

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO INICIAL DE
UM TRECHO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
EXECUTADO COM MISTURAS DE SOLO
TROPICAL, FOSFOGESSO E CAL**

DANIEL ARTHUR NNANG METOGO

D0020G10
GOIÂNIA
2011

DANIEL ARTHUR NNANG METOGO

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO INICIAL DE
UM TRECHO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
EXECUTADO COM MISTURAS DE SOLO
TROPICAL, FOSFOGESSO E CAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Lilian Ribeiro de Rezende, DSc.

D0020G10
GOIÂNIA
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG**

M593c Metogo, Daniel Arthur Nnang.
Construção e avaliação inicial de um trecho de pavimento
asfáltico executado com misturas de solo tropical, fosfogesso e cal
[manuscrito] / Daniel Arthur Nnang Metogo. - 2010.
xv, 195 f. : il., figs, tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Lilian Ribeiro de Rezende.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás,
Escola de Engenharia Civil, 2010.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndices.

1. Solo tropical 2. Resíduo 3. Cal 4. Pavimentação
I. Título.

CDU: 631.445.7




Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

**“CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO INICIAL DE UM TRECHO DE
PAVIMENTO ASFÁLTICO EXECUTADO COM MISTURAS DE
SOLO TROPICAL, FOSFOGESSO E CAL”**

Daniel Arthur Nnang Metogo

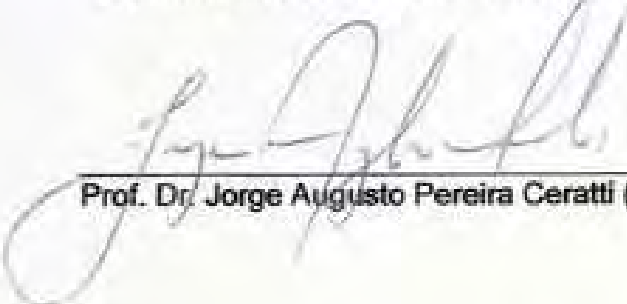
Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:



Prof. Dr. Lilian Ribeiro de Rezende (UFG)



Prof. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Júnior (UFG)



Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)

Goiânia, 13 de agosto de 2010.

Dedico esta dissertação aos meus pais que sempre se sacrificaram para meus estudos e pelo constante apoio moral, mesmo estando tão longe de mim.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Akono Nnang Charles Albert e Ngo Mbock Naomie Caroline, pelos enormes sacrifícios, os conselhos, as orientações, o grande amor e a confiança. Papai, mamãe muito obrigado por tudo.

A meus irmãos, todos mais novos que eu e que, sempre me incentivaram nos meus estudos e me tomam como referência acadêmica. Sempre que encontrava dificuldade aqui, me lembrava dessa grande responsabilidade moral e, corajosamente encarava os mais diversos obstáculos encontrados. Obrigado por isso, caros irmãos.

Um agradecimento particular à Professora Lilian Ribeiro de Rezende que depositou sua confiança em mim bem antes da minha vinda aqui no Brasil, aceitando orientar meu trabalho. Por toda a paciência, a dedicação, as correções dos meus trabalhos, os finais de semana sacrificados na reta final, o conhecimento transmitido nas aulas e ao longo da pesquisa. Professora, não tenho palavras para expressar o tamanho da minha gratidão.

Ao Professor Carlos Vargas que me deu conselhos muito importantes para minha adaptação lingüística e acadêmica nos meus primeiros dias de aulas no Brasil. Suas dicas me ajudaram muito pela frente. Obrigado por isso e pelas suas aulas.

A todos os professores do GECON pelos ensinamentos e disponibilidade para as dúvidas.

Aos professores Jorge Augusto Pereira Ceratti e Wai Ying Yuk Gehling pelo acolhimento e as orientações durante meus ensaios de laboratório em Porto Alegre.

Aos professores Kouam André e Nuanga Philippe da “École Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yaoundé” em Camarões, pelas recomendações acadêmicas. Obrigado pela confiança.

Ao colega Nelson Luis da Cunha que foi de apoio indescritível para conseguir a pista experimental, pela parceria durante a realização dos ensaios de laboratório e de campo.

Aos colegas e grandes amigos Eder Chaveiro, Camilla Borges, Alexandre Araujo pelo companheirismo, as noitadas de estudos, as aprendizagens, os extras, as caronas e os diversos momentos de felicidade. Valeu galera.

A Rosely pela sua amizade, seu apoio e sua disponibilidade.

A Camila Silveira minha “brother”, obrigado pela sua amizade e seus diversos incentivos.

A Samuel Dias Bezerra, Ricardo, Grenilson Danta Pinto, Izabel dos Santos e André Luiz Ribeiro, “o Jesuíta”, todos grandes amigos da casa de estudantes que contribuíram muito na minha aprendizagem da língua portuguesa e da cultura brasileira.

A toda a turma de estudantes africanos que me acolheu de braços muito abertos na minha chegada em Goiânia e pelo companheirismo.

A toda a equipe do Instituto Africamaat, Jean Philippe Omotunde, René Louis Parfait Etilé, Doumby Fakoly e outros por todos os conhecimentos históricos e os ensinamentos de vida que me transmitiram durante esse tempo que passei aqui no Brasil.

Aos Laboratórios de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, do Instituto Federal de Goiás, de FURNAS assim como ao Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal de Rio Grande do Sul pela disponibilização dos equipamentos. Ao técnico João Júnior e aos alunos do LAPAV, João, Rodrigo, Cleber, Diego, Daniel pelo apoio na execução dos ensaios e pela amizade.

À Secretaria de Infraestrutura da Prefeitura de Aparecida de Goiânia que possibilitou a realização da parte de campo e construiu a pista experimental.

À Copebrás, atualmente Anglo American, pelo fornecimento do fosfogesso.

À Ical e à Disbral pelo fornecimento da cal e do asfalto, respectivamente.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro Oeste, pela realização das medições radiométricas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas dentro do Programa Estudante Convênio – Pós Graduação (PEC-PG);

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

RESUMO

Atualmente, observa-se no Brasil uma real dificuldade de reaproveitamento dos resíduos sólidos. Dentre eles, tem-se o fosfogesso, subproduto da produção de ácido fosfático. Os gigantescos depósitos deste resíduo tornam-se problemáticos tanto do ponto de vista ambiental como econômico. Por esse motivo, estudos estão sendo realizados com o objetivo de encontrar uma reutilização desse material em geotecnia. No caso de sua aplicação em pavimentação, além de reaproveitar os resíduos, procura-se reduzir a exploração de materiais naturais tradicionalmente empregados em construção de estradas e vias urbanas. Ensaios laboratoriais mostraram a possibilidade de uso do fosfogesso em pavimentação quando associado aos solos locais e misturas estabilizadas quimicamente. Sendo assim, neste trabalho avalia-se o comportamento mecânico em campo de misturas de fosfogesso, solo tropical da região de Aparecida de Goiânia-GO e cal, quando usadas em camadas de base de pavimento asfáltico. Para tanto, foram realizados ensaios de laboratório para caracterizar as misturas a serem executadas em campo e construída uma pista experimental constituída por subtrechos com misturas solo (80%) + fosfogesso (20%), solo (80%) + fosfogesso (11%) + cal (9%), solo (91%) + cal (9%) e cascalho (100%). Durante a construção dessa pista, foram realizados ensaios de campo próprio à pavimentação, para checar a boa execução da pista e avaliar o comportamento inicial do pavimento. Para entender melhor o comportamento da pista experimental, uma segunda etapa de ensaios de campo foi realizada seis meses após a liberação do tráfego. Deste trabalho, observou-se que tanto em laboratório como em campo, a mistura solo (80%) + fosfogesso (11%) + cal (9%) foi que apresentou os melhores desempenhos mecânicos, podendo assim substituir o cascalho para construção de pavimento de baixos custos. Porém, devem ser adotados cuidados para controlar a expansão dessa mistura.

Palavras-Chave: Solo tropical, Resíduo, Cal, Pavimentação.

ABSTRACT

Presently in Brazil, there is a real difficulty to reuse solid waste. Among them, the phosphogypsum, a byproduct of phosphatic acid production. The huge deposits of this waste become problematic both environmentally and economically. Therefore, researches are being conducted to find a reuse of this material in geotechnical engineering. In the specific case of its application in paving, beyond reuse waste, seek to reduce the exploitation of natural materials, traditionally used in construction of roads. Laboratory tests showed the possibility of use of phosphogypsum in paving when mixed with soil or chemically stabilizer. Thus, this study evaluates on field, the mechanical behavior of mixtures of phosphogypsum, tropical soil of Aparecida de Goiania-GO and lime, when used in base layers of asphalt pavement. For that, laboratory tests were performed to characterize the mixtures to be used on field and was constructed an experimental pavement with mixtures of soil (80%) + phosphogypsum (20%), soil (80%) + phosphogypsum (11%) + lime (9%), soil (91%) + lime (9%) and gravel (100%). During the experimental pavement construction, field tests specifics of paving were conducted, to check its good execution and evaluate its initial performance. To better understand the behavior of the experimental pavement, a second step of field tests was conducted, six months after the release of traffic. From this study, was been observed that both in laboratory and field, the mixture soil (80%) + phosphogypsum (11%) + lime (9%) was that which presented the best mechanical performances and can thus replace the gravel for construction of low cost pavement. However, care should be adopted to control the expansion of this mixture.

Keywords: Tropical soil. Solid waste. Lime. Pavement.

RÉSUMÉ

Il existe actuellement au Brésil d'énormes difficultés en matière d'exploitation de résidus solides. Parmi ceux-ci, le phosphogypse, un sous-produit de la production de l'acide phosphatique. Les gigantesques dépôts de ce résidu deviennent de plus en plus problématiques, aussi bien du point environnemental qu'économique. Pour cette raison, des études sont réalisées dans l'objectif de trouver une forme d'utilisation de ce matériau en géotechnique. En ce qui concerne son application en construction routière, en plus de la viabilisation du résidu, on ambitionne réduire l'exploitation des matériaux traditionnellement utilisés en couches de chaussées urbaines et interurbaines. Des essais de laboratoire ont montrés qu'il est possible d'utiliser le phosphogypse en construction routière lorsque celui-ci est associé à des sols locaux et à des mélanges stabilisés chimiquement. On se propose donc dans ce travail, d'évaluer le comportement mécanique "in situ" de mélanges composés de phosphogypse, sol tropical de la région d'Aparecida de Goiânia – GO et de chaux hydraulique, lorsque ceux-ci sont utilisées en couche de base de chaussée bitumineuse. Pour ce faire, des essais de laboratoire ont été effectués pour caractériser les mélanges avant leur application en chantier et par la suite, une piste expérimentale a été construite. Celle-ci est été subdivisée en tronçons exécutés avec les mélanges : sol (80%) + phosphogypse (20%), sol (80%) + phosphogypse (11%) + chaux hydraulique (9%), sol (91%) + chaux hydraulique (9%) et grave latéritique (100%). Pendant la construction de cette piste, des essais de chantier propres à la construction routière ont été réalisés pour contrôler la bonne exécution des couches et accompagner le comportement initial de la chaussée. Pour mieux comprendre le comportement de cette piste, une deuxième batterie d'essais de chantier a été effectuée six mois après la libération du trafic. A partir de ce travail, on a pu observer que, aussi bien en laboratoire qu'en chantier, le mélange sol (80%) + phosphogypse (11%) + chaux hydraulique (9%) est celui qui a présenté les meilleures performances mécaniques, pouvant de ce fait, substituer la grave latéritique en construction de voies routières économiques. Cependant, une certaine attention doit être apportée pour mieux contrôler l'expansion de ce mélange.

