiloso do tipo A7-5, constatando assim que o solo selecionado para a pesquisa não apresenta classificações coincidentes nos sistemas tradicionais.

O fosfogesso foi classificado pelo SUCS como silte de baixa compressibilidade (ML) e no sistema TRB como solo siltoso (A-4) coincidindo com o resultado obtido por Mesquita (2007).

Para as Misturas 1, 2, 3, 4 e 6 obteve-se a mesma classificação para os dois sistemas, sendo classificados no sistema SUCS como silte de baixa compressibilidade (ML) e no sistema TRB como solos argilosos (A7-5).

A classificação da Mistura 2 coincide com a classificação estudada por Mesquita (2007), contendo a mesma proporção de solo e fosfogesso (80% solo de Goiânia-GO + 20% fosfogesso).

A Mistura 5 foi classificada como silte de baixa compressibilidade (ML) no sistema SUCS e solo siltoso (A-5) no sistema TRB. Assim, constata-se que para esta mistura as duas classificações tradicionais foram coincidentes.

As Misturas 7 e 8 obtiveram a mesma classificação no sistema SUCS e TRB, sendo silte de alta compressibilidade (MH) e solo argiloso (A7-5), respectivamente. Estes resultados foram coincidentes com a classificação do solo, indicando que o solo selecionado é determinante no comportamento dessas misturas, como também foi verificado nos demais ensaios de caracterização.

A Mistura 9 foi classificada como silte de baixa compressibilidade no sistema SUCS e solo argiloso no sistema TRB. Este resultado diferenciado das misturas de solo, fosfogesso e cal estudadas (Misturas 7 e 8) pode ser devido a proporção dos materiais utilizados e, principalmente, em função do solo da Mistura 9 ter sido coletado em local diferente (Goiânia-GO) das demais misturas (Catalão-GO).

6.3.3 Análises Químicas

Foram realizadas análises de pH em água e pH em KCl, complexo sortido, micronutrientes, saturação de bases e capacidade de troca catiônica (CTC) nas amostras de solo, nas misturas de solo e fosfogesso (Misturas 1, 2 e 3), e nas misturas de solo, fosfogesso e cal (Misturas 7, 8 e 9). Entre as misturas de solo-cal apenas a Mistura 6 (91% solo de Catalão + 9% cal calcítica CHIII) foi selecionada para análise química por esta ter sido a dosagem que apresentou melhor desempenho em termos de capacidade de suporte, conforme mostrado no item 6.3.5. A Tabela 6.6 apresenta os resultados das análises químicas realizadas nestas amostras.

Nas amostras de fosfogesso e das cales foram realizados apenas os ensaios de pH em água e pH em KCl (Tabela 6.7), sendo que as outras análises não foram realizadas pelo fato do laboratório contratado não aplicar os métodos específicos para solos em outros materiais.

O solo apresentou pH levemente ácido tanto em água quanto em KCl com valores próximos de 6,0, sendo característico de solos tropicais. A diferença entre o pH em água e em KCL do solo foi negativa indicando a presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Já o fosfogesso apresentou pH levemente ácido em água e básico em KCl. As misturas de solo-fosfogesso e solo-cal apresentaram pH básico tanto em água quanto em KCl. Nas misturas de

solo com fosfogesso e cal observou-se que o valor de pH foi semelhante ao obtido pelas cales utilizadas.

Tabela 6.6 – Resultados das análises químicas do solo e das misturas

Características	Solo	Misturas						
		1	2	3	6	7	8	9
pH em água	6,8	7,6	6,8	8,4	12,4	12,2	12,5	12,5
pH em KCL	6,5	8,5	6,0	8,5	12,3	11,9	12,4	12,4
Δ pH (KCL - água)	-0,3	0,9	-0,2	0,1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,1
Ca + Mg cmolc/dm ³ (mE/ 100ml)	0,4	130,1	130,1	150,1	29,9	105,0	145,0	160,0
Ca cmolc/dm ³ (mE/ 100 ml)	0,3	130,0	130,0	150,0	29,0	105,0	145,0	160,0
Mg cmolc/dm ³ (mE/ 100 ml)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
K cmolc/dm ³ (mE/ 100 ml)	0,04	0,03	0,03	0,00	0,12	0,09	0,06	0,03
Al cmolc/dm ³ (mE/ 100 ml)	0,0	0,0	0,0	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0
Acidez total H +Al cmolc/dm ³ (mE/ 100 ml)	1,2	1,1	1,1	0,8	---	---	---	---
CTC (mEq/ 100 cm ³)	1,66	130,35	131,34	151,06	29,32	105,26	145,27	160,0
Saturação de Alumínio (%Al)	---	---	---	---	---	---	---	---
Saturação de Bases (V%)	27,81	99,16	99,16	99,47	100	100	100	100
Matéria Orgânica (g/dm ³)	6,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	7,0
Fósforo (mg/dm ³)	1,5	12,7	17,5	26,7	2,1	1,5	2,4	1,8
Ca/Mg (%)	3	1300	1300	1500	---	---	---	---

A CTC do solo é baixa, já as misturas apresentaram valores de CTC considerados muito elevados (maior que 11,30 mEq/ 100 cm³). Observa-se que o valor obtido para a saturação de bases do solo (V) está situado entre 25% e 50%, sendo classificado como baixo, isto indica que o solo é intemperizado.

Verifica-se também que houve aumento do teor de fósforo entre as Mistura 1, 2 e 3. Este resultado poder ser devido ao fosfogesso apresentar fósforo em sua composição e, portanto, à medida que eleva-se o teor de fosfogesso na mistura ocorre aumento de fósforo.

Mesquita (2007) constatou a presença de alumínio no fosfogesso. Neste trabalho, a Mistura 3 (70% de solo + 30% de fosfogesso) apresentou uma pequena quantidade deste elemento, sendo que o alumínio pode ser proveniente do fosfogesso e ao reagir com o solo tornou-se nulo nas misturas com quantidades inferiores a 30% de fosfogesso.

Tabela 6.7 – Resultados das análises químicas do fosfogesso e cales

Características	Fosfogesso	Cales		
		CHI	CHIII	Dolomítica
pH em água	6,60	12,25	12,21	12,05
pH em KCL	8,20	12,42	12,42	12,33
Δ pH (KCL - água)	1,60	0,17	0,21	0,28

6.3.4 Difração de raios-X

O Quadro 6.1 apresenta o resultado da difração de raios-X nas amostras estudadas e as Figuras 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.23, 6.24 e 6.25 apresentam os gráficos dos difratogramas dos materiais estudados.

Quadro 6.1 – Minerais identificados nas amostras

Amostras	Mineral Principal	Minerais subordinados	Mineral traço
Solo de Goiânia-GO	Gibsita	Caulinita, quartzo e hematita	Goethita
Solo de Catalão-GO	Gibsita	Caulinita, anatasio, rutilo e hematita	Pirocloro e Florencita
Fosfogesso	Gibsita	Silicato hidratado de Mg e U e laumonita	Quartzo
Cal calcítica CHI	Calcita	Portlandita ou hidróxido de cálcio	---
Cal calcítica CHIII	Calcita	Portlandita ou hidróxido de cálcio	---
Cal dolomítica	Portlandita ou hidróxido de cálcio	Calcita	---

Observa-se que os solos de Goiânia-GO e Catalão-GO apresentaram a gibsita como mineral principal e caulinita entre os minerais subordinados. Os minerais anatósio e rutilo detectados no solo de Catalão-GO são provenientes da rocha de origem (rocha fosfática). O fosfogesso estudado, assim como os solos, apresentou a gibsita como mineral principal e traços de quartzo como verificado por Castilhos Jr. et al. (1998).

As cales do tipo calcítica apresentaram a mesma composição mineralógica, sendo a calcita identificada como o mineral principal e a portlandita ou hidróxido de cálcio apresentaram-se como minerais subordinados. Já a cal do tipo dolomítica ocorreu o contrário, sendo verificado a portlandita ou hidróxido de cálcio como mineral principal e a calcita como mineral subordinado.

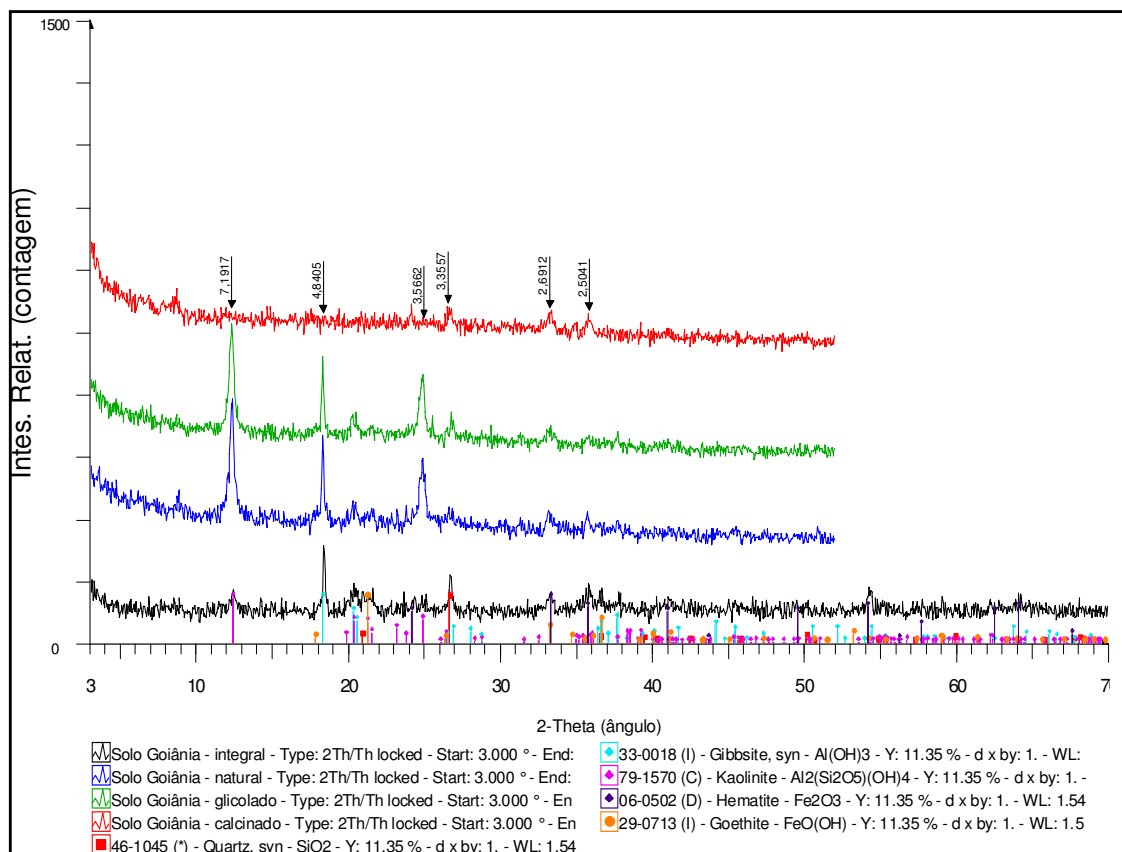


Figura 6.20 – Difratoograma da amostra do solo de Goiânia-GO

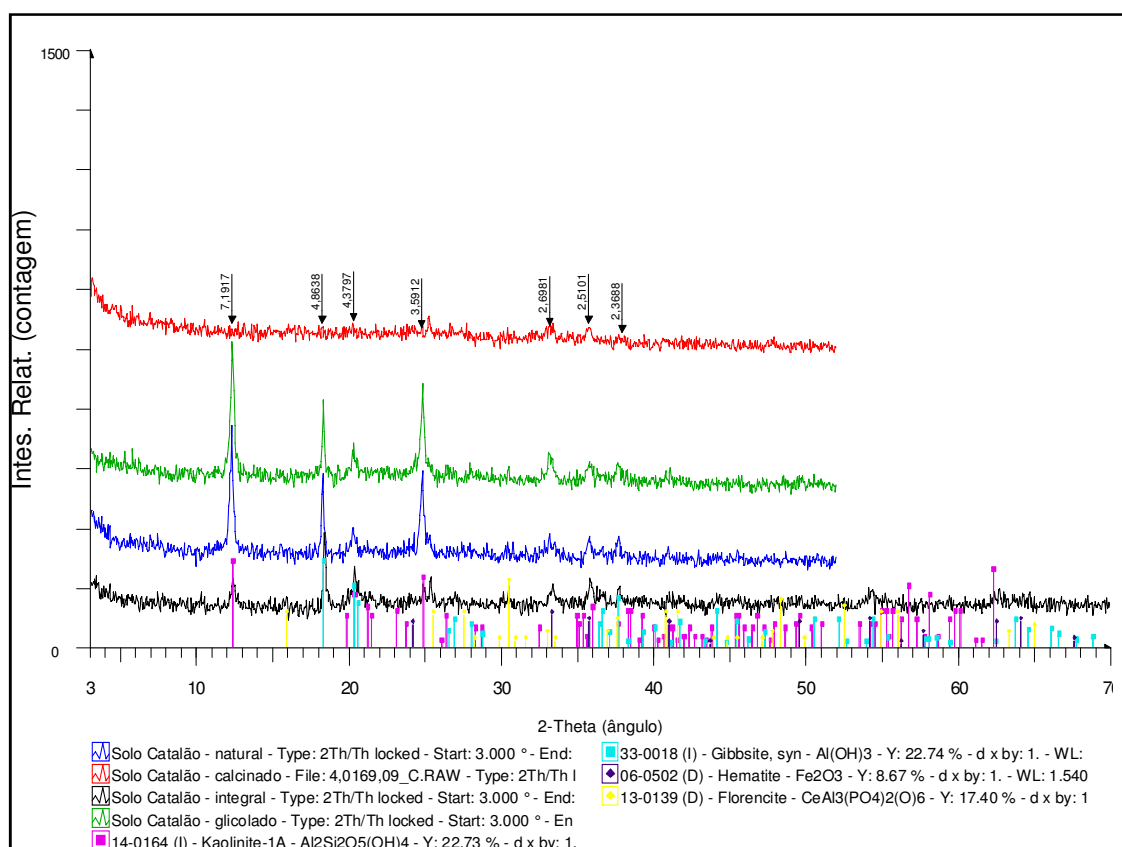


Figura 6.21 – Difratoograma da amostra do solo de Catalão-GO

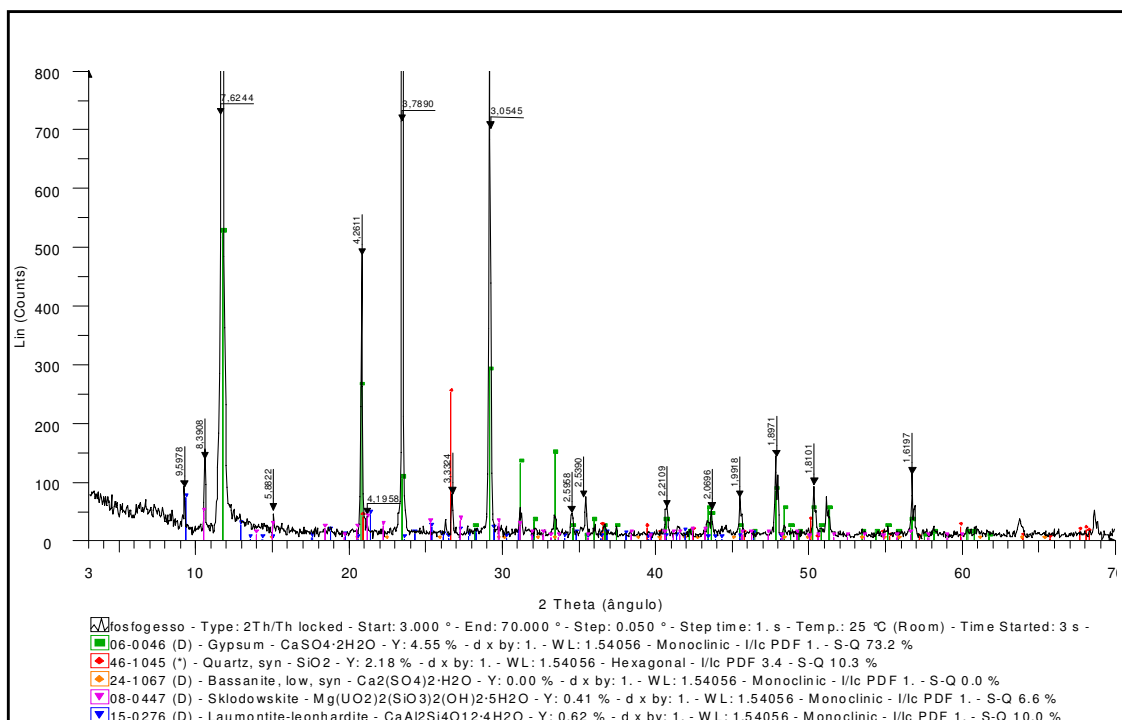


Figura 6.22 – Difratoograma da amostra de fosfogesso

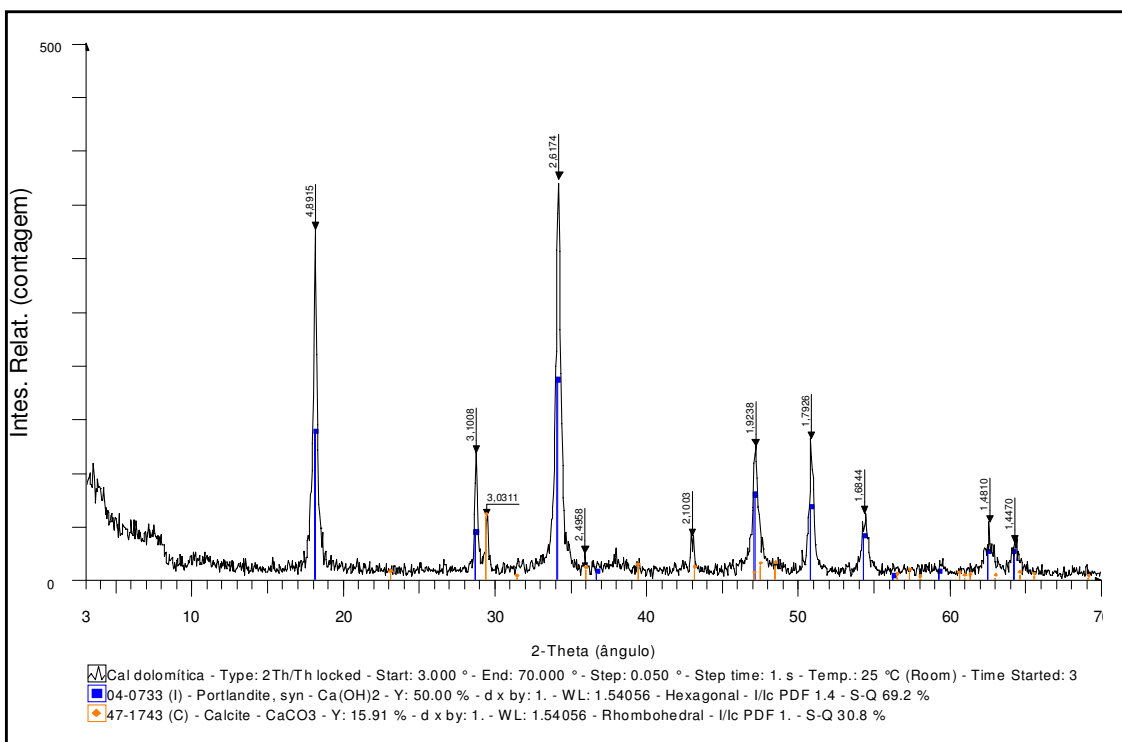


Figura 6.23 – Difratoograma da amostra da cal dolomítica

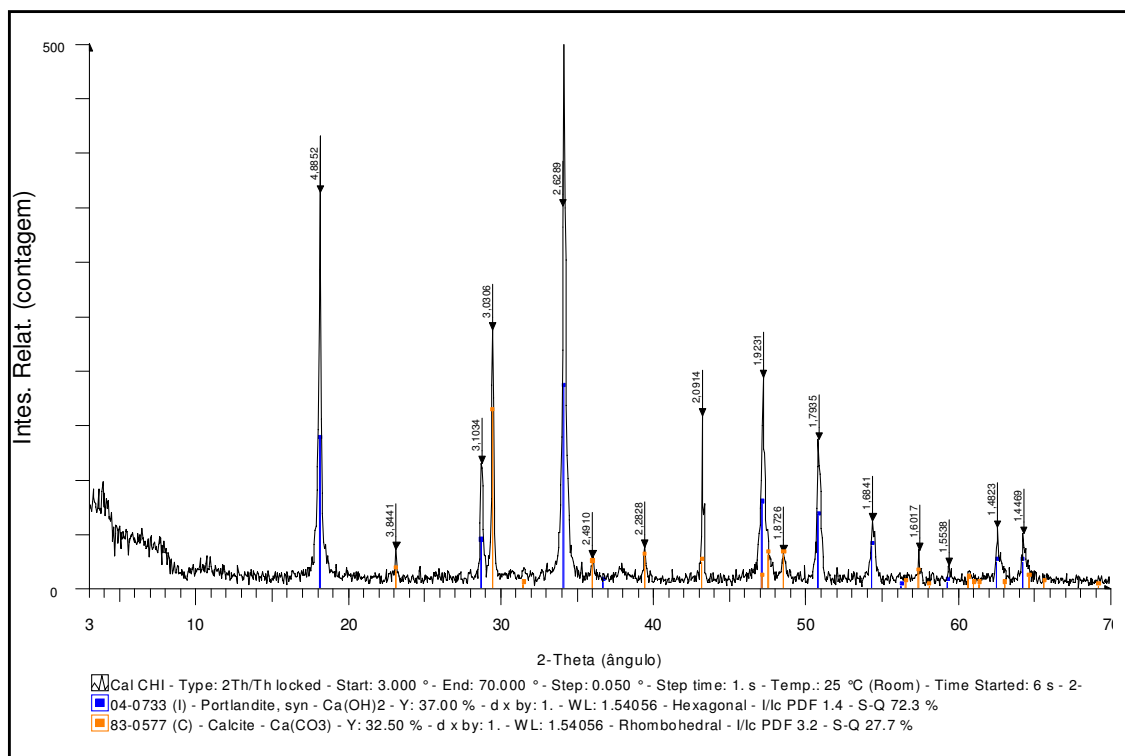


Figura 6.24 – Difratoograma da amostra da cal calcítica CHI

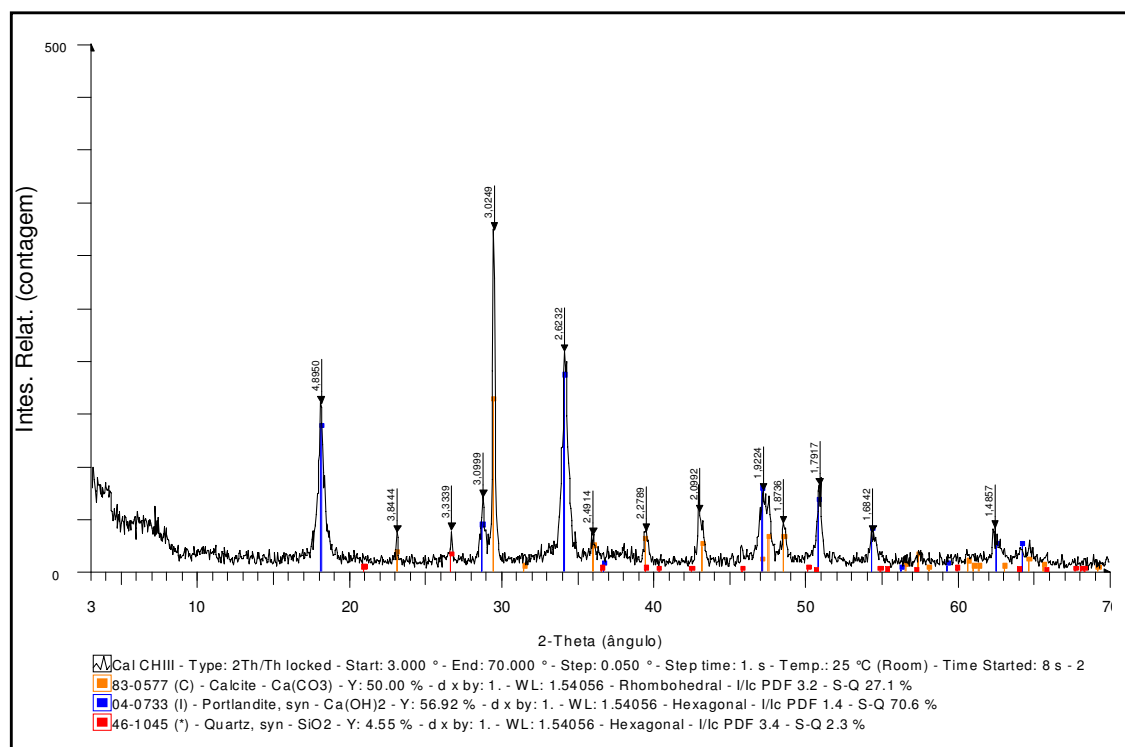


Figura 6.25 – Difratoograma da amostra da cal calcítica CHIII

Analisando as amostras secas não foi identificada a existência de minerais que justifiquem a elevada plasticidade observadas nas Misturas 7 e 8 como discutido no item 6.3.1.3. Além disso, os resultados de expansão apresentados no item 6.3.5 mostraram elevados valores para as Misturas 7 e 8 (18,5% e 29,6%, respectivamente).

Para a Mistura 9 não foi observado valor tão elevado (2,25%), mas este nível de expansão já inviabiliza a utilização do material em pavimentação. Por este motivo, foram realizadas difrações de raios-X nas amostras compactadas com e sem imersão em água.

Nas amostras compactadas sem imersão contendo solo, fosfogesso e cal (Misturas 7, 8 e 9), a difração de raios-X identificou o aparecimento do mineral etringita (sulfato hidratado de cálcio e alumínio), o que pode explicar a expansão dessas misturas. Segundo Mehta e Monteiro (1994) a formação de etringita em concretos ocorre minutos após o início da hidratação assumindo formas aciculares ou placas hexagonais delgadas. Este fato provavelmente ocorreu nas misturas de solo, fosfogesso e cal, pois a difração de raios-X mostrou o aparecimento deste mineral após a adição de água para a compactação.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (1994) nos cimentos comerciais aparecem impurezas como o óxido de magnésio (MgO), provenientes do dolomito, por isso, sua utilização deve ser restringida já que sua hidratação é lenta e expansiva. Nesta pesquisa, a amostra contendo a cal do tipo dolomítica (Mistura 8) apresentou uma expansão bem elevada, que pode ser explicada pela reação da dolomita com o solo e o fosfogesso, que favorece a cristalização do mineral etringita, provocando elevados valores de expansão.

Luz et al. (2005) estudou a aplicação de misturas de fosfogesso e cal buscando formular um cimento com baixo impacto ambiental. Foram estudadas amostras contendo 95% fosfogesso + 5% de cal, 90% + 10% cal, 85% + 15% cal, 80% fosfogesso + 20% cal, 75% fosfogesso + 25% cal e 70% fosfogesso + 30% cal. A difração de raios-X mostrou o aparecimento de etringita, sendo que à medida que elevou-se os teores de cal ocorreu aumento deste mineral. Este resultado confirma que misturas contendo fosfogesso e cal reagem favorecendo o aparecimento de etringita podendo provocar expansão dos materiais.

As Figuras 6.26, 6.27 e 6.28 apresentam os difratogramas das amostras compactadas sem imersão e as Figuras 6.29, 6.30 e 6.31 com imersão.