Mots – Clés: Sol tropical. Résidu. Chaux hydraulique. Construction routière.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 As potenciais jazidas de rochas fosfáticas no mundo (modificado de ZAPATA; ROY, 2004)	36
Figura 2.2. Série de decaimento da ^{238}U (Modificado de TOSAKA, 2008).....	47
Figura 2.3. Série de decaimento do ^{232}Th (Modificado de TOSAKA, 2008).....	48
Figura 2.4 Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de um fosfogesso produzido na região de Sfax na Tunísia. (AJAM <i>et al.</i> , 2009).....	50
Figura 3.1.Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente a uma camada saprolítica de origem sedimentar, com as correspondentes micro-fábricas (VILLIBOR <i>et al.</i> , 2009).....	65
Figura 3.2. Ocorrência dos solos de comportamento laterítico no território brasileiro (modificado de VILLIBOR <i>et al.</i> , 2009).....	65
Figura 4.1- Localização da pista experimental.....	75
Figura 4.2 - Croqui esquemático da estrutura do pavimento.....	76
Figura 4.3 – Depósito do fosfogesso: (a) Instalação da lona preta.; (b) Medições radioativas antes do descarregamento;(c) Descarregamento; (d) Medições radiológicas depois do descarregamento; (e) Recobrimento da pilha de fosfogesso;(f) Pilha de fosfogesso completamente recoberta.	77
Figura 4.4 – Determinação da massa específica dos grãos: (a) Aquecimento dos picnômetros para eliminar as bolhas de ar; (b) Picnômetros deixados em repouso para atingir a temperatura ambiente.	79
Figura 4.5 - Ensaio de análise granulométrica: (a) Peneiramento; (b) Sedimentação.....	79
Figura 4.6 – Ensaio de limites de consistência:(a)Limite de liquidez;(b) Limite de plasticidade	80
Figura 4.7 – Compactação: (a) Homogeneização das misturas; (b) Compactação no cilindro Proctor.....	81
Figura 4.8 – Ensaio em andamento: (a) expansão; (b) CBR.....	81
Figura 4.9 – Ensaio de compressão simples: (a) Corpo de prova levado ao torno; (b) Corpo de prova moldado; (c) Ensaio em andamento. (d) Corpo de prova após ensaio.....	82
Figura 4.10 - Equipamento triaxial de cargas repetidas.	83
Figura 4.11 – Moldagem do corpo de prova: (a) Cilindro tripartido u; (b) Corpo de prova compactado.....	85
Figura 4.12 – Execução do subleito: (a) Pista no início do projeto; (b) Pista depois da remoção dos materiais não apropriados; (c) Escarificação da superfície do subleito; (d) Homogeneização dos materiais; (e) Distribuição do material na largura do trecho; (f) Compactação.....	86
Figura 4.13 – Execução do subtrecho de solo-cal: (a) Solo distribuído no subleito; (b) Alinhamento dos sacos de cal e aberturas destes; (c) Espalhamento da cal; (d) Distribuição da mistura; (e) Homogeneização; (f) Compactação com rolo pé de carneiro.....	88

Figura 4.14 - Diferentes etapas da mistura do solo com o fosfogesso.	89
Figura 4.15 – Problemas observados no subtrecho de solo-fosfogesso-cal: (a) Expansão da camada ; (b) Restauração do bordo esquerdo depois da expansão.	89
Figura 4.16 – Aspectos dos subtrechos após o período de secagem: (a) Trincamento da base do subtrecho de solo-cal;- (b) Ausência de trincas em grande parte do subtrecho de solo-fosfogesso-cal.	90
Figura 4.17 – Tratamento das trincas: (a) Varrição da camada de base; (b) Aspecto da camada depois varrição.	91
Figura 4.18- Execução do revestimento: (a) Imprimação da base; (b) Aplicação do revestimento.	91
Figura 4.19 - Configuração final do trecho seis meses após sua construção.	91
Figura 4.20 – Ensaio para controle de compactação: (a) Frasco de areia; (b) “Speedy”.....	92
Figura 4.21 – Localização dos ensaios de frasco de areia, “Speedy”, prova de carga e DCP.	93
Figura 4. 22 - Execução do ensaio da viga Benkelman sobre o revestimento.	94
Figura 4.23 - Execução do ensaio de prova de carga estática; (a) Sobre o subleito; (b) Sobre o revestimento.....	95
Figura 4.24 - Execução do ensaio DCP no subleito.....	95
Figura 4.25 - Medições radiométricas nos subtrechos constituídos de fosfogesso.....	96
Figura 5.1 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o solo.....	100
Figura 5.2 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o fosfogesso.....	101
Figura 5.3 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para a mistura Solo (80%)+Fosfogesso(20%).....	101
Figura 5.4 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para a mistura Solo (80%)+Fosfogesso(11%)+Cal(9%).....	102
Figura 5.5 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para a mistura Solo (91%)+Cal(9%).	102
Figura 5.6 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o cascalho.....	103
Figura 5.7 – Comparação entre as curvas granulométricas sem defloculante obtidas para os diferentes materiais.	104
Figura 5.8 – Comparação entre as curvas granulométricas com defloculante obtidas para os diferentes materiais.	104
Figura 5.9 – Família de curvas de deformabilidade.....	106
Figura 5.10 – Curvas de compactação mini-MCV.....	107
Figura 5.11. Localização do grupo MCT do solo estudado.	107
Figura 5.12 – Resultados obtidos para o solo compactado na energia normal: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão.....	109
Figura 5.13 – Resultados obtidos para o solo compactado na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão.....	110

Figura 5.14 – Resultados obtidos para a mistura solo+fosfogesso compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão.....110

Figura 5.15 – Resultados obtidos para a mistura solo+fosfogesso+cal compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão111

Figura 5.16 – Resultados obtidos para a mistura solo+cal compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão.....111

Figura 5.17 – Resultados obtidos para o cascalho compactado na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão..... 112

Figura 5.18. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras sem cura (a) Solo; (b) Solo+fosfogesso; (c) Solo+fosfogesso+cal; (d) Solo+cal....113

Figura 5.19. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras com 21dias de cura (a) Solo+fosfogesso; (b) Solo+fosfogesso+cal; (c) Solo+cal..114

Figura 5.20. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras com 49dias de cura (a) Solo+fosfogesso; (b) Solo+cal.....114

Figura 5.21. Variação volumétrica de um corpo de prova de solo+fosfogesso+cal por expansão..... 116

Figura 5.22. Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....120

Figura5.23. Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.121

Figura 5.24 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....121

Figura 5.25 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....122

Figura 5.26 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....123

Figura 5.27 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.123

Figura 5.28 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....124

Figura 5.29 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....125

Figura 5.30 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....125

Figura 5.31 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....126

Figura 5.32 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....	127
Figura 5.33 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....	127
Figura 5.34 Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.....	128
Figura 5.35 – Valores obtidos para os de módulos resilientes para as misturas solo+fosfogesso, solo+fosfogesso+cal e solo+cal com $\sigma_d=0,126$ MPa e σ_3 variando entre os valores do ensaio de laboratório.	130
Figura 5.36 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o bordo esquerdo do subleito.	136
Figura 5.37 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o bordo direito do subleito.....	136
Figura 5.38- Bacias de deslocamentos médias obtidas para os bordos esquerdo e direito e bacia de deslocamento média do subleito.	137
Figura 5.39 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + fosfogesso: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	139
Figura 5.40– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + fosfogesso + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	141
Figura 5.41 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	141
Figura 5.42– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de cascalho: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	142
Figura 5.43 – Bacias de deslocamentos médias obtidas para ensaios de viga Benkelman sobre os subtrechos Solo+fosfogesso (a) e Solo+fosfogesso+cal (b)	142
Figura 5.44 – Bacias de deslocamentos médias obtidas para ensaios de viga Benkelman sobre os subtrechos Solo+cal (a) e Cascalho (b).	143
Figura 5.45 Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre as bases	144
Figura 5.46 – Gráfico de fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico.....	144
Figura 5.47 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + fosfogesso: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	147
Figura 5.48– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + fosfogesso + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	148
Figura 5.49 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.....	148
Figura 5.50 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de cascalho: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito	149

Figura 5.51- Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+fosfogesso (a) e solo+fosfogesso+cal (b)	149
Figura 5.52 – Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b)	150
Figura 5.53- Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre os subtrechos do revestimento.....	150
Figura 5.54 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento do subtrecho solo + fosfogesso na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito	154
Figura 5.55 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho solo + fosfogesso+cal na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito	154
Figura 5.56 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho solo +cal na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito	155
Figura 5.57 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho do cascalho na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito	155
Figura 5.58 - Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento (segunda etapa) dos subtrechos solo+fosfogesso (a) e solo+fosfogesso+cal (b)	156
Figura 5.59 - Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b)	156
Figura 5.60- Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre os subtrechos do revestimento na segunda etapa	157
Figura 5.61 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o subleito para os diferentes subtrechos.(a)solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal.....	159
Figura 5.62 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o subleito para os diferentes subtrechos. (a)solo+cal (b) cascalho	160
Figura 5.63 - Curvas tensões x deslocamentos médias para cada subtrecho do subleito.....	160
Figura 5.64 - Aspecto visual da base com solo e fosfogesso nos dias dos ensaios de prova de carga	162
Figura 5.65 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre as bases (a)solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal	163
Figura 5.66 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre as bases (a)solo+cal (b) cascalho.....	163
Figura 5.67- Curvas tensões x deslocamentos médias para cada base	164
Figura 5.68 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento (a)solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal	165
Figura 5.69 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento (a)solo+cal (b) cascalho.....	166
Figura 5.70 - Curvas Tensão x Deslocamento médias obtidas para o revestimento	166