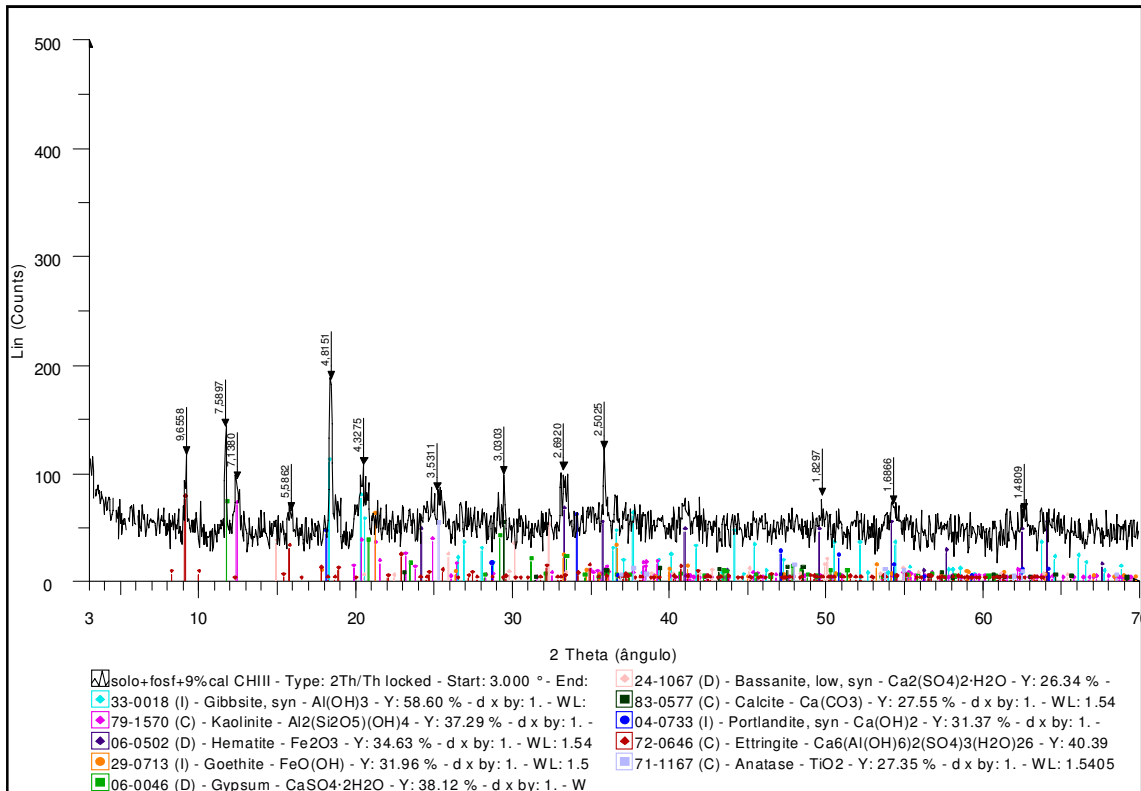


Figura 6.26 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 7

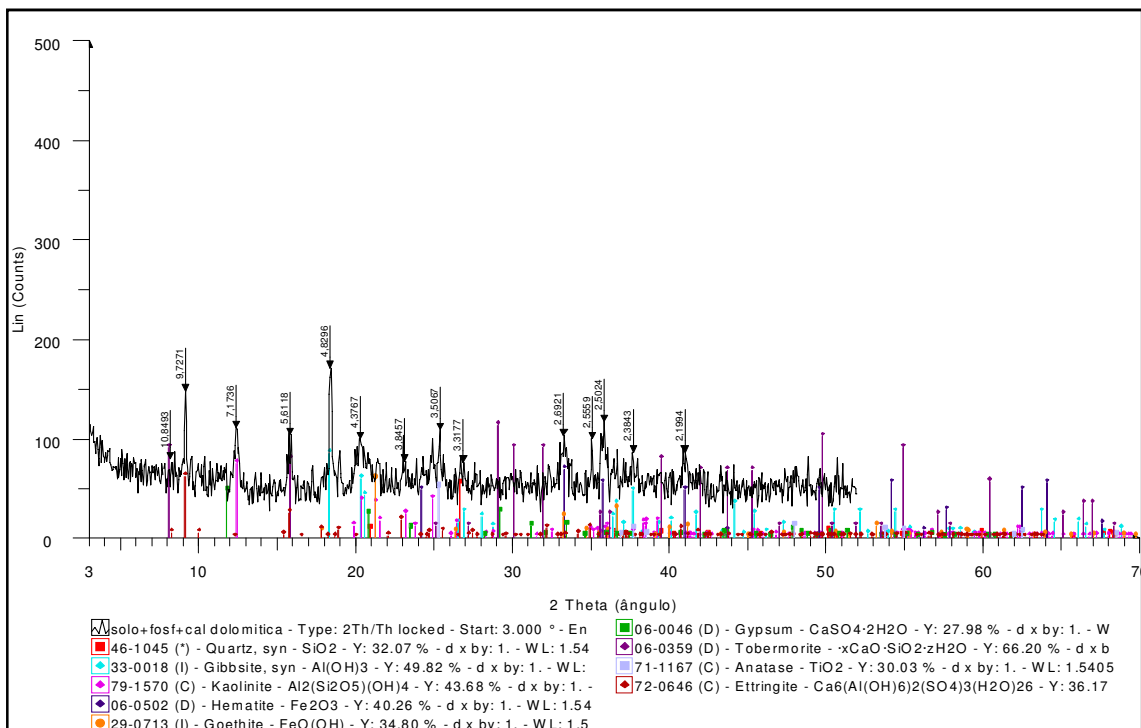


Figura 6.27 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 8

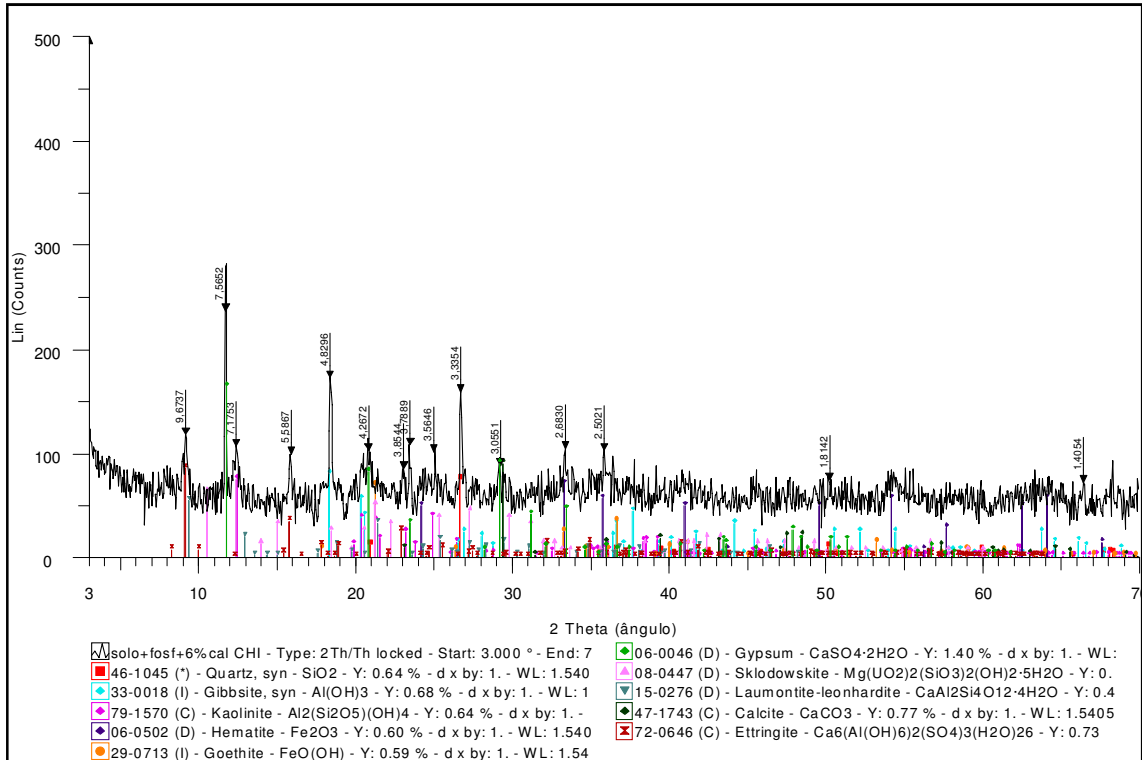


Figura 6.28 – Difratoograma da amostra compactada da Mistura 9

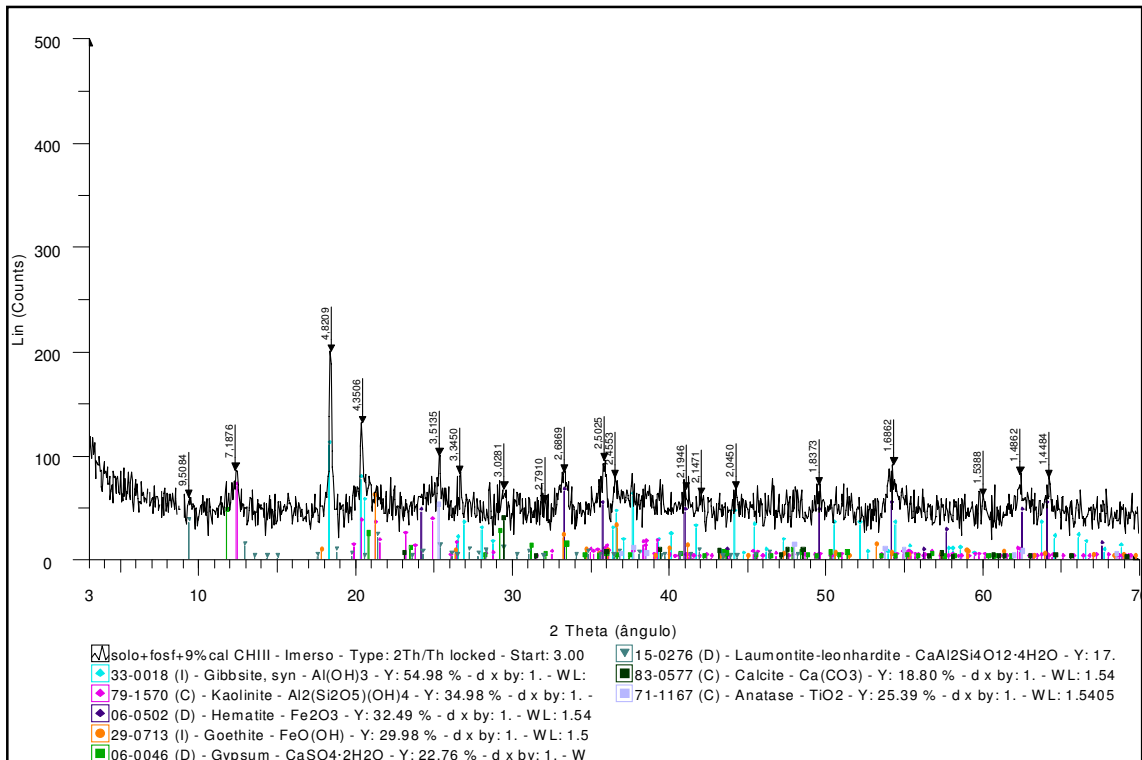


Figura 6.29 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 7

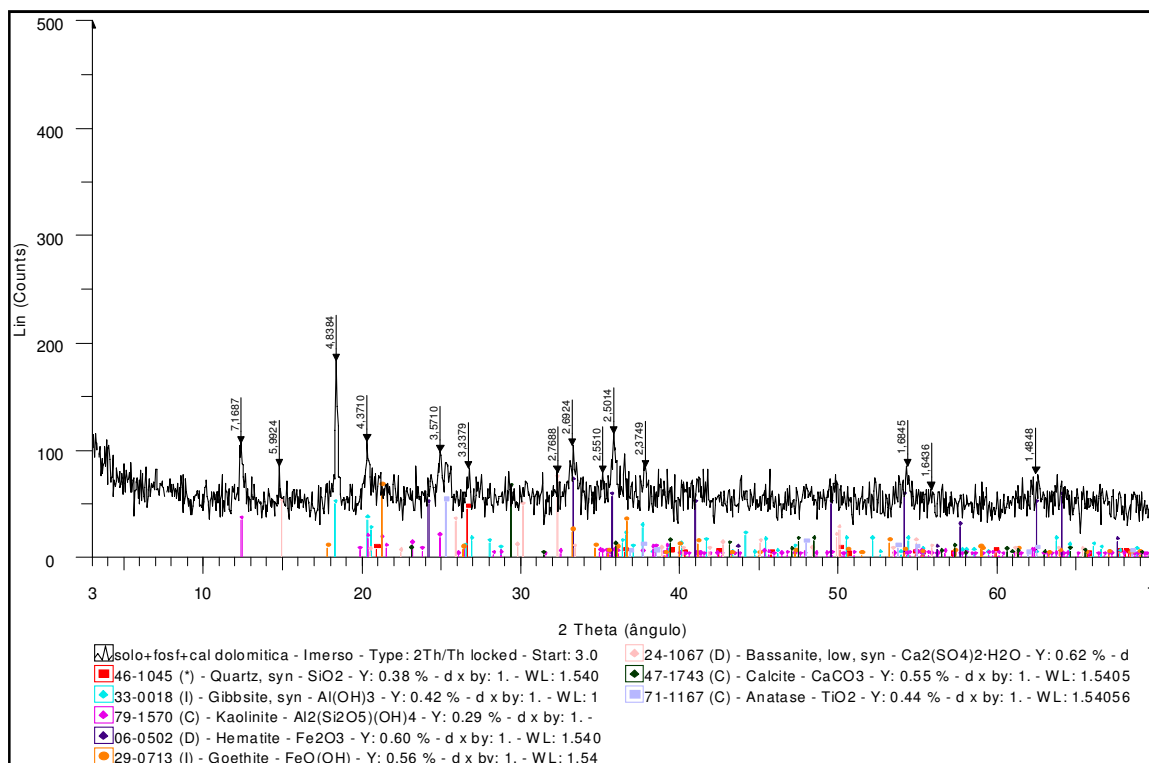


Figura 6.30 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 8

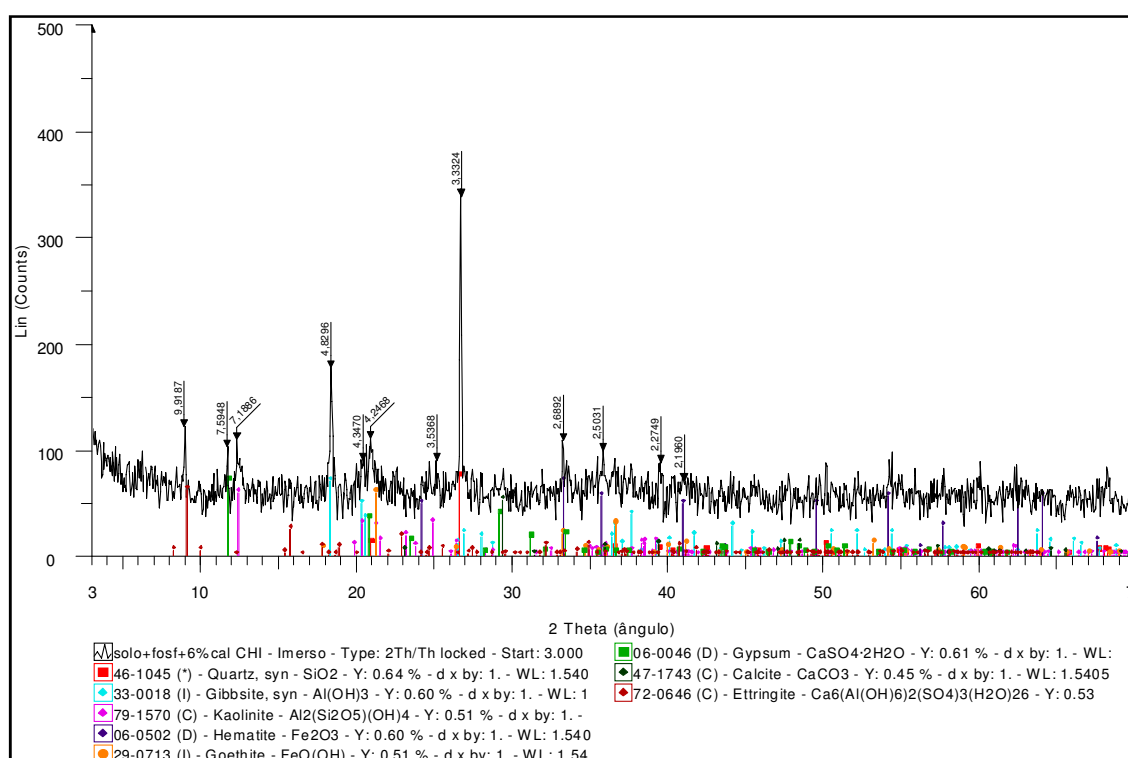


Figura 6.31 – Difratoograma da amostra compactada e imersa da Mistura 9

Nas amostras compactadas e imersas não ocorreu o aparecimento da etringita mineral em todos os ensaios (Figuras 6.29, 6.30 e 6.31). De acordo com Mehta e Monteiro

(1994) com a imersão em água a etringita pode se tornar instável decompondo-se e formando monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável. Isto explica o fato desse mineral não ter sido constatado em todas as amostras imersas. Sendo assim, pode-se concluir que o aparecimento da etringita ocorre durante a adição de água na preparação do corpo-de-prova que será compactado e não durante o processo de imersão realizado no ensaio de expansão. Portanto, os elevados valores de plasticidade e expansão das Misturas 7 e 8 ocorrem devido a formação de um novo mineral (etringita) após a adição de água.