Figura 5.71 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento na segunda etapa nos subtrechos solo+fosfogesso (a)	
e solo+fosfogesso+cal (b).....	168
Figura 5.72 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento na segunda etapa nos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b)	168
Figura 5.73 - Curvas Tensão x Deslocamento médias obtidas para o revestimento na segunda etapa	169
Figura 5.74 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+fosfogesso.....	170
Figura 5.75 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+fosfogesso+cal.....	171
Figura 5.76 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+cal.	171
Figura 5.77 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho cascalho.....	172
Figura 5.78 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso	174
Figura 5.79 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso+cal	174
Figura 5.80 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+cal	174
Figura 5.81 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de cascalho.....	175
Figura 5.82 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso durante a segunda etapa	177
Figura 5.83 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso+cal durante a segunda etapa	177
Figura 5.84 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+cal durante a segunda etapa.	178
Figura 5.85 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de cascalho durante a segunda etapa.	178
Figura 5.86 – Difratoograma da amostra Solo–Fosfogesso-Cal retirada em campo.....	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição química dos fosfogessos dihidratados produzidos na Turquia (DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2006), China (MING <i>et al.</i> ,2008), Polônia (WOLICKA, 2008), Brasil (CASTILHOS <i>et al.</i> , 1998) e Tunisia (FELFOUL <i>et al.</i> , 2002)..45	
Tabela 2.2. Resultados das características químicas do extrato lixiviado das amostras estudadas (MESQUITA, 2007)	62
Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos.....	97
Tabela 5.2 – Frações granulométricas dos materiais estudados.....	99
Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de limites de consistência.....	105
Tabela 5.4 – Classificação dos materiais de acordo com os sistemas convencionais.....	105
Tabela 5.5 Parâmetros obtidos a partir dos ensaios da metodologia MCT para o solo.....	107
Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, expansão e CBR.....	108
Tabela 5.7 Resistência à compressão das misturas com e sem cura.....	112
Tabela 5.8 Parâmetros obtidos na preparação dos corpos de prova para ensaios de compressão dinâmica.....	115
Tabela 5.9 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais sem cura.....	117
Tabela 5.10 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais com 7dias de cura.....	117
Tabela 5.11 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes obtidos para os materiais com 14dias de cura.....	118
Tabela 5.12 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais com 21dias de cura.	118
Tabela 5.13 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras sem cura.....	120
Tabela 5.14 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 7 dias de cura.	122
Tabela 5.15 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 14dias de cura.....	124
Tabela 5.16 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 21dias de cura.	126

Tabela 5.17 – Modelos compostos das misturas estudadas em função dos tempos de cura...	128
Tabela 5.18 - Valores estimados dos módulos de resiliência para os materiais de base com $\sigma_d=0,126$ MPa e $\sigma_3=0,371$ MPa.	130
Tabela 5.19 - Dados pluviométricos diários da região metropolitana de Goiânia para os meses de outubro – dezembro 2009 e maio 2010.....	131
Tabela 5.20 - Dados pluviométricos mensais da região metropolitana de Goiânia para os meses de setembro 2009 e janeiro – abril 2010.	132
Tabela 5.21 Resultados dos ensaios de <i>Speedy</i> e frasco de areia realizados no subleito.....	133
Tabela 5.22 Resultados dos ensaios de <i>Speedy</i> e frasco de areia realizados nas bases.....	133
Tabela 5.23- Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do subleito a partir do ensaio de viga Benkelman.....	135
Tabela 5.24 - Parâmetros obtidos no bordo direito do subleito a partir do ensaio de viga Benkelman.....	135
Tabela 5.25- Parâmetros obtidos no bordo esquerdo da base a partir do ensaio de viga Benkelman.....	138
Tabela 5.26 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo da base a partir do ensaio de viga Benkelman.....	139
Tabela 5.27 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman.....	145
Tabela 5.28- Parâmetros obtidos para no bordo direito do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman.....	146
Tabela 5.29 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman na segunda etapa.....	151
Tabela 5.30 - Parâmetros obtidos para no bordo direito do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman na segunda etapa.....	152
Tabela 5.31 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa no subleito.....	158
Tabela 5.32 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa nas bases..	161
Tabela 5.33 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa sobre o revestimento.....	165
Tabela 5.34 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa sobre o revestimento na segunda etapa.....	167
Tabela 5.35 – Índices de penetração obtidos no subleito.	170

Tabela 5.36 – Índices de penetração obtidos nas bases.....	173
Tabela 5.37 Valores dos índices de penetração média obtidos com o DCP para o subleito e as camadas de base.....	175
Tabela 5.38 Relação entre os índices de penetração das bases e dos subleitos.....	175
Tabela 5.39 – Índices de penetração obtidos na segunda etapa.....	176
Tabela 5.40 – Valores médios de DN das bases e relação os do subleito.	176
Tabela 5.41- Taxa de exposição medida no primeiro caminhão (23t).....	180
Tabela 5.42 - Taxa de exposição medida no segundo caminhão (23t)	181
Tabela 5.43- Taxa de exposição medida após descarregamento do fosfogesso.....	181
Tabela 5.44 – Taxa de exposição medida no trecho de pavimento com o uso de 20% de fosfogesso.....	182
Tabela 5.45 – Taxa de exposição realizada no trecho de pavimento com o uso de 11% de fosfogesso.....	182
Tabela 5.46 – Taxa de exposição realizada no trecho de pavimento sem o uso de fosfogesso.....	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	“American Association of State Highway and Transportation Officials”
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	“Asphalt Institute”
ASTM	“American Society for Testing and Materials”
BE	Bordo Esquerdo
BD	Bordo Direito
BPL	“Bone Phosphate of Lime”
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CH	Cal Hidratada
CM	Cura Média
CNEN	Unidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear
CP	Corpo de Prova
CRCN-CO	Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro Oeste,
DCP	Penetrômetro dinâmico de cone
DER/SP	Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	“Environmental Protection Agency”
EUA	Estados Unidos da América
FAPEG	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Goiás
FG	Fosfogesso
FIPR	“Florida Institute of Phosphore Reserch”
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S/A
GC	Grau de compactação
GO	Goiás
IFG	Instituto Federal de Goiás
IP	Índice de plasticidade;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

ISC	Índice de Suporte Califórnia
LAPAV	Laboratório de Pavimentação
LCPC	“Laboratoire Central des Ponts et Chaussée”
LD	Limite de detecção
LG´	Solo Argiloso Laterítico
LVDTs	“Linear Variable Differential Transformers”
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCV	“Moisture Condition Value”
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MG	Minas Gerais
ML	“Mo Low liquid limit”
MR	Módulo Resiliente
NBR	Normas Brasileiras
NP	Não Plástico
PA	Pará
PCA	“Portland Cement Association”
PMF	Pré-misturado a frio
S	South
SAFL	Solos Arenosos Finos Lateríticos
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SI	Sistema Internacional
SC	“Sand Clay”
SC	Santa Catarina
SP	São Paulo
SPC	“Stabilized Phosphogypsum with Cement”
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
SUCS	Sistema de Classificação Unificado de Solos
TRB	“Transportation Research Board”
UCOS	Umedecimento Compactação e Secagem
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USEPA	“U.S. Environmental Protection Agency”

VDM

Volume Diário Médio

W

West

LISTA DE SÍMBOLOS

^{26}Al	Alumínio 26
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
As	Arsênico
^{10}Be	Berílio 10
Bq	Becquerel
Bq/kg	Becquerel por quilograma
$\text{Bq/m}^2/\text{s}$	Becquerel por metro quadrado por segundo
Bq/m^3	Becquerel por metro cúbico
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
^{14}C	Carbono 14
c'	Coefficiente angular da reta assimilável à curva de deformabilidade com Mini-MCV = 10
C_3A	Complexo alumínio
Ca^{2+} –	Íon cálcio
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	Fosfato monocálcio
$\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)_2$	Fosfato bicálcio
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato tricálcio
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	Fluoroapatita
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hidroxiapatita
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Carbonato-hidroxiapatita
$(\text{Ca}_{10-x-y}\text{Na}_x\text{Mg}_y(\text{PO}_4)_{6-z}(\text{CO}_3)_z\text{F}_{0.4z}\text{F}_2)$	Francolita
CaO	Óxido de cálcio
$\text{CaO} \cdot (\text{OH})_2$	Cal cálcica hidratada
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{Mg}(\text{OH})_2$	Cal dolomítica dihidratada
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{MgO}$	Cal dolomítica monohidratada
CaS	Sulfeto de cálcio
CaSO_4	Sulfato de cálcio ou gesso natural
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio dihidratado
$\text{CaSO}_4 \cdot 2n\text{H}_2\text{O}$	Fosfogesso
Cd	Cádmio

Ci	Curie
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por segundo
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
d´	Inclinação da parte do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes
D ₀	Deformação real do pavimento no ponto de prova
D ₀ x R ₀	Indicador estrutural
D ₂₅	Deformação obtida quando a carga está localizada a 25 cm do ponto de prova
D _{560kPa}	Deslocamento correspondente a uma pressão de 560kPa no ensaio de prova de carga
DAP	Fosfatos de diamônio
D _{elástico}	Deslocamento recuperado
D _{max}	Deslocamento máximo no ensaio de prova de carga
Dmax	Limite superior de aceitação dos deslocamentos no ensaio de viga
Dmédio	Deslocamentos médios por seção
Dmim	Limite inferior de aceitação dos deslocamentos no ensaio de viga
DN	Índice de penetração do penetrômetro dinâmico de cone
D _{plástico}	Deslocamento não recuperado
e´	Índice de classificação MCT
Exp.	Expansão
°F	Graus Fahrenheit
F ⁻	Íon fluoreto
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
g/l	Grama por litro

HF	Ácido fluorídrico
H ₂ O	Água
H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ⁻² , PO ₄ ⁻³	Íons fosfatos
H ₃ PO ₄ -	Ácido fosfórico
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
K	Potássio
k ₁ , k ₂ , k ₃	Parâmetros dos modelos de modulo de resiliência
K ₂ O	Óxido de potássio
KCl	Cloreto de potássio
kN/m ³	Quilonewton por metro cúbico
kPa	Quilopascal
k _{placa}	Coefficientes de reação da placa
k _{viga}	Módulo de reação vertical da viga
ln	Logaritmo neperiano
m	Metro
m ²	Metro quadrado
MAP	Fosfatos de monoamônio
Mg	Magnésio
min	Minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
MPa	Megapascal
mm/golpe	Milímetro por golpe
N	Azoto ou nitrogênio
N ^o	Número
NaCl	Cloreto de sódio
NaF	Fluoreto de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
Na ₂ SiF ₆	Fluorosilicato de sódio
Na ₃ AlF ₆	Hexafluoraluminato de sódio
Na ₅ P ₃ O ₁₀	Tripolifosfato de sódio
NH ₃	Amônia

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,	Fosfato de monamônio
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	Fosfatos de diamônio
N/mm^2	Newton por milímetro quadrado
O_2	Dióxido
P	Fosfato
^{40}P	Potássio 40
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
$\text{pCi}/\text{m}^2/\text{s}$	Pico Curie por metro quadrado por segundo
Pb	Chumbo
^{210}Pb	Chumbo 210
pH	Potencial Hidrogênio
Pi	Perda de massa por imersão expressa em porcentagem
R_0	Raio de curvatura
^{226}Ra	Rádio
^{222}Rn	Radônio 222
S	Enxofre
Si	Silício
SiF_4	Tetrafluoreto de silício
SO_2	Dióxido de sulfato
SO_3	Trióxido de enxofre
Sr	Grau de saturação
t	Tonelada
^{232}Th	Tório 232
U	Urânio
^{234}U	Urânio 234
^{238}U	Urânio 238
W	Umidade
w_L	Limite de liquidez
w_{ot}	Umidade ótima
w_P	Limite de plasticidade
Zn	Zinco
Δw	Variação de umidade
σ	Desvio padrão

σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
μm	Micrometro
$\mu g/kg$	Micro grama por quilograma
$\mu Sv/h$	Microsievens por hora
θ	Somatório das tensões principais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	30
1.1 JUSTIFICATIVA.....	31
1.2 OBJETIVOS.....	32
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	32
2 O FOSFOGESSO.....	33
2.1 DEFINIÇÕES.....	33
2.2 ROCHAS FOSFÁTICAS.....	35
2.3 ÁCIDO SULFÚRICO E ÁCIDO FOSFÓRICO.....	38
2.4 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO FOSFOGESSO.....	40
2.4.1 Processo dihidratado.....	40
2.4.2 Processo hemihidratado.....	41
2.4.3 Processos hemidihidratados.....	42
2.5 CARACTERÍSTICAS DO FOSFOGESSO.....	43
2.5.1 Características químicas.....	44
2.5.2 Características radiológicas.....	45
2.5.3 Características físicas.....	48
2.6 UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO.....	50
2.6.1 Agricultura.....	51
2.6.2 Produção de enxofre.....	52
2.6.3 Indústria do cimento.....	52
2.6.4 Construção civil.....	53
2.6.5 Pavimentação.....	55
2.7 DISPOSIÇÃO FINAL E IMPACTOS AMBIENTAIS DO FOSFOGESSO.....	57
2.7.1 Contaminação atmosférica.....	58
2.7.2 Contaminação dos solos e das águas subterrâneas.....	59
3 SOLOS TROPICAIS E PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO.....	63
3.1 DEFINIÇÕES.....	63
3.2 SOLOS LATERÍTICOS.....	66
3.3 UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO.....	68
3.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS COM A CAL.....	70
3.5 TRECHOS EXPERIMENTAIS EM GOIÁS E NO DISTRITO FEDERAL.....	72

4 METODOLOGIA.....	74
4.1 INTRODUÇÃO.....	74
4.2 VISITA TÉCNICA E DEFINIÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL.....	74
4.3 MATERIAIS.....	76
4.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	78
4.4.1 Ensaio de caracterização.....	78
4.4.2 Metodologia MCT.....	80
4.4.3 Ensaio de Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR).....	80
4.4.4 Ensaio de compressão simples.....	81
4.4.5 Ensaio de compressão dinâmica e determinação do módulo resiliente.....	82
4.5 CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL.....	85
4.5.1 Preparo do subleito.....	85
4.5.2 Execução das camadas de base.....	87
4.5.3 Execução da camada de revestimento.....	90
4.6 ENSAIOS DE CAMPO.....	92
4.6.1 Frasco de areia e “Speedy”.....	92
4.6.2 Viga Benkelman.....	93
4.6.3 Prova de carga.....	94
4.6.4 Ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP).....	95
4.6.5 Medição dos parâmetros radiométricos.....	96
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
5.1 INTRODUÇÃO.....	97
5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	97
5.2.1 Ensaio de caracterização.....	97
5.2.2 Classificação MCT.....	106
5.2.3 Compactação, Expansão e CBR.....	108
5.2.4 Resistência à compressão simples.....	112
5.2.5 Módulo resiliente.....	115
5.3 DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	131
5.4 ENSAIOS DE CAMPO.....	132
5.4.1 Controle de compactação.....	132
5.4.2 Viga Benkelman.....	134
5.4.3 Prova de carga sobre placa.....	157
5.4.4 Penetrômetro dinâmico de cone (DCP).....	169
5.4.5 Análise da expansão por difração de Raios-X.....	179
5.4.6 Ensaio radiométricos no fosfogesso.....	179

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	183
6.1 CONCLUSÕES.....	183
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	186
REFERÊNCIAS.....	187
APÊNDICE.....	194

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Ao iniciar e executar um projeto de pavimentação é comum orientar-se ao uso de materiais ditos tradicionais, ou seja, aqueles recomendados pelas especificações técnicas vigentes. Dentre eles, nas regiões de clima tropical, pode-se encontrar o cascalho laterítico normalmente utilizado como material de sub-base e base de pavimentos asfálticos. O crescimento da urbanização e da industrialização tornou cada vez maior a necessidade de empregar grandes quantidades desses materiais na construção das estradas e vias urbanas. O uso intenso dos materiais tradicionais criou uma variedade de problemas tanto econômicos como ambientais. A dificuldade de se encontrar áreas de empréstimo próximas das obras, em particular nos grandes centros urbanos, tornou o cascalho um material economicamente inviável. Geralmente, as jazidas ainda existentes estão localizadas em áreas de proteção ambiental (REZENDE, 2007).

Por outro lado, a mesma urbanização e industrialização geraram uma grande produção de resíduos industriais. Hoje em dia observa-se uma enorme dificuldade de reaproveitamento dos resíduos sólidos em várias indústrias. A falta de técnicas de exploração dos resíduos traz outra problemática: a do seu armazenamento e das eventuais poluições das áreas destinadas para tal. O caso particular da indústria de transformação da rocha fosfática para obter o ácido fosfórico utilizado na produção de fertilizante é bastante relevante. O subproduto originado dessa transformação química é chamado de fosfogesso. A produção mundial deste resíduo é estimada a 160 milhões de toneladas (PARREIRA; KOBAYASHI; SILVESTRE, 2003) e os problemas de armazenamento podem ser observados, por exemplo, nas cidades de Catalão e Ouidor em Goiás, onde estão hoje depositados mais de 20 milhões de toneladas de fosfogesso (REZENDE, 2007).

Assim, na procura de soluções viáveis para resolver ambos os problemas, surgiu a idéia do uso do fosfogesso como material alternativo na construção de pavimentos asfálticos. Os

trabalhos pioneiros nesse sentido foram implementados pelo “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” (LCPC) na França e pela “Florida Institute of Phosphore Research” (FIPR) nos Estados Unidos, no final da década de 70. No Brasil, os estudos sobre o uso do fosfogesso em pavimentação iniciaram-se na Universidade de São Paulo em 1995 (PARREIRA; KOBAYASHI; SILVESTRE, 2003). Desde então, vários outros trabalhos foram elaborados e ainda estão sendo realizados, procurando sempre as melhores possibilidades de uso deste resíduo em pavimentação, pela experimentação de diversas misturas de fosfogesso com solos tropicais, cimento, cinzas volantes, cal e outros estabilizantes.

1.1 JUSTIFICATIVA

No estado de Goiás está localizada uma das maiores empresas produtora de fertilizante do Brasil. Esta empresa atinge uma produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e fertilizante granular de mais de 121 mil toneladas por ano (MESQUITA, 2007). A grande produção de fosfogesso e a presença de barragens de rejeitos cada vez maiores geram a necessidade de serem realizados estudos sobre as possíveis utilizações desse material em engenharia civil, e mais precisamente, em pavimentação.

Na Universidade Federal de Goiás (UFG), pesquisas nesse sentido vêm sendo realizadas e já se constituíram em duas etapas. A primeira focalizou-se nos ensaios de laboratório para determinar as propriedades geotécnicas e avaliar os riscos de contaminação das misturas de fosfogesso com solos tropicais locais (MESQUITA, 2007). Deste estudo foi determinada a mistura que ofereceria o melhor comportamento mecânico para o uso em pavimentação. Num segundo momento, foi realizada outra pesquisa para analisar o comportamento de outras misturas de fosfogesso, solo tropical e cal hidratada (RUFO, 2009).

Esta dissertação encaixa-se na continuidade dos trabalhos já realizados e constitui assim a sua terceira etapa. Nesta pesquisa, foi avaliado o comportamento mecânico em campo das misturas que apresentaram os melhores resultados em laboratório. Para alcançar esse propósito foi executada uma pista de pavimento experimental e suas características estruturais iniciais foram analisadas por meio da realização de ensaios de campo.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento “in-situ” de misturas compostas de fosfogesso, solos tropicais e cal para utilização em pavimentação.

Como objetivos específicos tem-se:

- Caracterizar em laboratório as misturas a serem executadas em campo;
- Avaliar o comportamento mecânico em laboratório das referidas misturas;
- Acompanhar a execução de um trecho de pavimento asfáltico experimental;
- Avaliar o comportamento estrutural da via durante a construção e seis meses após a liberação do tráfego;
- Verificar a possibilidade ou não de contaminação radioativa das misturas utilizadas em campo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho foi desenvolvido em seis capítulos. O Capítulo 1 é introdutório e expõe os aspectos gerais desta pesquisa, sua justificativa, seus objetivos gerais e específicos. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre o fosfogesso. Nele constam assuntos tais como: definições, origens, processos de geração, características químicas, físicas e radiológicas, possíveis aplicações e impactos ambientais do fosfogesso. O Capítulo 3 trata dos solos tropicais e suas aplicações em pavimentação. Nesse capítulo, estão discutidas também técnicas de estabilização químicas dos solos com a cal. O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada nesta pesquisa assim como os diferentes materiais utilizados. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados de ensaios de laboratório e de campo. As considerações finais, conclusões sobre este trabalho e as sugestões para pesquisas futuras constam no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2

O FOSFOGESSO

Neste capítulo são apresentadas as definições, as principais características, as possíveis utilizações e as questões ambientais relacionadas com o fosfogesso. Essas informações tornam-se importantes para que se conheça melhor o resíduo sólido estudado nesta pesquisa.

2.1 DEFINIÇÕES

Fosfato (P), azoto ou nitrogênio (N) e potássio (K) são três elementos químicos importantes para o crescimento das plantas. Apesar de serem abundantes na natureza, esses elementos não são sempre disponíveis para as plantas. Por esse motivo, os solos devem ser periodicamente reabastecidos. O uso de fertilizante é o método mais utilizado para suprir essa necessidade. Destacam-se assim, de acordo com os elementos químicos predominantes, os fertilizantes potássios, azotados e fosfáticos (MOUGHLI, 2000).

O potássio provém de depósitos subterrâneos ou marítimos, constituídos de misturas de cloreto de sódio e de potássio (NaCl, KCl). Na indústria de fertilizantes, o azoto presente na atmosfera é fixado quimicamente para formar a amônia (NH₃) (MOUGHLI, 2000). Para os fosfatos, as rochas fosfáticas são as principais matérias primas.

De acordo com Moughli (2000), apesar dos fosfatos presentes nos fertilizantes serem estimados em termo de teor de pentóxido de fósforo (P₂O₅), essa molécula não se encontra nos fertilizantes e nem participa da nutrição das plantas. Nos adubos, os fósforos são presentes geralmente na forma de fosfatos de cálcio (Ca₃(PO₄)₂ ou Ca(H₂PO₄)₂) ou de amônio (NH₄H₂PO₄ ou (NH₄)₂HPO₄). Já no solo, essas substâncias são absorvidas pelas plantas nas formas de íons H₂PO₄⁻ ou HPO₄⁻² dependendo do pH do solo.

O ácido fosfórico (H₃PO₄) é a principal matéria prima para fabricação dos fosfatos de cálcio e de amônio e por extensão, dos fertilizantes fosfáticos. A sua produção advém de dois processos distintos. No primeiro processo obtém-se o fósforo elementar através da redução

térmica do fosfato de cálcio em forno elétrico, o qual é posteriormente oxidado e absorvido em água, resultando o ácido fosfórico. O segundo processo, por via úmida, é baseado na reação do ácido sulfúrico com o concentrado fosfático. Esse último é o mais utilizado no mundo (SOUZA, 2001; CLAUDE, 2005).

O fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2n\text{H}_2\text{O}$) é o subproduto da reação de ataque da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico durante o processo de fabricação do ácido fosfórico por via úmida. Esse resíduo pode existir sob três formas, dependendo do valor do número n de moléculas de água presentes nos cristais de fosfogesso (PARREIRA; KOBAYASHI; SILVESTRE Jr., 2003). Apesar de ser constituído principalmente pelo sulfato de cálcio, o fosfogesso possui várias impurezas tal como P_2O_5 , F, Al, P, Si, Fe, Mg e matérias orgânicas (DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2006; MIN; JUESHI; YING, 2007) além de metais pesados como o Cu, Cd, Zn, U e radioativos tipo ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{222}Rn (CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998; MASRI, *et al.*, 2004).

Quando a indústria de fertilizante produz uma tonelada de pentóxido de fosfato (P_2O_5), ela gera entre 4 a 6 toneladas de fosfogesso (KOULOHERIS, 1980). As grandes quantidades de fosfogesso obtidas nesse processo vêm sendo problemáticas para as indústrias, por causa da sua disposição final e das eventuais poluições ao meio ambiente. Kouloheris (1980) relata que as primeiras formas de gerenciamento desse resíduo consistiam no bombeamento destes no mar, aproveitando a alta solubilidade do fosfogesso nas águas salinas. Devida à produção cada vez maior de fosfogesso, esse método foi progressivamente substituído pelo seu armazenamento em depósitos sobre o solo (LLOYD Jr., 1985). De acordo com Parreira, Kobayashi e Silvestre Jr (2003), a produção mundial de fosfogesso é de 180 milhões de toneladas por ano. No Brasil, os estoques de fosfogesso passaram de 50 a 150 milhões de toneladas entre 1991 e 2007, com uma produção anual de 5,4 milhões de toneladas (MAZZILLI; SAUEIA, 1997; KANNO; ROSSETO; FERREIRA, 2008).

Esses problemas levaram vários pesquisadores a buscarem soluções econômicas e ambientalmente aceitáveis para o reuso do fosfogesso. O reaproveitamento desse resíduo vem sendo bastante limitado por causa da suas impurezas e da abundância de depósitos de gesso natural (CaSO_4), material de mesma composição química, mas sem impurezas. Dois fatores determinam o tipo e a quantidade de impurezas do fosfogesso: a origem da rocha fosfática e o processo de produção do ácido fosfórico. Esses assuntos serão melhor discutidos a seguir.

2.2 ROCHAS FOSFÁTICAS

Rocha fosfática é um termo impreciso, mas globalmente aceito para designar os materiais geológicos que contêm uma quantidade adequada de minerais fosfáticos para o uso comercial (STRAATEN, 2002). A mesma expressão é utilizada para se referir aos produtos industriais de alta concentração em fósforo (MCCLELLAN; KAUWENBERGH, 2004). Os concentrados fosfáticos são comercializados expressos sob a forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5) ou fosfato tricálcio ($Ca_3(PO_4)_2$), também conhecido como “Bone Phosphate of Lime – BPL” (SOUZA, 2001). Além do mineral principal contendo o fósforo, as jazidas de rochas fosfáticas contêm minerais acessórios ou impurezas de ganga que ainda podem se encontrar no mineral fosfático enriquecido (ZAPATA; ROY, 2004).

As maiores reservas mundiais de rochas fosfáticas são localizadas no Marrocos e nos Estados Unidos. Cerca de 40 países produzem os concentrados fosfáticos, mas apenas 12 países são responsáveis por 92% da produção mundial. Essa produção é liderada pelos Estados Unidos com 33 a 34% do total da produção, e é seguido pela China, Marrocos e Rússia (BETTER, 1999; ZAPATA; ROY, 2004). O parque industrial de fosfatos brasileiro ocupa a 8ª colocação dentre os produtores mundiais de concentrado de rocha com 3,4% de participação (SOUZA, 2001). A Figura 2.1 mostra as potenciais jazidas de rochas fosfáticas no mundo.

As reservas totais de rochas fosfáticas brasileiras são estimadas a quatro bilhões de toneladas. Em termos de P_2O_5 , elas representam cerca de 1% das reservas mundiais (CEKINSKI *et al.*, 1990). Esse patrimônio fosfático está distribuído nos estados produtores de Minas Gerais com 73,8%, Goiás com 8,3% e São Paulo com 7,3%, que juntos participam com 89,4% das reservas totais do país, seguido dos estados de Santa Catarina, Pernambuco, Bahia e Paraíba, com os 10,6% restantes (SOUZA, 2001).

A indústria de fertilizantes consome cerca de 90% da produção mundial de rocha fosfática. O restante é utilizado diretamente como fertilizante, ou para a produção de complementos alimentares para animais, produtos alimentares, ou ainda para a fabricação dos fósforos elementares e seus derivados como o tripolifosfato de sódio ($Na_5P_3O_{10}$), componente importante para os detergentes (ZAPATA; ROY, 2004; JASINSKI, 2006).

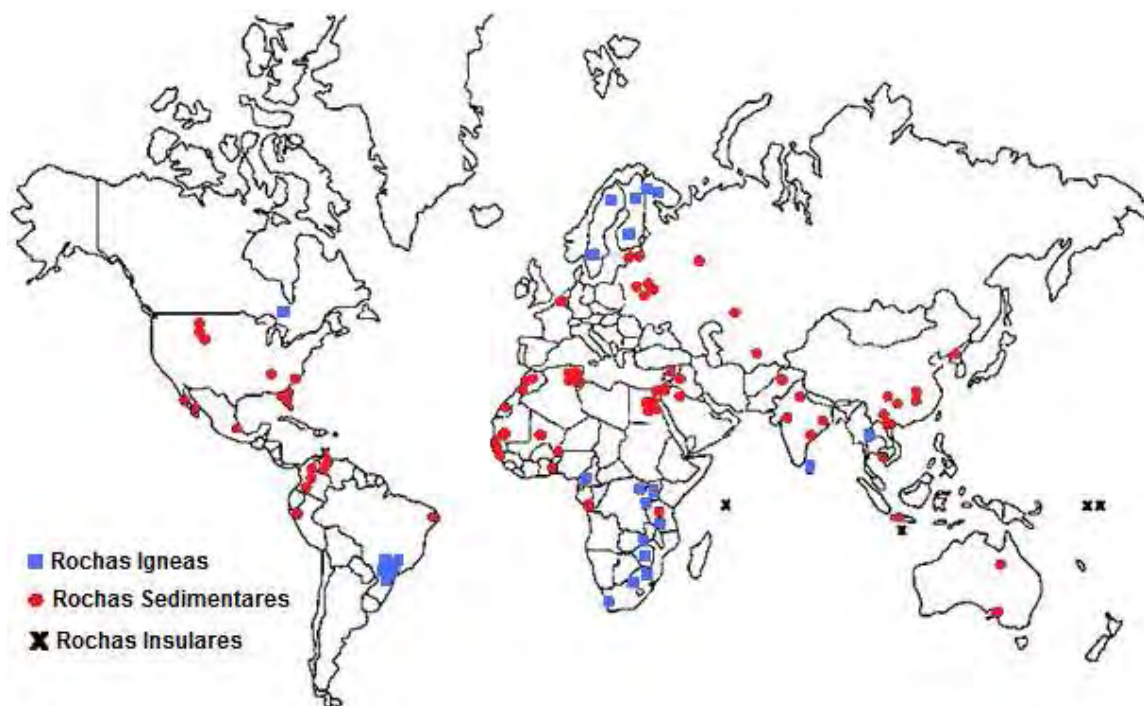


Figura 2.1 As potenciais jazidas de rochas fosfáticas no mundo (modificado de ZAPATA; ROY, 2004)

De acordo com Straaten (2002), existem cinco tipos de depósitos de rochas fosfáticas no mundo: marinhos de origem sedimentar, ígnea, metamórficos, biogénéticos e os depósitos resultantes de um processo de intemperismo. Os depósitos sedimentares são utilizados para produzir mais de 80% das rochas fosfáticas (UNIDO; IFDC, 1998). McClellan e Kauwenbergh (2004) estimam que os depósitos ígneos foram responsáveis por 10 a 20 % da produção mundial de rochas fosfáticas entre 1994 e 2004. Esses dados corroboram com Souza (2001) que afirma que esses dois depósitos são os mais importantes de ponto de vista econômico comparados, por exemplo, aos depósitos biogénéticos, que são concentrações orgânicas nitrogenadas, originadas pelos dejetos de aves. Dependendo das suas origens, as rochas fosfáticas apresentam grandes diferenças do ponto de vista mineralógico, da textura e das características químicas (UNIDO; IFDC, 1998).

Do ponto de vista mineralógico, a apatita representa o principal grupo dos mais de 200 minerais fosfáticos conhecidos. Este se encontra principalmente nas rochas primárias sedimentares, metamórficas e ígneas. Porém, pode ser observado também nas rochas que sofreram intemperismo (STRAATEN, 2002). O grupo das apatitas se subdivide em:

- Fluoroapatitas, $(Ca_{10}(PO_4)_6F_2)$, presente nas rochas ígneas e metamórficas;

- Hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), freqüente nos depósitos ígneos, metamórficos mas também nos biogénicos;
- Carbonato-hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4,\text{CO}_3)_6(\text{OH})_2$), presente principalmente nas ilhas e cavernas sob forma de produtos da decomposição de aves e morcegos;
- Francolita ($\text{Ca}_{10-x-y}\text{Na}_x\text{Mg}_y(\text{PO}_4)_{6-z}(\text{CO}_3)_z\text{F}_{0.4z}\text{F}_2$), encontrada majoritariamente nos depósitos marinhos.

Cerca de 80% das jazidas fosfatadas naturais do Brasil são em geral, de origem ígnea com presença acentuada de rocha carbonática e micáceas com baixo teor de P_2O_5 (SOUZA, 2001). As rochas destes complexos ígneos, sujeitos à alterações intempéricas superficiais são decompostas, promovendo um enriquecimento residual das apatitas, pela solubilização dos minerais associados (carbonatos das rochas, olivinas, piroxênios e biotitas das rochas ultrabásicas). Assim sendo, é necessário distinguir nas jazidas de origem ígneas as rochas frescas que se encontram em profundidade e as rochas alteradas da superfície, onde ocorreu o citado enriquecimento residual, dando origem ao denominado minério oxidado (CEKINSKI *et al.*, 1990).

Segundo Cekinski *et al.* (1990) e Souza (2001), os depósitos fosfáticos brasileiros de origem ígnea são localizados em Araxá (MG), Tapira (MG), Catalão (GO), Ouvidor (GO), Ipanema (SP), Serrote (SP), Anitápolis (SC), Jacupiranga (SP), Cajati (SP) e Maicuru (PA).