6.3.5 Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR)

Os ensaios de compactação das amostras estudadas foram executados com energia Proctor Intermediária para a determinação da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. Os mesmo moldes foram utilizados para os ensaios de expansão e “California Bearing Ratio” (CBR). Os valores de umidade ótima, peso específico aparente seco máximo, expansão e CBR estão apresentados na Tabela 6.8.

Verificou-se no estudo de Mesquita (2007) que o fosfogesso apresenta dificuldade na determinação da curva de compactação por terem sido obtidos valores de umidades muito elevados. Constatou-se também que o fosfogesso não apresenta capacidade de suporte e, portanto, sozinho, não poderia ser utilizado numa obra. Em função destes resultados, nesta pesquisa não foram realizados os ensaios de compactação, expansão e “California Bearing Ratio” (CBR) para o fosfogesso puro.

O solo de Catalão-GO apresenta valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo encontrados freqüentemente para solos argilosos compactados. Em termos de CBR, o valor determinado foi inferior a 20% (Figura 6.32). Portanto, o solo poderia ser utilizado no máximo como reforço de subleito ou na construção de aterros em geral.

Com relação às misturas de solo-fosfogesso (Misturas 1, 2 e 3), pôde-se verificar que à medida que eleva-se o teor de fosfogesso na mistura, a umidade ótima aumenta e o peso específico aparente seco máximo diminui. Em relação ao CBR, observa-se que houve aumento entre as Misturas 1 e 2; já na Mistura 3, com o teor de 30% de fosfogesso, houve queda de resistência (Figura 6.33, 6.34 e 6.35, respectivamente). Assim, verifica-se que com os teores de 10% e 20% houve ganho de resistência do solo, sendo possível a utilização das Misturas 1 e 2 em sub-base de pavimentos. No entanto, misturas com teores superiores a 20% não são recomendadas por haver um decréscimo de resistência.

Tabela 6.8. Resultados de compactação, expansão e CBR

Amostras	Propriedades			
	w _{ot} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (KN/m ³)	Expansão (%)	CBR (%)
Solo	26,0	16,0	0,02	13,0
Mistura 1	25,2	15,6	0,02	30,0
Mistura 2	26,0	15,3	0,05	37,0
Mistura 3	30,0	14,5	0,05	17,0
Mistura 4	28,0	15,5	0,00	27,0
Mistura 5	27,0	15,5	0,05	53,0
Mistura 6	28,0	15,0	0,04	70,0
Mistura 7	28,0	15,4	18,5	1,3
Mistura 8	27,0	15,0	29,6	2,4
Mistura 9	24,0	15,8	2,25	66,0

Obs.: w_{ot} = umidade ótima; $\gamma_{dm\acute{a}x}$ = peso específico aparente seco máximo; CBR = “California Bearing Ratio”

Mesquita (2007) estudou amostras de solo encontrado em Goiânia – GO misturado com 50% de fosfogesso (Mistura A), 20% de fosfogesso (Mistura B) 80% de fosfogesso (Mistura C), concluindo que a mistura C não seria indicada para nenhuma aplicação prática. Já o solo e a mistura A poderiam ser utilizados no máximo como reforço do subleito ou na construção de aterros em geral. A mistura B apresentou o mesmo valor de CBR da Mistura 2 do presente estudo, podendo ser utilizada em camadas de sub-base de pavimento (CBR \geq 20%).

As Misturas 4, 5 e 6 apresentaram valores de umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo semelhantes. Verificou-se também que o valor de CBR destas misturas aumentou com a adição de cal (Figuras 6.36, 6.37, 6.38). No entanto, observa-se que para teor de cal superior a 6% o ganho no valor de CBR foi maior. Esses materiais podem ser usados na confecção de camadas de sub-base de pavimentos, pois apresentam CBR acima de 20%. A Mistura 6 apresentou possibilidade de aplicação em bases de pavimento para vias de baixo volume de tráfego, por apresentar CBR superior a 60%.

O processo de estabilização química de uma argila laterítica com cal apresentou maior capacidade de suporte do que as misturas realizadas com solo e fosfogesso. No entanto, a viabilidade de utilização do fosfogesso mostra-se bastante interessante devido às questões ambientais envolvidas. Com relação à expansão, as Misturas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 se mostraram favoráveis (inferior a 2%).

A Mistura 7 (81,9% solo de Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal calcítica CHIII) e a Mistura 8 (81,9% solo de Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica) apresentaram valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo próximos. Verificou-se também que estas misturas apresentaram problemas relacionados à expansão elevada conforme discutido no item 6.3.4, sendo que com o uso da cal dolomítica a expansão

foi ainda maior. Além disso, os valores de CBR encontrados foram muito baixos (Figuras 6.39 e 6.40, respectivamente). Este resultado indica que estas misturas não podem ser utilizadas para construção de pavimentos.

A Mistura 9 apresentou valores de umidade ótima mais baixo, quando comparado ao solo e as outras misturas e o peso específico aparente seco máximo bem próximo ao valor encontrado para o solo. O valor de CBR obtido foi satisfatório (superior a 60%), porém a expansão foi superior a 2% (Figura 6.41). Assim, seria necessária uma correção na expansão para a viabilidade desta mistura.

Faria (2007) estudou misturas de solo de Goiânia-GO, fosfogesso e cal calcítica CHI, sendo verificado que mesmo utilizando outra dosagem de fosfogesso (20%) não apresentou problemas relacionados à expansão. Isto indica que dependendo do tipo de solo, a mistura com fosfogesso e cal pode apresentar viabilidade de utilização.