Depósitos de origem sedimentar também ocorrem no país, nos estados do Nordeste, principalmente em Pernambuco (Olinda), Bahia (Irecê) podendo ser ainda encontrado em locais de outros estados, como Minas Gerais nos municípios de Lagamar e Patos de Minas e no oeste matogrossense. Essas rochas se constituem em camadas, níveis ou extratos, mais ou menos uniformes, correspondentes ao acúmulo de fosfatos de precipitação química, com ou sem ajuda de microrganismos em fundos de lagos ou mares (CEKINSKI *et al.*, 1990; SOUZA, 2001). Tem-se conhecimento ainda de jazidas de concentração residual em Anitápolis (SC), Pirocaua e Trauíra no Maranhão e do tipo guano em Fernando de Noronha (SOUZA, 2001).

Em função do baixo teor de P_2O_5 das rochas brasileiras, existe necessidade que estas sejam beneficiadas para se obter concentrados fosfáticos com teor de fósforo adequado ao processamento químico subsequente (CEKINSKI *et al.*, 1990).

O processo de beneficiamento das rochas fosfáticas inicia-se pelas operações de lavragem, transporte por caminhões ou estradas de ferro e britagem. Esta é executada em duas fases e tem como objetivo a redução granulométrica do minério até o diâmetro máximo em torno de 32 mm. Depois, o material britado é estocado em pilhas de homogeneização. Por seguinte, este é submetido aos processos de moagem, classificação e deslamagem cujos objetivos são fragmentar o material em finas partículas, separar as partículas por tamanho, particularmente de diâmetro menor a 20 μm , através de hidrociclones. Na próxima etapa, são adicionados vários reagentes coletores e depressores ao material em suspensão. Esta é a fase de condicionamento. A polpa assim condicionada é submetida à flotação, cujo objetivo é alcançar a maior concentração possível dos compostos de fósforo pela separação de outros compostos diluentes. O processo de flotação se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. A polpa final da operação de flotação é submetida a uma operação de espessamento por um processo de desaguamento e a seguir é encaminhada à filtração, num filtro a vácuo. O material de saída do filtro, com uma umidade em torno de 10%, é submetido à secagem. Na maioria dos casos, o produto final de umidade quase nula contém entre 36 e 38% de P_2O_5 (CEKINSKI *et al.*, 1990; PORMIN, 2008). Em seguida, esse produto final é submetido às reações de ataque pelo ácido sulfúrico no processo de produção do ácido fosfórico.

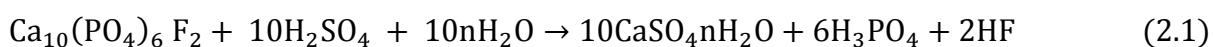
2.3 ÁCIDO SULFÚRICO E ÁCIDO FOSFÓRICO

O ácido sulfúrico é uma das principais matérias primas da fabricação dos fertilizantes fosfatados. De acordo com Norfalco (2007), sua produção mundial é de 190 milhões de toneladas por ano. Cerca de 58% dessa produção é utilizada na geração de fertilizantes. Tem-se ainda que 65% da produção mundial desse ácido é feita a partir do enxofre elementar, 16% da pirita e 19% de outras fontes. Em geral, o ácido sulfúrico é produzido a partir da oxidação catalítica do dióxido de sulfato (SO_2) em trióxido de enxofre (SO_3), o qual vai ser combinado com água para formar o ácido sulfúrico (H_2SO_4) (UNIDO; IFDC, 1998).

O ácido fosfático (H_3PO_4) é utilizado pela indústria de fertilizante principalmente para a produção dos fosfatos mono (MAP) e diamônio (DAP) (UNIDO; IFDC, 1998). Existem basicamente dois processos para produção do ácido fosfórico, por via térmica ou úmida. O primeiro é principalmente utilizado para a fabricação do fósforo elementar que, depois serve

na produção de um ácido fosfórico não destinado, na maioria das vezes, à fabricação de fertilizante.

O processo por via úmida é o método mais empregado para produção do ácido fosfático utilizado pelas indústrias de fertilizantes. Este consiste principalmente no ataque da rocha fosfática por um ácido sulfúrico (CEKINSKI *et al.*, 1990; UNIDO; IFDC, 1998). Considerando a fluoroapatita como o principal mineral da rocha fosfática, a fórmula dessa reação pode ser escrita conforme apresentado na Equação 2.1:



Onde $n= 0, 1/2, 2$ dependendo do tipo de processo de hidratação utilizado para a produção do ácido fosfático.

Essa equação representa o resultado de dois estágios. No primeiro, o ácido fosfórico (geralmente um reciclo) reage com a apatita formando o fosfato monocálcico. No segundo, o fosfato monocálcico é atacado pelo ácido sulfúrico para produzir o ácido fosfórico e um sulfato de cálcio chamado fosfogesso. Esses estágios não requerem necessariamente que as duas reações sejam reversíveis e têm costume de ocorrer simultaneamente no mesmo reator (UNIDO; IFDC, 1998).

Além do ácido fosfático e do fosfogesso, é gerado o ácido fluorídrico (HF), líquido incolor, corrosivo e muito tóxico, utilizado nos processos de purificação dos alumínio e urânios (RAUBER; KUPFERSCHMIDT, 2006). O ácido fluorídrico formado reage com o silício e outras impurezas da rocha fosfática (N, K, Mg e Al) para produzir os fluorossilicatos e outros compostos complexos (UNIDO; IFDC, 1998).

As reações de ataque da rocha pelo ácido sulfúrico podem ser realizadas através três processos distintos, originando como subprodutos os fosfogessos dihidratado, hemihidratado e anidro. O grau de hidratação é principalmente controlado pela temperatura e a concentração do ácido. Não existe atualmente um desenvolvimento comercial do processo anidro porque este requer temperaturas muito altas que geram enormes problemas de corrosão e maiores gastos energéticos (UNIDO; IFDC, 1998). Os processos de formação do fosfogesso são melhores descritos a seguir.

2.4 PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO FOSFOGESSO

2.4.1 Processo dihidratado

Por causa da sua relativa simplicidade, o processo dihidratado é o mais usado no mundo. Segundo Cekinski *et al.* (1990), este é o mais difundido no Brasil. Nesse processo, as reações de ataque desenvolvem-se em temperaturas entre 70 a 85°C, podendo ser consideradas baixas quando comparadas aos demais processos. Além de apresentar uma grande flexibilidade por usar vários tipos de rochas fosfáticas, esse processo tem como vantagens o menor investimento inicial e um baixo custo operacional. Com esse método, é possível produzir um fosfato do qual o urânio pode ser extraído. A produção de fosfogesso seco é de cerca 4,9 toneladas por tonelada de P₂O₅ produzido. Entretanto, o processo dihidratado tem como maior desvantagem o fato de produzir o fosfogesso com maior teor de impurezas, além da menor produtividade, situada entre 28 e 30% em P₂O₅ (KOULOHERIS, 1980).

Neste processo, a rocha fosfática moída é pré-misturada com um reciclo de ácido fosfático fraco. Depois um ácido sulfúrico forte é adicionado à precedente mistura, provocando uma reação exotérmica acompanhada da evaporação da água e da volatilização dos tetrafluoreto de silício (SiF₄) e ácido fluorídrico (HF). Geralmente, essa reação é realizada num reator dotado de um sistema de resfriamento a vácuo. Este serve para controlar a temperatura da reação (entre 70 a 85°C) e permitir que o SiF₄ e HF possam ser recuperados no estado líquido e utilizados para outras finalidades. Depois da reação, a mistura é deixada em repouso por 1,5 a 12 horas. Essa etapa permite a cristalização do sulfato de cálcio. A polpa resultante dessa fase contém 29% de P₂O₅ e 38 a 40% de matéria sólida. Em seguida, essa polpa é levada para um filtro. Este tem como função separar o fosfogesso do ácido fosfórico, assim como os demais materiais insolúveis, da forma mais eficiente e econômica possível. Durante o processo de filtragem, o ácido fosfórico é primeiramente coletado pela aplicação de um sistema de aspiração a vácuo e segue para a estocagem. Sua concentração é de 28 a 30% de P₂O₅. Esse ácido pode ser submetido a um processo de evaporação para aumentar sua concentração de forma a atingir 50 a 54% de P₂O₅. A polpa é lavada duas a três vezes para completar a extração de ácido fosfórico (fraco) do subproduto sólido. Esse subproduto é um fosfogesso dihidratado (CaSO₄.2H₂O). A última lavagem é feita com água limpa e o fosfogesso gerado é armazenado em depósitos. Varias soluções fracas de ácido fosfático são coletadas nas seções

de lavagem. A última é utilizada para a lavagem da etapa anterior. A solução obtida na primeira etapa é finalmente redirecionada para o reator onde ela se mistura novamente com a rocha fosfática moída e o processo reinicia-se (UNIDO; IFDC, 1998).

2.4.2 Processo hemihidratado

Kouloheris (1980) reporta que o processo hemihidratado é muito empregado na Europa, no Japão e na África. Esse processo ocorre em duas fases distintas. Portanto, é necessário que haja uma separação do reator em dois compartimentos. A razão volumétrica entre os tanques de reação é de 2:1. A primeira zona de reação ainda é dividida em 2 compartimentos idênticos 1A e 1B. A rocha fosfática é colocada no compartimento 1A. O ácido sulfúrico e o ácido fosfático fraco proveniente da filtragem são colocados no reator 2. A polpa contida nesse reator é reciclada, depois resfriada e enviada para o compartimento 1A. A rocha fosfática presente nesse compartimento reage com íons sulfatos em condições controladas. A polpa do tanque 1A é encaminhada para o tanque 1B. O calor liberado é removido por um sistema de resfriamento a vácuo de forma a manter a temperatura de reação entre 98 a 100°C. O ácido fosfático obtido cujo teor em P_2O_5 situa-se entre 40 a 50% é separado do fosfogesso hemihidratado por um filtro a vácuo horizontal. O ácido extrato da filtragem é diretamente armazenado e já pode ser utilizado como concentrado fosfático, sem precisar passar por uma fase de clarificação, de remoção de sólidos ou de evaporação. Por seguinte, a polpa é submetida a três estágios de lavagem. Da mesma forma que no processo dihidratado, na última lavagem é utilizada uma água limpa. O filtrado dessa etapa contém uma baixa concentração em ácido e é utilizado para a lavagem anterior. A solução recolhida na primeira lavagem é redirecionada para o reator 2. O fosfogesso hemihidratado gerado pelo processo é armazenado em pilhas (UNIDO; IFDC, 1998).

Por não necessitar de uma fase de evaporação, esse processo apresenta a vantagem de eliminar os gastos que seriam feitos para a aquisição e a manutenção de um equipamento suplementar para a evaporação. Como outra vantagem, observa-se que o processo hemihidratado produz um ácido mais puro, além de permitir um melhor aproveitamento da rocha fosfática. Para uma tonelada de P_2O_5 , são produzidas 4,3 toneladas de fosfogesso. Em fim, esse processo é mais rápido do que o precedente (UNIDO; IFDC, 1998).

Apesar do seu bom rendimento, o processo hemihidratado apresenta algumas desvantagens que provavelmente limitam sua popularidade em comparação ao processo dihidratado. Dentre estas, observa-se que os cristais hemihidratados são mais finos que os dihidratados, o que dificulta bastante a filtração da polpa hemidratada. Nesse processo, a retenção do ácido fosfático na polpa, tanto na sua forma solúvel quanto cristalizada, é maior por causa de uma concentração em P_2O_5 mais elevada. Isto conduz a uma maior perda em ácido ou a maiores gastos em água de filtração. Por outro lado, o fosfogesso hemihidratado, por ser uma forma de sulfato de cálcio instável, tende sempre a se transformar em fosfogesso dihidratado antes da filtração. Essa situação é ainda mais agravante durante a lavagem por causa da hidratação do fosfogesso, o que gera problemas no dimensionamento dos equipamentos. Em fim, por causa das altas temperaturas envolvidas nas reações e da elevada concentração de P_2O_5 , ocorre uma maior corrosão dos equipamentos, em particular dos agitadores e das bombas (UNIDO; IFDC, 1998).

2.4.3 Processos hemidihidratados

Existem genericamente três processos hemidihidratados: sem filtração intermediária, com filtração intermediária e dihidratado-hemihidratado. Em geral, esses processos tiram proveito das vantagens dos processos dihidratado e hemihidratado.

O processo hemidihidratado sem fase de filtração intermediária ou hemihidratado com cristalização é amplamente utilizado nos países da Ásia oriental e Oceania. O formato das plantas desse processo é parecido ao do processo dihidratado. A diferença é que o reator onde ocorre o ataque funciona nas condições que permitem a formação de um fosfogesso hemihidratado. Os reatores seguintes funcionam de forma a favorecer a geração de um fosfogesso dihidratado por hidratação do hemihidratado. O objetivo dessa fase é obter cristais dihidratados durante a filtração. O ácido fosfórico produzido é ligeiramente menos concentrado do que o obtido no processo dihidratado, mas o fosfogesso produzido é mais puro e, portanto de maior uso como material de construção ou na indústria cimentaria. Esse processo apresenta uma vantagem importante para países onde os recursos em gesso natural são escassos como no Japão. O custo elevado e a complexidade desse processo são suas principais desvantagens (UNIDO; IFDC, 1998).

No processo hemihidratado-dihidratado com filtragem intermediária, a primeira fase é idêntica ao processo hemihidratado, incluindo a recuperação do ácido fosfático por filtragem. Depois dessa fase, o fosfogesso hemihidratado é descarregado do filtro e depois enviado para os tanques de agitação. As operações são controladas de forma a garantir a transformação total do fosfogesso hemihidratado em dihidratado assim como sua cristalização. A fase de transformação é acelerada pela adição de uma pequena quantidade de ácido sulfúrico na polpa. Quase todo o P_2O_5 precipitado com o fosfogesso hemihidratado é liberado na fase líquida. Por seguinte, o fosfogesso dihidratado é filtrado e a polpa lavada com a água do processo. O filtrado e o P_2O_5 recuperado são redirecionados para o estágio de reação hemihidratada e usados como água da última lavagem. A filtragem intermediária aumenta o custo e a complexidade da produção, mas essa desvantagem é compensada pela eliminação da fase de concentração por causa do alto teor de P_2O_5 situada em torno de 40%. O fosfogesso obtido é mais puro do que o obtido no processo dihidratado e hemihidratado e pode ser utilizado na produção dos materiais de construção (UNIDO; IFDC, 1998).

Já no processo dihidratado-hemihidratado, as primeiras reações são realizadas nas condições dihidratadas, sem intenção de produzir um ácido fosfórico de alta concentração porque as etapas sucessivas de desidratação necessitam entre 20 a 30% de P_2O_5 e 10 a 20% de H_2SO_4 . Uma centrífuga é instalada junto com o filtro para produzir uma fina espessura de polpa de fosfogesso e corrigir as concentrações. No final do processo é possível produzir um ácido sulfúrico com 35% de P_2O_5 , comparado ao máximo de 32% obtido no processo dihidratado. Esse processo apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que os hemihidratado-dihidratado exceto o fato que o fosfogesso hemihidratado produzido tem uma maior aplicabilidade (UNIDO; IFDC, 1998).

2.5 CARACTERÍSTICAS DO FOSFOGESSO

As características do fosfogesso dependem da natureza das rochas fosfáticas, do tipo de processo de produção do ácido fosfático, da eficiência da planta, do método de disposição, da idade, da localização e do tamanho das áreas onde este está estocado (TAYIBI *et al.*, 2009). As principais características que podem ser avaliadas são as químicas, as radiológicas e as físicas.

2.5.1 Características químicas

É necessário entender a composição química do fosfogesso para uma completa avaliação dos seus impactos ambientais, um melhor planejamento do seu armazenamento e suas possíveis utilizações (RUTHERFORD; DUDAS; AROCENA, 1995). Na sua forma mais comum, o fosfogesso é majoritariamente construído pelo sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e contém certas impurezas. Estas são principalmente constituídas por materiais orgânicos, resíduos de ácidos fosfático e sulfúrico, fluoretos, ferro (Fe), metais pesados como o arsênico (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), manganês (Mn) e radionuclídeos (BERISH, 1990; KUMAR, 2002). A natureza química dessas impurezas é primeiramente uma função da composição da rocha fosfática utilizada na fabricação do ácido fosfórico, das condições de reação com o ácido sulfúrico, de separação dos produtos e dos equipamentos utilizados (RUTHERFORD; DUDAS; AROCENA, 1995; CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998).

A Tabela 2.1 apresenta a composição química de fosfogessos dihidratados produzidos em algumas regiões do planeta: Balikesir na Turquia (DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2006), Guizhou Wengfu na China (MIN; JUESHI; YING, 2008), Wizów na Polônia (WOLICKA, 2008), Catalão no Brasil (CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998) e Sfax na Tunísia (FELFOUL *et al.*, 2002). Observa-se que independentemente da região, o fosfogesso dihidratado apresenta praticamente a mesma constituição química, marcada pela predominância do óxido de cálcio (CaO) e trióxido de enxofre (SO_3).

De acordo com Felfoul *et al.* (2002) e Ajam *et al.* (2009) as impurezas do fosfogesso podem ser classificadas em dois grupos:

- Impurezas solúveis. Estas são os sais ou ácidos não eliminados na fase de lavagem do processo de produção do ácido fosfórico. Nesse grupo, encontram-se principalmente o P_2O_5 e os fluoretos solúveis. Esses ácidos são responsáveis pelo pH relativamente baixo do fosfogesso.
- Impurezas insolúveis. Estas são constituídas pelos minerais não transformados durante a reação de ataque (silício, carbono orgânico, resíduo decomposição de espécies vivas) e dos compostos obtidos por reações secundárias (P_2O_5 cristalizado e oligoelementos e principalmente os metais pesados).

Tabela 2.1. Composição química dos fosfogessos dihidratados produzidos na Turquia (DEGIRMENCI; OKUCU; TURABI, 2006), China (MING *et al.*, 2008), Polônia (WOLICKA, 2008), Brasil (CASTILHOS *et al.*, 1998) e Tunísia (FELFOUL *et al.*, 2002).

Compostos	Teor (%)				
	Turquia	China	Polônia	Brasil	Tunísia
SiO ₂	3,44	1,25	0,65	0,64	0,50
CaO	32,04	29,05	29,6	38,15	32,50
SO ₃	44,67	42,19	42,2	49,36	44,00
Al ₂ O ₃	0,88	0,43	0,2	0,59	0,10
Fe ₂ O ₃	0,32	0,21	0,14		0,10
P ₂ O ₅	0,5	3,5	2,2	0,35	0,65
Na ₂ O+K ₂ O	0,13	0,51	0,50	0,00	-
F	0,79	-	0,50	0,18	1,20
Outras impurezas	17,23	22,86	24,01	10,73	20,95

A presença de impurezas no fosfogesso vem limitando seu reaproveitamento em diversas áreas, além de apresentar potenciais riscos ambientais. De acordo com Singh (2005), as mais prejudiciais para uma aplicação direta do fosfogesso em construção civil são os P₂O₅ (Ca(H₂PO₄)₂, Ca₂(HPO₄)₂ e Ca₃(PO₄)₂), os flúores (NaF, Na₂SiF₆ e Na₃AlF₆) e as matérias orgânicas. Os teores de metais pesados nos fosfogessos são geralmente baixos, porém quando esses são encontrados em nível de concentrações acima das recomendações técnicas, tornam-se poluente oferecendo riscos como contaminação de solos e mananciais de água que estejam próximos dos depósitos de fosfogesso (CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998; RUFO, 2009). De todas as impurezas do fosfogesso, os radionuclídeos são provavelmente os mais preocupantes do ponto de vista ambiental.

2.5.2 Características radiológicas

A radioatividade é um fenômeno natural durante o qual os núcleos atômicos instáveis chamados rádioisótopos se desintegram espontaneamente liberando energia em diversas formas de radiações para se transformar em núcleo atômico mais estável e perdendo assim uma parte da sua massa. As radiações emitidas podem ser de raios alfa (liberação de carga elétrica positiva), beta (carga negativa) ou gama (radiação eletromagnética).

Até 1964, o Curie (Ci) era a principal unidade radioativa. Um Curie corresponde ao número de desintegração de um grama de rádio puro. Isso equivale a cerca de $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações atômicas por segundo. Atualmente, essa unidade foi substituída pelo Becquerel (Bq) que representa uma desintegração por segundo. Conseqüentemente, $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. A atividade de uma amostra radioativa é definida como seu número de desintegração por segundo. No Sistema Internacional (SI) o Becquerel é a unidade de medida da atividade radioativa.

Existem duas principais fontes radiativas naturais: as partículas cósmicas de altas energias que são filtradas pela atmosfera e os radionuclídeos originados da crosta terrestre (UNSCEAR, 2000). Dos radionuclídeos de origem cósmica os mais abundantes são ^{14}C , ^{10}Be e ^{26}Al enquanto na crosta terrestre, os mais comuns são o potássio-40 (^{40}K) e os radioisótopos das séries naturais do urânio, actínio e tório, assim como os núcleos mães ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th e os seus produtos sucessivos de decaimento alfa ou beta (AZOUAZI *et al.*, 2001).

As rochas fosfáticas apresentam naturalmente uma alta radioatividade e esta provém principalmente dos radionuclídeos ^{238}U e ^{232}Th e seus produtos de decaimento (TAYIBI *et al.* 2009). As Figuras 2.2 e 2.3 mostram, respectivamente, as séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th .