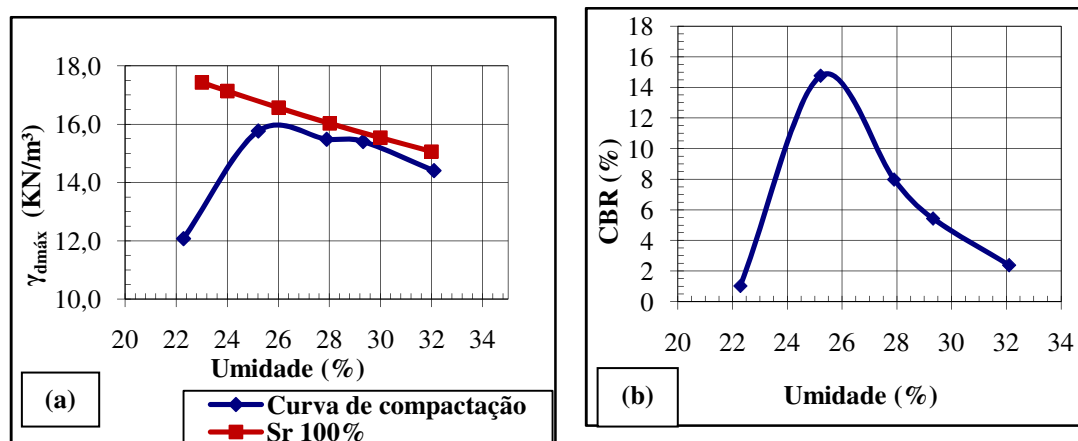


Figura 6.32 – Curvas do solo: (a) compactação e

saturação; (b) CBR

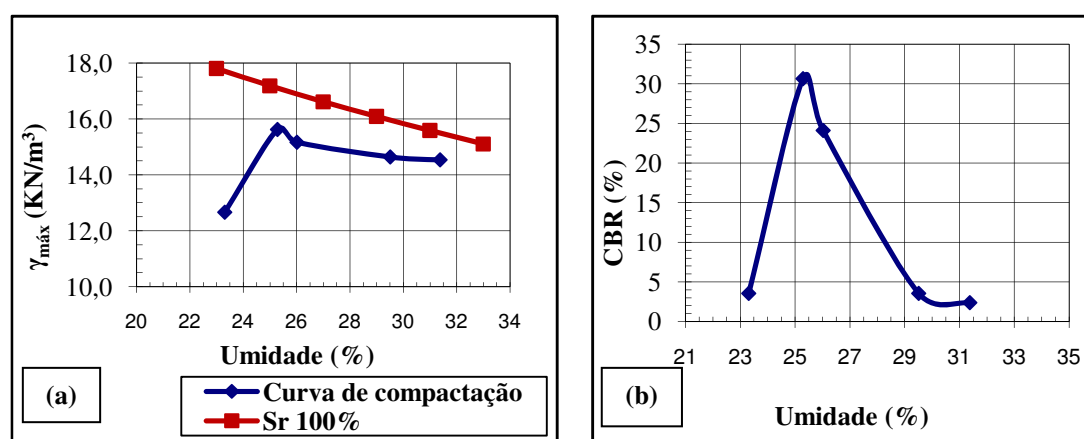


Figura 6.33 – Curvas da Mistura 1: (a) compactação e saturação; (b) CBR

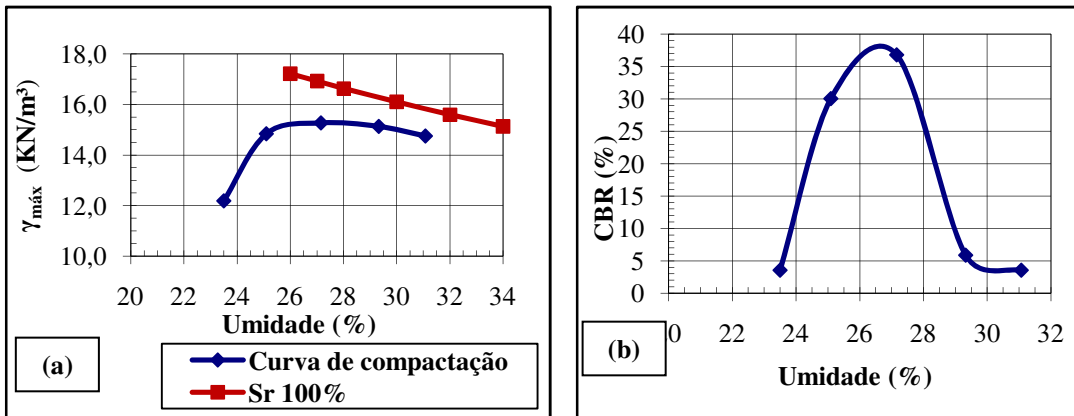


Figura 6.34 – Curvas da Mistura 2: (a) compactação e saturação; (b) CBR

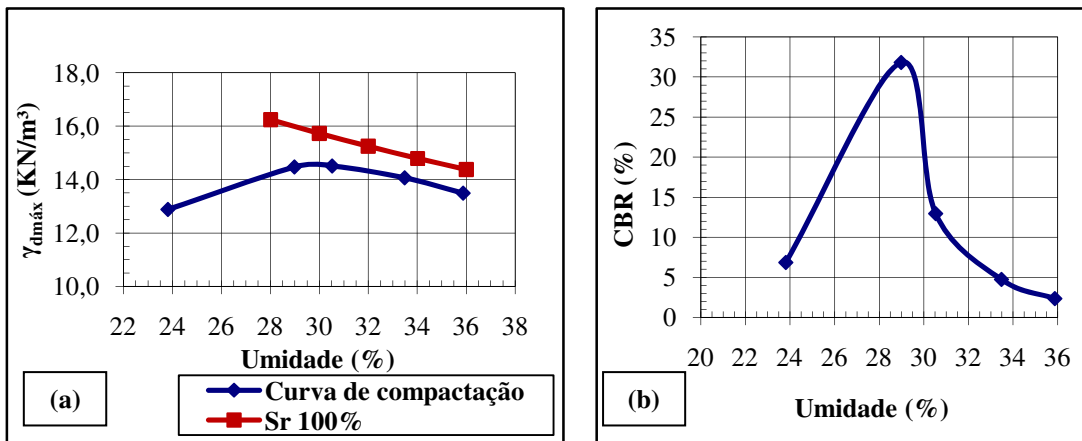


Figura 6.35 – Curvas da Mistura 3: (a) compactação e saturação; (b) CBR

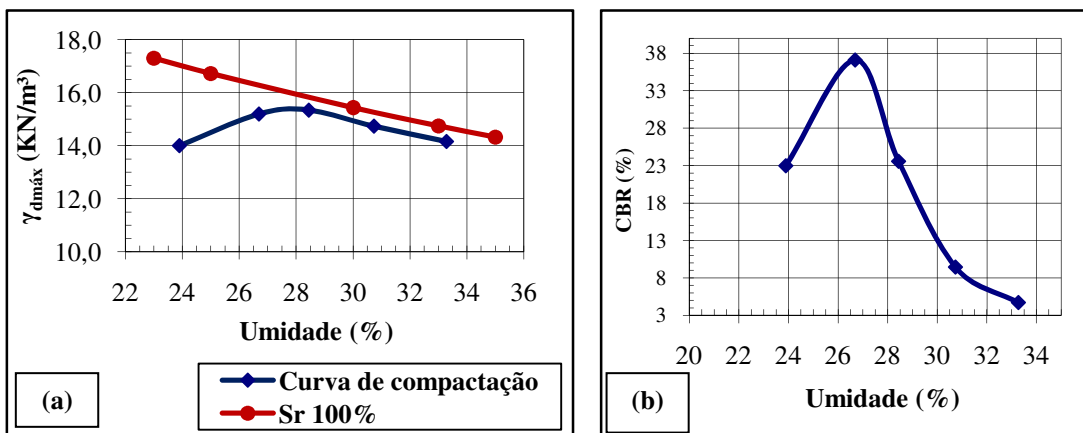


Figura 6.36 – Curvas da Mistura 4: (a) compactação e saturação; (b) CBR

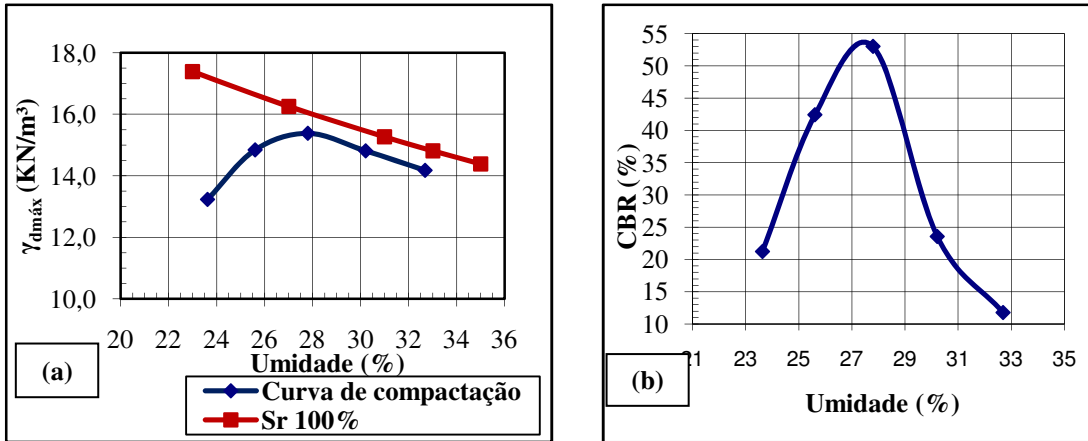


Figura 6.37 – Curvas da Mistura 5: (a) compactação e saturação; (b) CBR

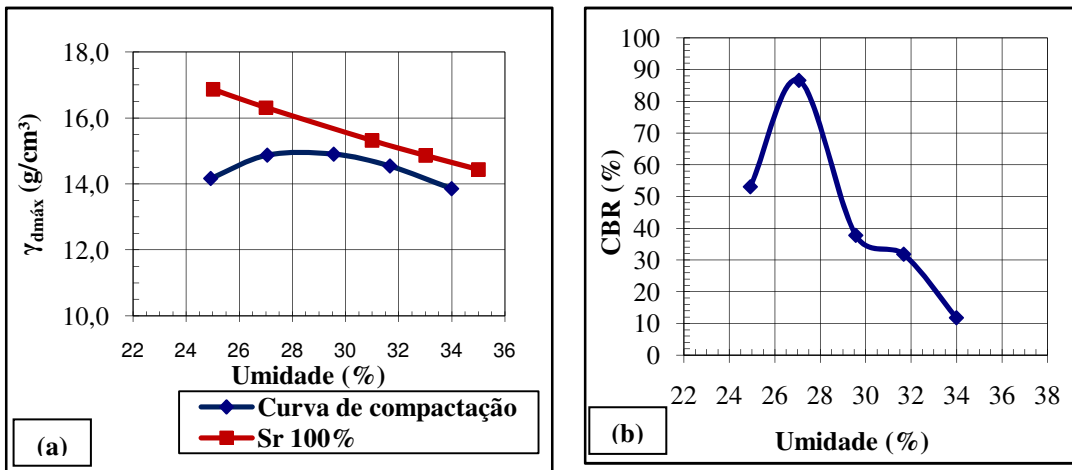


Figura 6.38 – Curvas da Mistura 6: (a) compactação e saturação; (b) CBR

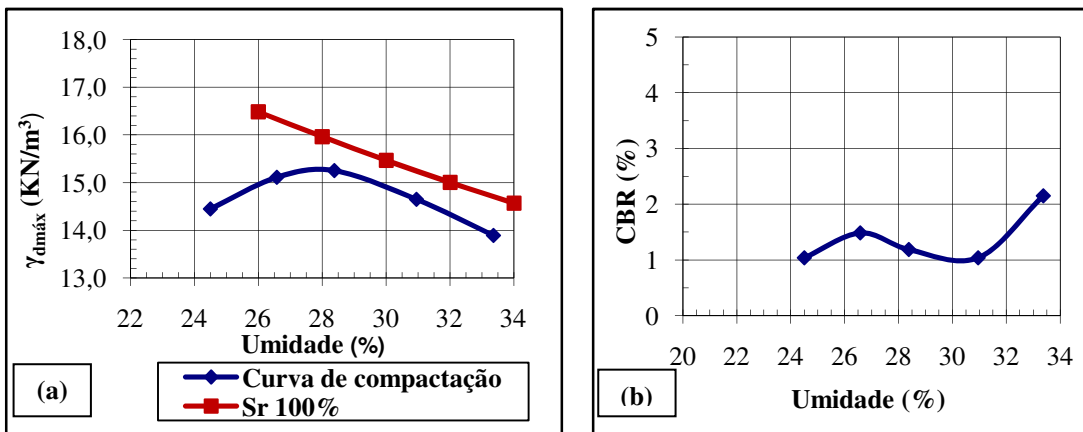


Figura 6.39 – Curvas da Mistura 7: (a) compactação e saturação; (b) CBR

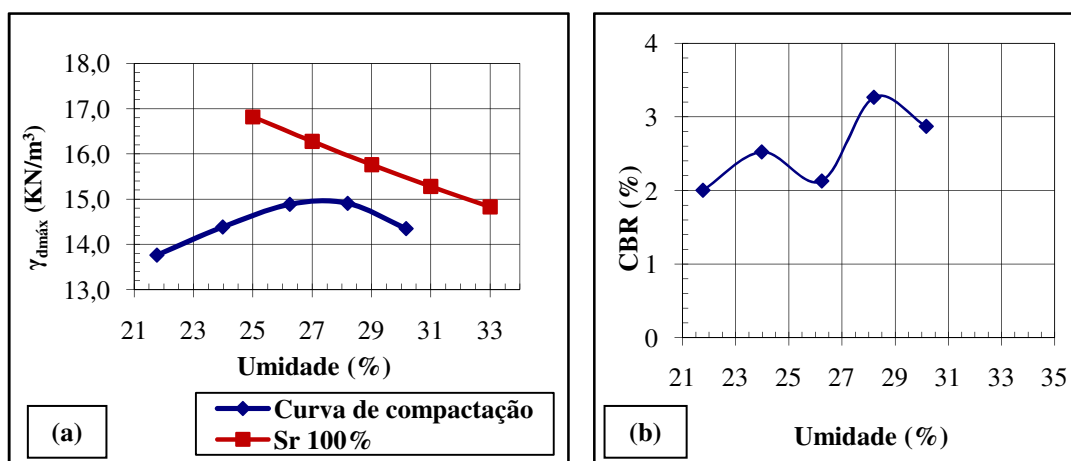


Figura 6.40 – Curvas da Mistura 8: (a) compactação e saturação; (b) CBR

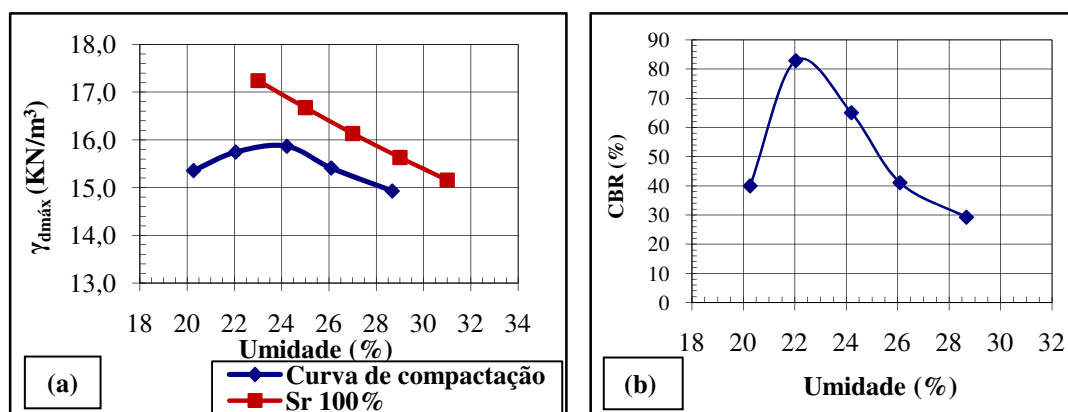


Figura 6.41 – Curvas da Mistura 9: (a) compactação e saturação; (b) CBR

6.3.6 Compressão simples

O ensaio de compressão simples foi realizado com as amostras de solo, fosfogesso e com as misturas de solo e fosfogesso e solo-cal que apresentaram melhor desempenho em termos de CBR (Misturas 2 e 6, respectivamente). A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos para estas amostras.

Observa-se que com a adição de fosfogesso no solo ocorreu uma diminuição na resistência (Figura 6.42). Já a mistura solo-cal sem cura apresentou aumento na resistência, sendo próximo do valor obtido para o solo (Figura 6.42). Ressalta-se que para avaliar melhor o processo de estabilização química de solos deve-se variar o tempo de cura, o que não foi objetivo principal deste trabalho.

Tabela 6.9 – Resultados do ensaio de resistência a compressão simples

Amostras	Resistência a compressão simples (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)
Solo	430	215
Fosfogesso	0,00	0,00
Mistura 2	210	105
Mistura 6	460	230

Na Figura 6.42 verifica-se que na curva da Mistura 6 não foi possível obter relação tensão-deformação após a ruptura, pelo fato da prensa utilizada estar programada para interromper o ensaio quando a tensão máxima é atingida. No laboratório de solos da UFG existe uma segunda prensa que não apresenta esta limitação. No entanto, não foi possível executar o ensaio com a Mistura 6 nesta prensa em virtude de sua capacidade máxima ser de 450 kPa. Por isso na execução do ensaio com a Mistura 6 foi obtida apenas a tensão máxima, não sendo possível obter os valores de tensão após a sua ruptura em virtude dessas limitações dos equipamentos disponíveis.

Oliveira (2005) estudou misturas de fosfogesso e vários teores de cal (3%, 5%, 7% e 10%), concluindo que ocorre ganho na resistência à medida que aumenta-se o teor de cal. Porém, quando o ensaio é realizado com cura, a resistência eleva-se ainda mais. Este resultado indica que é necessário realizar ensaios das amostras de solo-fosfogesso e solo-cal variando o tempo de cura para verificar se ocorre interferência na resistência desses materiais.

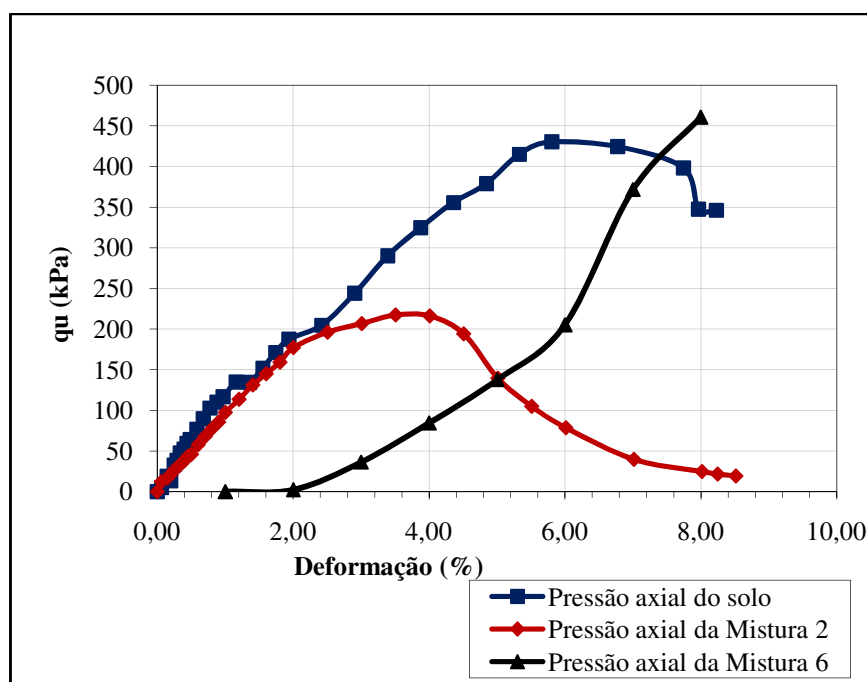


Figura 6.42 – Gráfico de resistência à compressão simples das amostras

A Figura 6.43 apresenta os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de resistência a compressão simples.

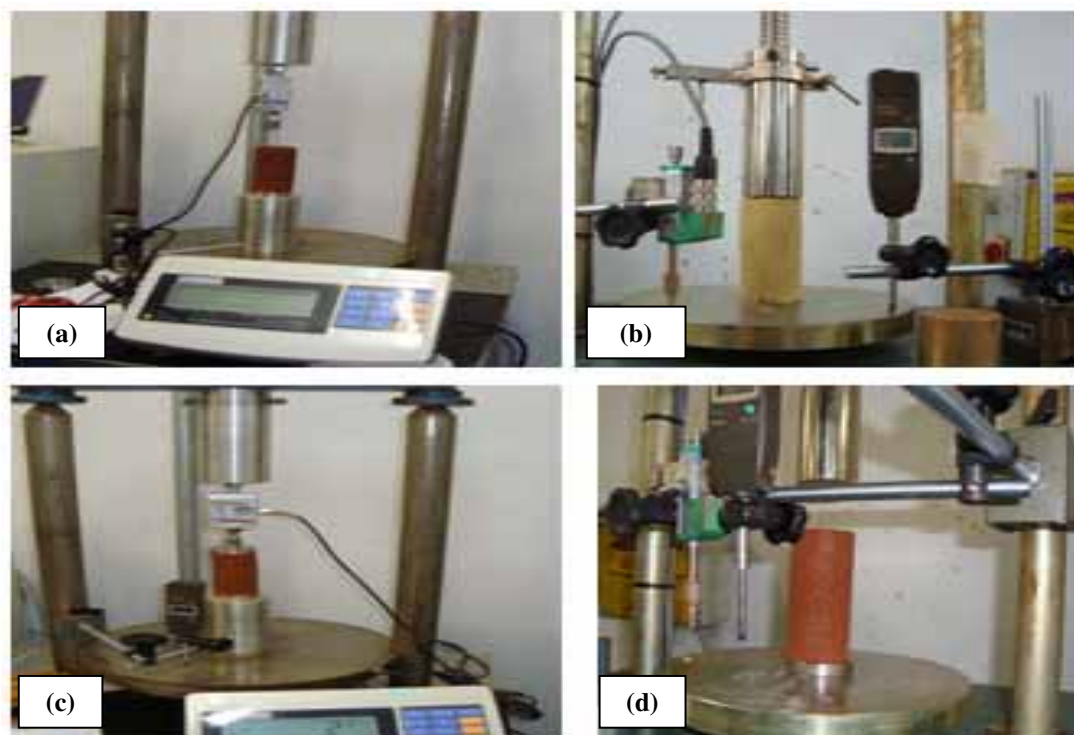


Figura 6.43 – Corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência a compressão simples: (a) solo tropical; (b) fosfogesso; (c) Mistura 2; (d) Mistura 6

6.3.7 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado com as amostras compactadas de solo, fosfogesso e com as misturas de solo-fosfogesso e solo-cal que apresentaram o melhor desempenho em termos de CBR, Misturas 2 e 6, respectivamente. A Tabela 6.9 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos.

Tabela 6.10 – Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade

Amostras	K (cm/s)
Solo de Catalão-GO	$1,05 \times 10^{-7}$
Fosfogesso	$2,40 \times 10^{-4}$
Mistura 2	$1,89 \times 10^{-5}$
Mistura 6	$3,17 \times 10^{-6}$

Obs.: K = coeficiente de permeabilidade

Verifica-se que as amostras de solo e as misturas apresentaram coeficiente de permeabilidade muito baixos de acordo com os valores encontrados na literatura (VARGAS, 1977), favorecendo a utilização em pavimentação. O fosfogesso puro apresenta um coeficiente de permeabilidade baixo, porém não poderia ser utilizado numa obra de pavimentação, como verificado nos ensaios de compactação e CBR realizados por Mesquita (2007) pois não apresenta capacidade de suporte e sua resistência a compressão simples, realizada nesta pesquisa, foi nula.

6.4 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Para verificar se existe risco de contaminação por metais pesados do solo e do lençol freático situados abaixo de uma possível estrutura de pavimento com misturas contendo fosfogesso, foi realizado uma análise preliminar de metais pesados no solo, fosfogesso, Mistura 2 e Mistura 6 e na água coletada durante a execução do ensaio de permeabilidade destas amostras. Também foi realizada a análise da água utilizada no ensaio de permeabilidade dessas amostras, fornecida pela empresa de saneamento do estado. As Tabelas 6.11 e 6.12 apresentam os resultados da análise de metais pesados obtidos para o solo, para as misturas e nas amostras de água, respectivamente.

Tabela 6.11 – Resultado da análise de metais pesados encontrados nas amostras

Metais pesadas (mg/L)	Amostras			
	Solo de Catalão-GO	Fosfogesso	Mistura 2	Mistura 6
Cádmio	0,01	0,02	0,02	0,01
Cromo	5,20	0,02	5,10	5,60
Níquel	0,05	0,01	0,03	0,01
Chumbo	0,07	0,01	0,09	0,06

Tabela 6.12 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras de água coletadas

Metais pesadas (mg/L)	Amostras				
	Solo de Catalão-GO	Fosfogesso	Mistura 2	Mistura 6	Água de abastecimento
Argônio	< 0,01	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Bário	< 0,10	0,10	0,10	< 0,10	< 0,10
Cádmio	0,009	0,009	0,012	< 0,005	< 0,005
Cobre	0,018	0,018	0,060	0,120	< 0,010
Chumbo	0,130	0,130	0,170	0,033	< 0,010
Zinco	0,073	0,073	0,071	< 0,010	< 0,010
Arsênio	0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010

Os resultados obtidos na análise de metais pesados das amostras de solo e das misturas selecionadas encontram-se em quantidades inferiores ao permitido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Portanto, esses materiais não apresentam risco de contaminação. Vale ressaltar que esta análise foi preliminar, sendo necessário um estudo mais aprofundado para uma melhor avaliação deste parâmetro.

De acordo com a resolução 396 (CONAMA, 2008) os metais pesados encontrados na água coletada nas misturas estão dentro do limite permitido, com exceção do chumbo cujo valor máximo permitido é de 0,01 mg/L no caso de consumo humano. Porém, esta única análise não seria suficiente para afirmar se há possibilidade de contaminação, sendo necessário a realização de outras coletas para análise desses parâmetros.

Portanto, no caso de construção de camadas de pavimentos com misturas contendo fosfogesso é necessário adotar medidas preventivas para evitar qualquer risco de contaminação do solo e do lençol freático. Dessa forma, sugere-se que sejam construídos trechos experimentais de pavimentos onde seja realizada a imprimação do subleito para evitar a percolação de água e o monitoramento da qualidade tanto da água que infiltra na estrutura do pavimento (água de chuva) como da água subterrânea.

6.5 COMPARAÇÃO ENTRE MISTURAS DE SOLO-CAL REALIZADAS COM SOLOS DA REGIÃO

Prudente (2005) e Rezende (2003) estudaram misturas de solo-cal utilizando solos de Goiânia-GO e Brasília-DF, respectivamente. Como nesta pesquisa também foram realizados ensaios com misturas do solo de Catalão-GO com cal, torna-se interessante executar uma análise comparativa desse processo de estabilização para solos da região.

Para o desenvolvimento dessa análise foram utilizados resultados de ensaios laboratoriais realizados com os solos naturais e estabilizados, em peso, com diferentes proporções de cal. Assim, tem-se a seguinte nomenclatura para as amostras avaliadas:

- Solo A: solo de Goiânia-GO estudado por Prudente (2005);
- Solo A + 3%: solo A misturado com 3% de cal;
- Solo A + 6%: solo A misturado com 6% de cal;
- Solo A + 9%: solo A misturado com 9% de cal;

- Solo B: solo de Brasília-DF estudado por Rezende (2003);
- Solo B + 2%: solo B misturado com 2% de cal;
- Solo C: solo de Brasília-DF estudado por Rezende (2003);
- Solo C + 3%: solo C misturado com 3% de cal;
- Solo C + 6%: solo C misturado com 6% de cal;
- Solo D: solo de Catalão-GO estudado nesta pesquisa;
- Solo D + 3%: solo D misturado com 3% de cal;
- Solo D + 6%: solo D misturado com 6% de cal;
- Solo D + 9%: solo D misturado com 9% de cal.

Na Tabela 6.13 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados.

Tabela 6.13 – Resultados dos ensaios de caracterização

Amostras	Propriedades							Classificação		
	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	P (%)	S (%)	M+C (%)	ρ (g/cm ³)	TRB	SUCS	MCT
Solo A	48	27	21	0,9	45,4	53,7	2,83	A-7-6	CL	LG'
Solo A + 3%	38	24	14	0,7	48,3	51,0	2,80	A-6	CL	-
Solo A + 6%	39	25	14	1,0	54,0	45,0	2,86	A-6	CL	-
Solo A + 9%	45	25	20	0,1	46,6	53,3	2,82	A-7-6	CL	-
Solo B	45	39	19	0,6	3,1	96,3	2,78	A-7-5	MH	LG'
Solo B + 2%	52	37	15	0,3	10,1	89,6	-	A-7-5	MH	-
Solo C	52	41	11	0,2	1,9	97,7	2,76	A-7-5	MH	LG'
Solo C + 3%	52	38	14	0,2	8,2	91,6	-	A-7-5	MH	-
Solo C + 6%	54	41	13	0,2	6,8	92,9	-	A-7-5	MH	-
Solo D	54,00	33,00	21,00	0,29	22,15	77,52	2,96	MH	A7-5	LG'
Solo D + 3%	42,00	31,20	10,80	0,22	42,12	57,67	2,93	ML	A7-5	---
Solo D + 6%	41,40	33,30	8,10	0,21	47,52	52,28	2,95	ML	A-5	---
Solo D + 9%	44,50	34,00	10,50	0,21	43,42	56,20	2,97	ML	A7-5	---

Obs.: P = pedregulho; S = areia; M + C = silte + argila; ρ = massa específica dos grãos; w_L = limite de liquidez; w_p = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade

Mesmo o solo A apresentando maior quantidade de areia e menor quantidade de finos que os solos B e C, ao acrescentar cal, a porcentagem da fração areia aumentou, indicando a aglomeração dos finos devido à presença de cal.

Comparando os resultados de Prudente (2005) e Rezende (2003) com os apresentados nesta pesquisa, verifica-se que o solo de Catalão-GO se difere granulometricamente do solo de Goiânia-GO e dos solos de Brasília-DF por conter maior quantidade de silte do que de argila e menor quantidade de areia, conforme confirmado pelas classificações tradicionais.

Em termos de massa específica, a incorporação de cal gerou redução pouco significativa neste parâmetro para o solo A, o mesmo ocorrendo com o solo desta pesquisa.

Com relação à plasticidade, a presença de cal causou redução no seu valor para todos os solos. No entanto, esta redução foi mais significativa nos solos B e C. Com o solo de Catalão-GO também foi verificado mudanças significativas na plasticidade com a adição de cal.

A adição de cal não provocou mudanças na classificação dos solos, tanto para a o Sistema Unificado quanto para a classificação TRB. Para o solo de Catalão-GO, estudado nesta pesquisa, a adição de cal provocou mudança na classificação de acordo com o Sistema Unificado, passando de silte de alta compressibilidade (MH) para silte de baixa compressibilidade (ML). Na classificação TRB, o solo D, solo D+3% e solo D+9% tiveram classificações coincidentes (solos argilosos). O solo D+6% foi classificado como solo siltoso.

A Tabela 6.14 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de compactação, expansão e CBR realizados com as amostras compactadas na energia intermediária.

Com relação ao peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), observou-se que o solo A apresentou valor superior aos demais devido à presença de maior quantidade de areia na sua composição.

Com a adição de cal, percebeu-se a redução de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ para todos os solos analisados, sendo que quanto maior é a quantidade de cal, menor é o valor $\gamma_{dm\acute{a}x}$.

Quanto à umidade ótima (w_{ot}), teve-se que o solo A apresentou o menor valor quando comparado com os demais. Ao incorporar cal nesses solos, verificou-se aumento nos valores de w_{ot} . Quando compactados, os solos C e D apresentaram menor peso específico aparente seco máximo e maior umidade ótima.

A Figura 6.45 apresenta as curvas de compactação dos solos e das misturas solo-cal comparados.

Tabela 6.14- Resultados de compactação, expansão e CBR para os materiais compactados na energia Proctor Intermediário

Amostras	Propriedades			
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w _{ot} (%)	Expansão (%)	CBR (%)
Solo A	17,5	18,6	0,00	16
Solo A +3%	16,8	20,8	0,00	31
Solo A +6%	16,2	21,7	0,00	37
Solo A + 9%	15,7	23,8	0,02	43
Solo B	16,5	22,9	0,06	23
Solo B + 2%	16,2	23,2	0,06	90
Solo C	14,6	28,2	0,01	18
Solo C + 3%	14,5	29,0	0,01	29
Solo C +6%	14,3	29,2	0,01	60
Solo D	15,7	28,0	0,00	14
Solo D + 3%	15,4	28,0	0,00	20
Solo D + 6%	15,3	27,5	-0,09	52
Solo D + 9%	15,0	28,0	0,04	70

Obs.: $\gamma_{dm\acute{a}x}$ = peso específico aparente seco máximo; w_{ot} = umidade ótima

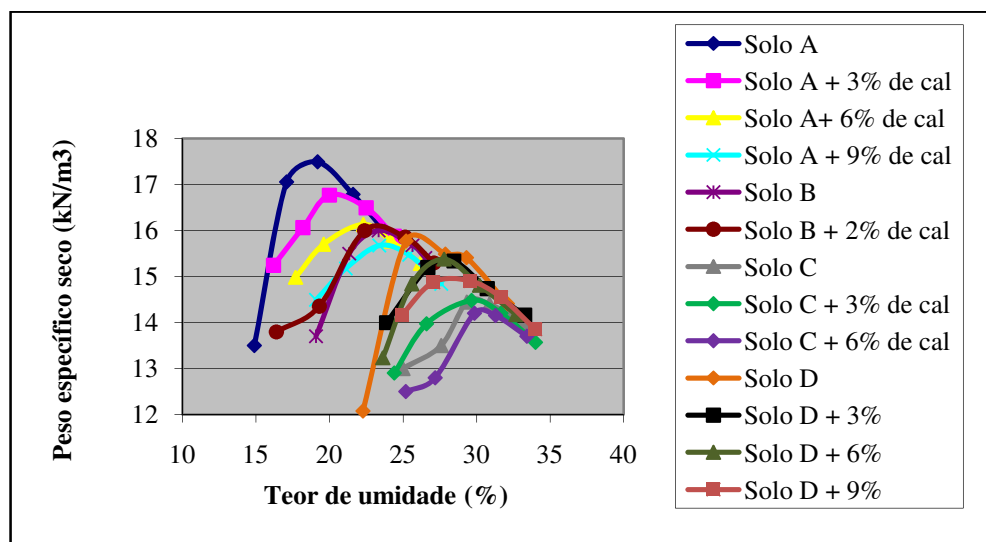


Figura 6.44 – Curvas de compactação

Avaliando a resistência dos solos compactados, não foi constatado o mesmo comportamento para todos os materiais. Os solos A+3%, solo A+6%, solo A+9%, solo B, solo C+3%, solo D+3% e solo D+6% podem ser usados como sub-base. Já os solos B+2%, C+6% e D+9% apresentaram resistência suficiente para serem usados como base, sendo o primeiro para vias de tráfego elevado (CBR \geq 80%) e os demais para vias de tráfego leve (CBR \geq

60%). No caso de vias urbanas, os solos A+9%, solo B+2%, solo C+6% e solo D+6% também poderiam ser aplicados na camada de base (CBR \geq 40%) (Figura 6.47). No solo de Catalão-GO, o ganho na capacidade de suporte inicial foi bem maior com a estabilização química realizada quando comparado com os solos de Goiânia-GO e Brasília-DF. Este resultado coincide com a constatação realizada por meio dos ensaios de caracterização, onde nas misturas de cal com o solo de Catalão-GO ocorreu maior agregação. A Figura 6.45 apresenta as curvas de CBR das amostras.

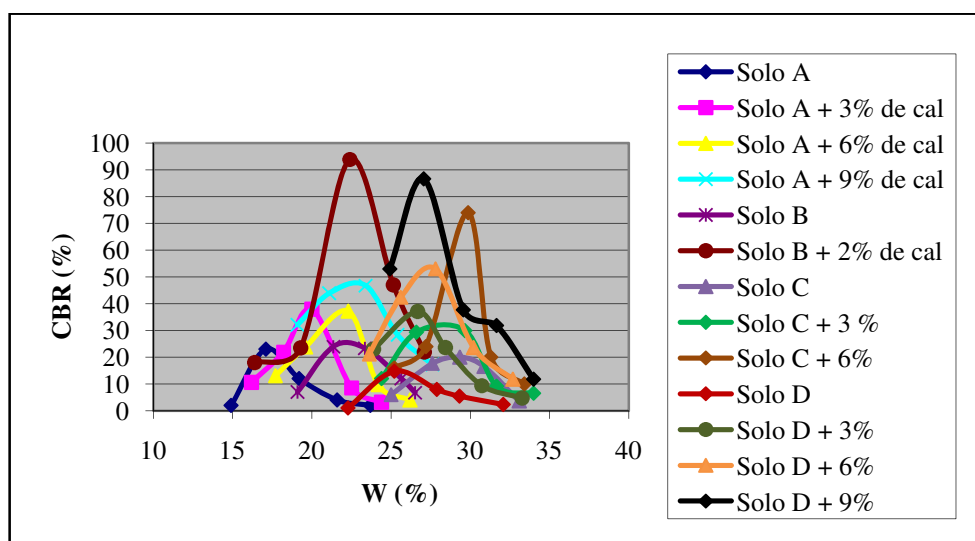


Figura 6.45 – Curvas de CBR

Rezende (2003) realizou análise de raios-X do solo B e da mistura deste solo com 2% de cal. Para o solo foi observado a existência dos seguintes minerais: quartzo, caulinita, gibsitita, hematita e ilita. Com a incorporação de 2% de cal, os minerais encontrados na mistura foram praticamente os mesmos, sendo que também aparecem pequenos picos de calcita. Tem-se, então, a verificação da presença da cal, já que a difratometria da mesma revela a presença de calcita e portlandita. Comparando os dois tipos de amostras analisadas, tem-se que, ao contrário do observado para o solo fino, as intensidades dos picos são um pouco maiores para a amostra passando na peneira n^o 200. Este comportamento pode indicar dois aspectos: no primeiro, a destruição dos agregados pela cal geraria um aumento no teor de argilominerais na fração fina; no segundo, o consumo dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nas reações com a cal estaria propiciando um aumento relativo dos demais argilominerais.

Para o solo C, Rezende (2003) observou que no solo fino estão presentes os seguintes minerais: quartzo, caulinita, gibsitita e hematita. Na amostra total, os picos de caulinita e gibsitita têm intensidade semelhante, enquanto que para a amostra passando na

peneira n° 200, o pico da caulinita é um pouco maior. A incorporação de 3% de cal ao solo C gera redução na intensidade dos picos observados. Os traços de illita desaparecem e observa-se a presença de calcita. O pico de quartzo é melhor definido na amostra total e o pico da calcita já aparece de uma forma mais clara na amostra mais fina. Com a incorporação de 6% de cal, além dos minerais já observados, verifica-se a existência de traços de rutilo e anatásio.

Comparando o solo B e C com o solo de Catalão-GO (solo D), verifica-se que estes apresentam alguns minerais em comum como gibsita, caulinita e hematita. O solo de Catalão-GO também apresenta minerais diferenciados como rutilo, pirocloro, anatásio e florencita, devido à sua origem. Contudo, verifica-se que com a adição de 6% de cal ao solo C tem-se também a ocorrência de traços de rutilo e anatásio.

A Tabela 6.15 apresenta os resultados das análises químicas dos solos estudados.

Tabela 6.15 – Resultado das análises químicas

Parâmetros	Solo A	Solo A +3%	Solo A +6%	Solo A +9%	Solo B	Solo B +2%	Solo C	Solo C +3%	Solo C +6%	Solo D	Solo D +9%
pH em água	9,3	11,9	12,5	12,6	5,1	6,8	5,2	9,20	10,9	6,8	12,4
pH em KCL	8,8	11,4	12,3	12,5	4,2	8,3	5,0	9,00	10,7	6,5	12,3
Δ pH (KCL - água)	-0,4	-0,5	-0,2	-0,03	-0,9	1,5	-0,20	0,20	-0,2	-0,3	-0,1
Ca + Mg (mE/ 100ml)	2,5	20,7	40,7	45,7	2,2	3,4	0,6	7,9	9,9	0,4	29,9
Ca (mE/ 100ml)	2,0	20,5	40,5	45,5	1,8	3,2	0,4	6,8	8,7	0,3	29,0
Mg (mE/ 100ml)	0,5	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	1,1	1,2	0,1	0,0
K (mE/ 100ml)	0,06	0,08	0,06	0,06	0,1	0,1	0,03	0,05	0,4	0,04	0,12
Al (mE/ 100ml)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
H + Al (mE/ 100ml)	0,9	0,7	0,5	0,8	5	1,1	4,6	1,1	1,1	1,2	0,0
CTC (mE/ 100ml)	3,4	21,4	41,2	46,5	7,3	4,9	5,3	9,07	11,8	1,6	---
Saturação de Al (%Al)	0	0	0	0	30	0	12	0	0	0	0
Saturação de Bases (%V)	74,0	96,7	98,7	98,2	32,0	78,0	14,0	88,0 0	91,0	27,8	100
Matéria Orgânica (g/kg)	7,0	7,0	7,0	7,0	5,2	5,2	5	2	2	6,0	2,0
Fósforo (mg/dm ³)	1,2	0,8	1,5	1,8	1,0	1,0	8,6	3,4	3,4	1,5	2,1

Verifica-se que o solo A é um material básico tanto em água quanto em KCl (pH > 7). O valor de Δ pH foi negativo, indicando a predominância de argilas silicatadas no solo.

Na saturação de base (V) observou-se valor elevado (próximo a 80%), característico de um solo não tão intemperizado quando comparado com os Solos B, C e D. Mesmo com a saturação de base elevada, o solo ainda apresentou outras características de solo laterítico como detectado na Classificação MCT. Com a adição de cal (3%, 6% e 9%), ocorreu aumento no pH e saturação de base, que pode ser justificado pela presença do cálcio da cal.

A CTC do solo A é considerada baixa (< 4,62 mE/100ml). No entanto, com a adição de cal, os valores da CTC aumentaram atingindo níveis elevados (> 11,30 mE/100 ml). Esta alteração é responsável pela redução na plasticidade do solo e no aumento da fração areia devido à floculação e aglomeração das partículas. Este fato também foi observado para os solos C e D.

Para o solo B observou-se que o pH é ácido tanto em água quanto em KCl (pH < 7,0). O valor de ΔpH foi negativo, indicando a predominância de argilas silicatadas no solo. O valor encontrado para o alumínio trocável (Al) foi maior que 0,60 mE/100ml e considerado alto. Além disso, o solo apresentou uma CTC média e valor de saturação de alumínio semelhante ao de saturação de bases. Observou-se também que o valor obtido para a saturação de bases (V) está situado entre 25 e 50%, sendo classificado como baixo. Isso indica que o solo foi intemperizado. A incorporação de 2% de cal hidratada gerou aumento no valor do pH em água que se aproximou da situação neutra (pH = 7,0). Para o pH em KCl a mistura foi considerada alcalina. A diferença ΔpH (KCl – água) foi positiva, indicando a predominância de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Verificou-se, ainda, o aumento na quantidade de bases trocáveis (S), principalmente em Ca, diminuição na quantidade de hidrogênio e alumínio livre para reagir (Al tornou-se nulo), redução na CTC e aumento significativo na saturação de bases que atingiu valor próximo a 80%.

Observou-se que o solo C tem pH ácido tanto em água quanto em KCl. A diferença entre eles (ΔpH) foi pequena e negativa, indicando a ligeira predominância de argilas silicatadas. O valor determinado para o alumínio trocável foi inferior a 0,30 mE/100ml e considerado baixo, ao contrário do que ocorreu no solo B. O solo apresentou, ainda, CTC média e valores de acidez total superiores à soma das bases trocáveis (S). O pequeno valor da saturação de bases (menor que 25%) indicou que este parâmetro foi muito baixo e que o solo foi intemperizado. A incorporação de 3% e 6% de cal hidratada gerou aumento no valor do pH, atingindo a condição alcalina. A diferença entre os valores do pH em KCl e do pH em água manteve-se a mesma observada para o solo fino sem cal.

O solo D apresentou pH levemente ácido tanto em água quanto em KCl e com a adição de cal ocorreu aumento no pH como verificado nos outros solos. A diferença entre o

pH (KCl – água) foi negativa como observados nos solos A, C e suas misturas com cal. A CTC do solo D é baixa. Observa-se que o valor obtido para a saturação de bases do solo (V) está situado entre 25% e 50%, sendo classificado como baixo e indicando que o solo é intemperizado, conforme também verificado para os demais solos.

Nesse contexto, conclui-se que os solos possuem algumas características em comum, mas também apresentam diferenças significativas que irão interferir em seus processos de estabilização química. Misturas de solo-cal podem apresentar mudanças de comportamento marcantes em virtude das peculiaridades pertinentes a cada solo. Solos argilosos com cal aumentam o peso específico aparente seco máximo e diminuem a umidade ótima, porém, não melhoram o CBR quando comparados com solos siltosos com cal. Dentre as características que provavelmente irão influenciar de forma mais intensa nesse processo pode-se destacar a CTC e a presença de alumínio livre para reagir.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

O fosfogesso, por ser um subproduto que necessita da disponibilidade de grandes áreas para ser estocado, tornou-se objeto de estudos, uma vez que sua disposição eleva os custos da empresa geradora e pode, ainda, acarretar numa série de problemas ambientais. Neste contexto, tem surgido o interesse de estudar a aplicação do fosfogesso em obras de pavimentação, podendo refletir num impacto positivo no meio ambiente, além de executar pavimentos de baixo custo com desempenho satisfatório.

O fosfogesso selecionado para esta pesquisa é produzido por uma empresa localizada no estado de Goiás. Por meio de uma visita técnica realizada no local, foi observado o processo de exploração da rocha fosfática, o beneficiamento, o processo químico, e a disposição final do fosfogesso. Pôde-se, então, constatar a necessidade de realizar estudos que possam detectar o potencial de utilização desse resíduo, sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa pôde-se verificar resumidamente que:

- Analisando-se as curvas granulométricas, observa-se que o fosfogesso pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75% de suas partículas passante na peneira nº 200. O solo de Catalão-GO apresentou variação nos resultados, sendo que com defloculante tem-se maior quantidade de argila. Já sem defloculante observa-se que não existem partículas de argila e que houve um aumento nas porcentagens de silte e areia quando comparada com a amostra com defloculante, confirmando o comportamento característico de solos tropicais observado na literatura;
- As misturas solo-fosfogesso, denominadas Misturas 1, 2 e 3 (10% fosfogesso + 90% solo, 20% fosfogesso + 80% solo e 30% fosfogesso + 70%, respectivamente) apresentaram partículas maiores que o solo (maior quantidade de silte do que argila, sendo que o maior ganho foi na fração silte). Este fato indica que pode estar havendo algum tipo de reação

entre o solo e o fosfogesso que impedem que as ligações das partículas sejam desfeitas mesmo na presença do defloculante;

- O solo de Catalão-GO quando misturado com fosfogesso e cal, apresentou granulometria diferente, em função do tipo de cal. Com a cal calcítica (Mistura 7) ocorreu aumento na porcentagem de areia com o uso do defloculante. Com a cal dolomítica (Mistura 8), as curvas com e sem defloculante ficaram semelhantes.
- O solo de Goiânia-GO estudado no trabalho de Mesquita (2007) e utilizado na composição da Mistura 9 (solo, fosfogesso e cal calcítica) apresentou diferença no comportamento quando comparada com mistura semelhante realizada com o solo de Catalão-GO (Mistura 7). Enquanto na Mistura 7 observa-se aumento no teor de areia com o uso do defloculante (fato constatado também nas Misturas 1, 2 e 3), na Mistura 9 ocorre o contrário.
- Com relação à massa específica dos grãos, verifica-se que o solo apresentou um valor comumente encontrado nos solos da região. As misturas solo-fosfogesso apresentaram um aumento considerável da massa específica dos grãos com a adição de fosfogesso nas misturas. A incorporação de cal ao solo (Misturas 4, 5 e 6) causa pouca variação na massa específica dos grãos em relação ao valor encontrado para o solo tropical. Para as mistura de solo, fosfogesso e cal os valores de massa específica foram próximos;
- O fosfogesso apresentou-se como material não plástico. Verificou-se que a adição de fosfogesso ao solo gerou redução no limite de liquidez e no índice de plasticidade. No entanto, observa-se que esta redução atingiu níveis maiores quando a cal foi utilizada. Com relação às Misturas 7 e 8 (81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal calcítica CHIII; 81,9% solo Catalão-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal dolomítica), verificou-se que o resultado dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade atingiram valores elevados. Isto indica que ocorrem reações químicas entre os materiais utilizados, que tornam as misturas mais plásticas. Esta constatação inviabiliza a utilização dessas misturas em pavimentação. Já a Mistura 9 (81,9% solo Goiânia-GO + 9,1% fosfogesso + 9% cal CHI) apresentou valores de limites de consistência menores, na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para as misturas solo-fosfogesso (Misturas 1, 2 e 3) e solo-cal (Misturas 4, 5 e 6). Isto indica que o solo utilizado nas amostras estudadas pode ser determinante no comportamento das misturas;
- Os ensaios da Metodologia MCT foram realizados apenas com o solo de Catalão-GO, sendo este classificado como argiloso de comportamento laterítico. Esta classificação explica o comportamento nos ensaios de caracterização. Este é um solo tropical característico da região, sendo encontrado em abundância;

- O fosfogesso foi classificado pelo SUCS como uma areia fina siltosa (ML) e no sistema TRB como solo siltoso (A-4). O solo estudado foi classificado como um silte de alta compressibilidade (MH) no sistema SUCS, já no sistema TRB, corresponde a um solo argiloso do tipo A7-5. Para as Misturas 1, 2, 3, 4 e 6 obteve-se a mesma classificação para os dois sistemas, sendo classificados no sistema SUCS como silte de baixa compressibilidade (ML) e no sistema TRB como solos argilosos (A7-5). A Mistura 5 foi classificada como silte de baixa compressibilidade (ML) no sistema SUCS e solo siltoso (A-5) no sistema TRB. As Misturas 7 e 8 obtiveram a mesma classificação no sistema SUCS e TRB, sendo silte de alta compressibilidade (MH) e solo argiloso (A7-5), respectivamente. A Mistura 9 foi classificada como silte de baixa compressibilidade no sistema SUCS e solo argiloso no sistema TRB.
- As análises químicas mostraram que a CTC das misturas é bastante elevada, indicando que estes materiais são bastante reativos sendo que essa característica é determinante no comportamento dos materiais estudados;
- A difração de raios-X mostrou que o solo de Catalão apresenta em sua composição minerais provenientes da rocha fosfática. Nas misturas compactadas contendo solo, fosfogesso e cal foi observada a formação do mineral etringita, responsável pela elevada plasticidade e expansão dessas amostras e inviabilizando sua utilização em camadas de pavimentos. Foi possível constatar que a formação da etringita ocorre logo após a adição de água nas misturas solo-fosfogesso-cal;

Nas amostras compactadas na energia intermediária foi verificado que:

- Para o solo de Catalão-GO foram obtidos valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo encontrados freqüentemente para solos argilosos. Em termos de CBR, o valor determinado foi inferior a 20%. Portanto, o solo poderia ser utilizado no máximo como reforço de subleito ou na construção de aterros em geral;
- Nas misturas de solo-fosfogesso verificou-se que com os teores de 10% e 20% houve ganho de resistência do solo, sendo possível a utilização das Misturas 1 e 2 em sub-base de pavimentos. No entanto, misturas com teores superiores a 20% não são recomendadas por haver um decréscimo de resistência;
- Para as misturas de solo-cal (Misturas 4, 5 e 6) foi constatado que CBR aumentou com a adição de cal, sendo que para teor de cal superior a 6% o ganho no valor de CBR foi maior. Portanto, as Misturas 4 e 5 apresentaram potencial de aplicação na confecção de camadas de sub-base de pavimentos, pois apresentam CBR acima de 20%. Já a Mistura 6 apresentou

possibilidade de aplicação em bases de pavimento para vias de baixo volume de tráfego, por apresentar CBR superior a 60%;

- As misturas compostas com o solo de Catalão-GO coletado na mina de exploração da rocha fosfática, com o fosfogesso e a cal não apresentam resistência para serem utilizados em camadas de pavimentos. A ocorrência de reações químicas entre os três materiais provocaram o surgimento do mineral etringita, causando aumento de plasticidade e elevados valores de expansão. No entanto, verifica-se que esta reação pode não ocorrer se houver mudança de solo utilizado na mistura;
- O ensaio de resistência à compressão simples mostrou que ocorre um ganho no valor da resistência do solo quando a cal é utilizada e decréscimo quando o fosfogesso é utilizado;
- Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para as amostras selecionadas (solo de Catalão-GO, fosfogesso, Mistura 2 e Mistura 6) são favoráveis a utilização em pavimentação;
- As análises de metais pesados realizados nas amostras selecionadas e na água que percola nos corpos-de-prova compactados revelaram que não existe risco de contaminação do solo e do lençol freático situados abaixo de uma possível estrutura de pavimento com misturas contendo fosfogesso. Porém, esta análise foi preliminar sendo necessário um estudo mais aprofundado para uma melhor avaliar melhor este parâmetro.

Sendo assim, considerando os resultados obtidos nesta pesquisa são referentes ao fosfogesso gerado pelo processo dihidratado produzido no município de Catalão-GO, pode-se concluir que:

- A estabilização química de um solo tropical encontrado na região com o fosfogesso ou com a cal hidratada apresenta potencial de aplicação principalmente em sub-bases de pavimentos flexíveis. No caso do fosfogesso, resíduo estudado nesta pesquisa, recomenda-se a utilização de até 20% no processo de estabilização;
- Na tentativa de obter melhor desempenho mecânico e expandir o potencial de aplicação do fosfogesso para a camada de bases de pavimentos, estudou-se a incorporação de cal na mistura solo-fosfogesso. No entanto, os resultados obtidos não foram promissores como os encontrados por Faria (2006) e Mesquita (2007), sendo que a formação do mineral etringita inviabiliza a utilização dessa mistura. Mesmo assim, é importante ressaltar que dependendo do tipo de solo utilizado, esta situação pode mudar;
- Em princípio, o risco de ocorrer contaminação do subsolo ou do lençol freático caso misturas de solo-fosfogesso sejam utilizadas em obras é mínimo. No entanto, sempre que for

utilizar um resíduo em obras de pavimentação, torna-se importante adotar medidas preventivas e realizar monitoramentos.

7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, têm-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Verificar se outros solos existentes no município de Catalão-GO a mistura solo-fosfogesso-cal apresenta viabilidade mecânica de utilização;
- Incorporar outros tipos de estabilizantes químicos (por exemplo, cimento) nas misturas e estudar sua possibilidade de utilização;
- Realizar ensaios acrescentando cimento nas misturas;
- Investigar o comportamento de misturas de fosfogesso e solo tropical ao longo do tempo, variando o tempo de cura;
- Realizar ensaios com triaxial dinâmico para determinar o comportamento resiliente das misturas;
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização de misturas contendo fosfogesso para verificar a classificação destas de acordo com a NRB 10004;
- Realizar análises de radionuclídeos das misturas com fosfogesso para verificar se existe risco de contaminação por elementos radioativos;
- Construir trechos experimentais para avaliar o comportamento estrutural durante a construção e ao longo do tempo;
- Realizar o monitoramento da qualidade da água subterrânea no caso da construção de trechos experimentais;
- Analisar os custos envolvidos, incluindo os ganhos ambientais, na construção de pavimentos compostos de materiais de misturas com fosfogesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W. E. L. **Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. **Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459. **Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. **Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. **Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895. **Solo - Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. **Solo - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770. **Solo - Resistência a Compressão Simples.** Rio de Janeiro, 1983a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545. **Solo - Permeabilidade.** Rio de Janeiro, 1983b.

BERNUCCI, L. B.; MOTA, M. L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais - intemperismo biológico, pedogênese, laterização, bauxitização, e concentração de bens minerais.** UFSC ed. Florianópolis, SC, 1996.

BRANDÃO, P. F. P. **Mercado de rochas calcárias e fosfáticas para nutrição animal.** Dissertação de Mestrado. Instituto de geociências. Universidade de Campinas, SP, 2002. Disponível em <http://www.unicamp.br/unicamp>. Acesso em: 23 abr. 2009.

BRASIL, **Constituição Federal**. Ministério da Agricultura. Decreto nº 86.955, 18 de fevereiro de 1982.

CARDOSO, F. B. F. **Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2002.

CARVALHO, I. G. **Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos**. Bureau gráfica e ed Ltda, Salvador, BA, 1995.

CANUT, M. M. C.; **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2006. Disponível em: <<http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 13 nov. 2008.

CASTILHO JR., A. B.; ROMAN, H. R.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M.; MACCARINI, M.; GLEIZE, P.; LAMBERTS, R.; SORES, S. R. **Valorização do fosfogesso na construção civil**. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Centro Tecnológico-CTC, Núcleo de Pesquisas em Construção-NPC & Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos-LARESCO. 1998.

CEKINSKI, E.; CALMANOVICI, C. E.; BICHARA, J. M.; FABIANI, M.; GIULIETTI, M.; CASTR, M. L. M. M.; SILVEIRA, P. B. M.; PRESSINOTTI, Q. S. H. C.; GUARDANI, R. **Tecnologia de produção de fertilizantes**. Instituto de Pesquisa Tecnológicas-IPT. São Paulo, SP, 1990.

CHANG, W. F.; CHING, D. A.; HO, R. **Phosphogypsum for secondary road construction**. University of Miami. Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, 1989.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 21 dez. 2008.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 04 abr. 2009.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 03 de abril de 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 04 abr. 2009.

DIGIRMENCIA, N; OKUCUB, A. TURABIB, A. Application of phosphogypsum in soil stabilization. Civil engineer and architecture department, Balikesir University, Balikesir, Turkey, 2005. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v59pdf>> Acesso em: 27 mai. 2009.

DNER. ME 131 – **Solos – determinação do módulo de resiliência**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNER. ME 258 – **Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 1994a, 14p.

DNER. ME 256 – **Determinação da perda de massa por imersão em água**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 1994b, 6p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. Ministério da Agricultura e do Abastecimento 2.ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

FARIA, L. F. **Ensaio Laboratoriais com mistura de solo, fosfogesso e cal**. Projeto de Iniciação Científica UFG. 2007.

FERREIRA, C. J. **Estabilização de solos com cal – uso da metodologia MCT**. Projeto Final. Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2006. 162p.

FERNANDES, H. M.; RIO, M. A. P.; FRANKLIN, M. R. **Impactos da indústria do fosfato**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCT, 2004.

GERRITY, D. M.; METCALF, J. B.; SEALS, R. K. **Estimating the design life of a prototype cement-stabilized phosphogypsum pavement**. Transportation Research Record, n. 1440, 1994. 32-36p.

GUIMARÃES, E. M. **Minicurso ministrado no XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**. Departamento de mineralogia e petrologia, Universidade de Brasília – UNB. Brasília, DF, 1999.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal, fundamentos e aplicações na engenharia civil**. Pini ed. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

JACOMINO, V. M. F. **Fosfogesso**. Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2003.17 p. Relatório Técnico Científico por Missão. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 22 fev. 2006.

KOBAYASHI, A. R. K. **Avaliação da influência do tipo de cimento na expansibilidade de misturas de fosfogesso e cimento para uso em construção rodoviária**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em:< <http://www.eesc.usp.br/stt>>. Acesso em: 20 fev. 2008.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R. **O fósforo na agricultura brasileira: uma abordagem minero-metalúrgica**. Centro de tecnologia mineral. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

LUZ, M. P. **Aproveitamento de pedreira da região metropolitana de Goiânia em pavimentos flexíveis urbanos – avaliação técnica e sócio-ambiental**. Tese de doutorado. Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2008.

LUZ, C. A.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.; AMBROISE, J.; PÊRA, J. **Formulação e aplicações de um cimento de baixo impacto ambiental (BIA) obtido com o osfogesso reciclado e com o clínquer sulfo-aluminoso**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - Núcleo de pesquisa em construção – Laboratório Valorização Resíduos e Materiais. Florianópolis, SC, 2005. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10599>>. Acesso em 15 mai. 2009.

MAZZILLI, B. P. **A radioatividade do fosfogesso**. In: DESAFIOS TECNOLÓGICOS PARA O REAPROVEITAMENTO DO FOSFOGESSO. Belo Horizonte: UFMG, 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 22 fev. 2008.

MESQUITA, G. M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2007.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. UFRJ ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica de pavimentos**. 2º Edição, Rio de Janeiro, RJ, 2005. 570p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. PINI ed. São Paulo, SP, 1994. 573p.

MEURER, J. E. **Fundamentos de química do solo**. 2º Ed. Porto Alegre, RS, 2004. 290p.

MOLINA, C. E. C. **Estudo do comportamento mecânico de mistura de papel e solo para utilização na construção rodoviária**. Belo Horizonte: UFMG, 2004. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 22 fev. 2008.

MOTTA, R.; LEITE, F. C.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E. **Agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil e seu uso em pavimentação**. In: I Geocentro 2009, Goiânia, GO. Anais eletrônicos do I Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região Centro-Oeste. [CD-ROM]. Goiânia, GO, 2009.

NUERNBERG, N.J.; RECH, T.D.; BASSO, C. **Uso do gesso agrícola**. BOLETIM TÉCNICO n. 122. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, SC. 2005. Disponível em:< <http://www.fosfogesso.eng.ufmg.br>>. Acesso em: 22 mar. 2008.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Vilibor, São Paulo, SP, 1995. 240p.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia

de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2005. Disponível em:< <http://www.poli.usp.br/Bibliotecas>>. Acesso em: 13 fev. 2008.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 247p.

PRUDENTE, J. P.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C. **Estabilização química de solos locais com cal hidratada**. 36^a Reunião Anual de Pavimentação – 36.^a RAPv, Curitiba/Pr - Brasil - 24 a 26 de agosto. 2005.

QUINTANILHA, F. S. **Avaliação de utilização e desempenho de resíduos de construção e demolição em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2008.

RAIJ, B. V. **Aspectos agrícolas e ambientais do uso de fosfogesso na agricultura**. Relatório de consultoria para Ultrafértil e Copebrás. Campinas, SP, 2003.

REZENDE, L. R. **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003. 372p.

ROSA, R. **Exposição potencial à radiação natural, no interior de residências, devido ao uso de fosfogesso na indústria da construção civil**. IBRAFOS - Instituto Brasileiro do Fosfato. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Centro de Ciências da Saúde. Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, 1997. 122p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Pini ed. São Paulo, SP, 1997.

SHREVE, R. N.; BRINK, J. A. JR. **Indústrias de processos químicos**. Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 232p.

SILVA, N. C. **Radionuclídeos naturais e elementos tóxicos em pilhas de fosfogesso no Brasil: caracterização e lixiviação**. Tese de Doutorado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. 119p.

SILVA, N. C.; CIPRIANI, M.; TADDEI, M. H. T. **Estudos da taxa de exalação de radônio, dos processos de lixiviação de metais pesados e radionuclídeos e das características físicas, químicas e radiométricas do fosfogesso da Ultrafértil e da Copebrás, visando a sua utilização na construção de aterros**. Comissão Nacional de Energia Nuclear, Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear. Poços de Caldas, MG, 2002.

SILVESTRE, O. B. **Fosfogesso estabilizado com cimento para aplicação na construção rodoviária – A influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade da mistura**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. 183p. Disponível em:< <http://www.eesc.usp.br/stt>>. Acesso em: 21 mar. 2008.

SILVESTRE, O. B., PARREIRA, A. B., KOBAYASHI, A. R. K. **Influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento.** ANPET, Rio de Janeiro - RJ. vol. 1. 2001.

TOMMASI, L. R. **Estudo de impacto ambiental.** São Paulo, CETESB, 1994. 354 p.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. **Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas.** São Paulo, 2000.

ZAPATA, F.; ROY R.N. **Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable.** BULLETIN FAO ENGRAIS ET NUTRITION VÉGÉTALE 13. Itália. 2004.
Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/>>. Acesso em: 23 jun. 2009

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** In: CASTILHO, A. B. (Coord.). Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Município de Pequeno Porte. Florianópolis: Rima Artes e Textos, 2003.

ZIGLIO, L. A. I. **A convenção da Basiléia e o destino dos resíduos industriais.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, SP, 2005. Disponível em:<<http://www.poli.usp.br/Bibliotecas>>. Acesso em: 13 fev. 2009.