Durante o processo de ataque da rocha fosfática pelo ácido sulfúrico, o equilíbrio radioativo da rocha é rompido e ocorre uma redistribuição dos radionuclídeos entre o ácido fosfórico e o fosfogesso: cerca de 80% de ^{226}Ra concentra-se no fosfogesso enquanto 86% de ^{238}U e 70% de ^{232}Th orientam-se para o ácido fosfórico (BERISH, 1990; RUTHERFORD; DUDAS; AROCENA, 1995; TAYIBI *et al.*, 2009). Afifi *et al.* (2009) mostraram que a radioatividade do fosfogesso é principalmente devida ao radionuclídeo ^{226}Ra e ^{210}Pb .

De acordo com Rutherford, Dudas e Arocena (1995), o rádio-226 com 1690 anos de meia vida é a maior fonte radioativa do fosfogesso a longo prazo. O gás radônio-222, seu primeiro produto na série de decaimento, é a causa da maior preocupação para saúde humana do uso do fosfogesso, pois sua inalação foi associada ao desenvolvimento de doenças cancerígenas.

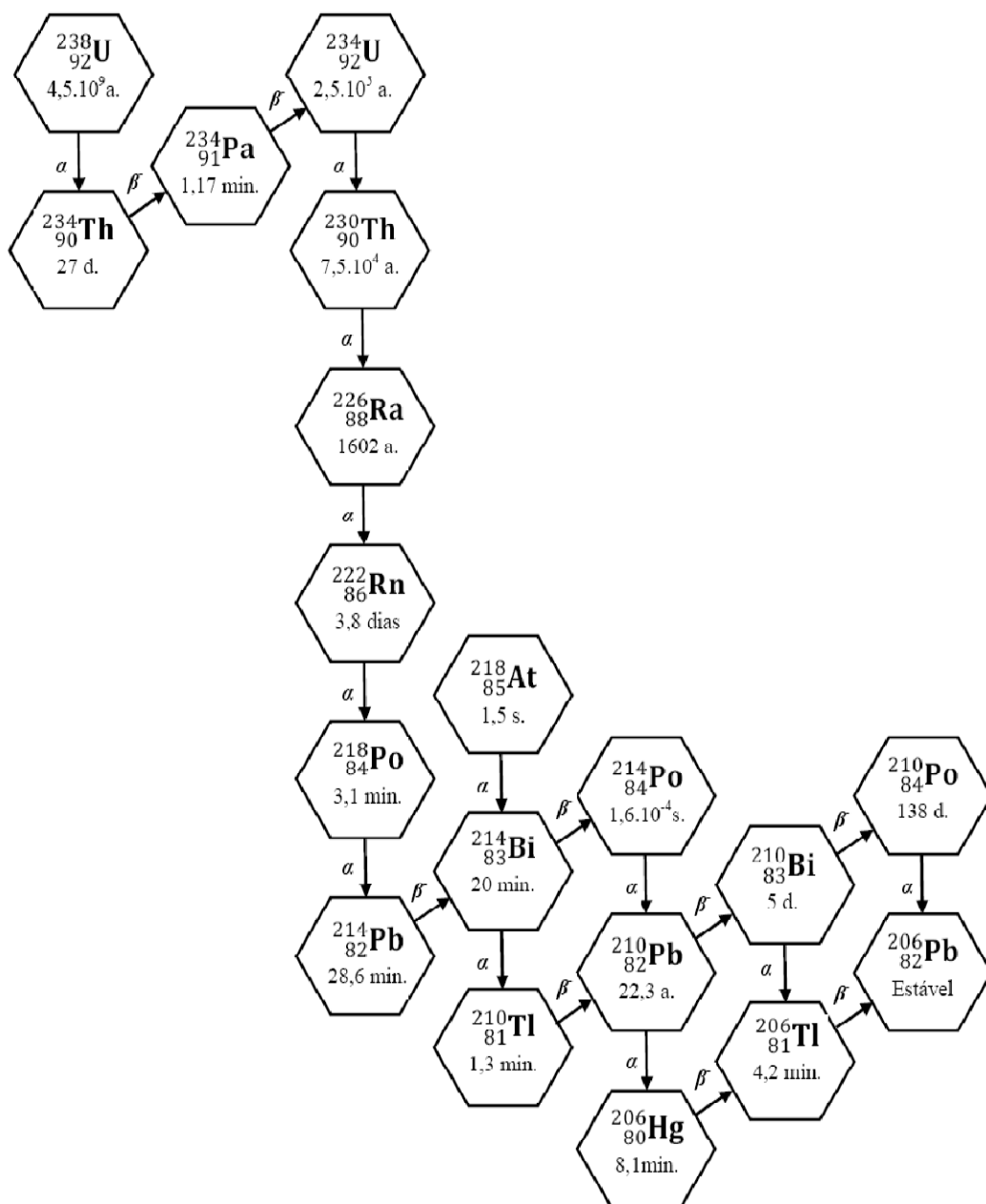


Figura 2.2. Série de decaimento da ^{238}U (Modificado de TOSAKA, 2008)

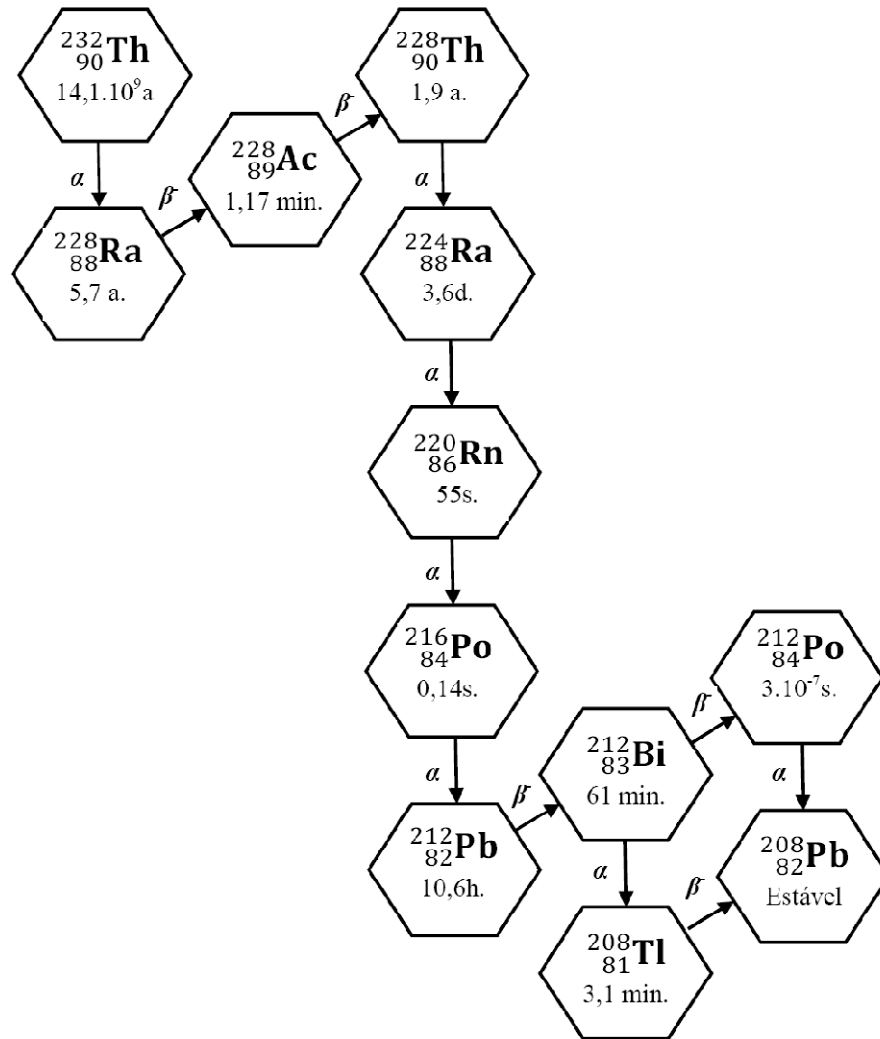


Figura 2.3. Série de decaimento do ^{232}Th (Modificado de TOSAKA, 2008)

2.5.3 Características físicas

O fosfogesso é um resíduo sólido, poeirento e geralmente de cor amarela. Recente produzido, seu teor de umidade situa-se entre 25 e 30% (UNIDO; IFDC, 1998). Uma vez o fosfogesso depositado, essa umidade varia de acordo com o tipo de estocagem (a úmido ou a seco), a idade das pilhas, as condições meteorológicas do local e de drenagem das áreas de armazenamento (SILVA; CIPRIANI; TADDEI, 2002; TAYIBI *et al.*, 2009).

A condutividade hidráulica vertical nas pilhas de fosfogesso varia entre 1×10^{-5} e 2×10^{-5} m/s (ROUIS; BALLIVY; BENSALAH, 1990; TAYIBI *et al.* 2009; AJAM *et al.*, 2009). O ensaio de permeabilidade realizado por Rufo (2009) com o fosfogesso de Catalão (GO) compactado

nos seus valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, mostrou que este apresenta uma condutividade hidráulica de $2,4 \times 10^{-6}$ m/s.

A solubilidade do fosfogesso depende do pH da água em que está imerso. Numa água desmineralizada, essa solubilidade está em torno de 2,4g/l (FELFOUL *et al.*, 2002). Os resultados dos ensaios feitos por Castilhos Jr. *et al.*(1998) e Mesquita (2007) com o fosfogesso produzido na região de Catalão (GO), mostraram que a solubilidade deste varia entre 2,4 e 2,8 g/l. Segundo Tayibi *et al.* (2009), essa propriedade do fosfogesso é aproximadamente igual a 4,1g/l nas águas salgadas.

As medidas feitas por Rutherford, Dudas e Arocena,(1995) nas pilhas de fosfogesso da Flórida, do Idaho nos Estados Unidos e do Togo na África, assim como os resultados obtidos por Silva, Cipriani e Taddei (2002) com o fosfogesso de Catalão no Brasil mostraram que o pH do fosfogesso varia entre 2,7 e 5,6. Isso faz do fosfogesso um material não corrosivo e portando, não perigoso de acordo com as normas NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004a) e da “U.S. Environmental Protection Agency” (USEPA, 2009). Essas normas definem como perigoso todo material de pH inferior ou igual a 2 ou superior ou igual a 12,5. Ressalta-se ainda que o pH do fosfogesso geralmente aumenta com a idade da pilha. O fosfogesso analisado por Mesquita (2007) apresentou um pH de 6,88.

Os valores de massa específica dos grãos de fosfogesso encontrados na literatura internacional variam entre 2,3 e 2,5 g/cm³ (CHANG; CHING; HO, 1989; FELFOUL *et al.*, 2002; TAYIBI *et al.*, 2009). Entretanto, esses valores são menores que os obtidos por Mesquita (2007) e Rufo (2009) para o fosfogesso da região de Catalão-GO, situando-se entre 3,3 e 3,6 g/cm³. Essa diferença pode ser explicada pelo tipo de rochas fosfáticas utilizadas, sendo que na região de Catalão são exploradas rochas de origem ígnea, enquanto os depósitos sedimentares são os mais explorados nos outros países.

Segundo Silva, Cipriani e Taddei (2002), Dueñas *et al.* (2007) e Tayibi *et al.* (2009), a massa específica aparente do fosfogesso varia entre 0,9 e 1,7 g/cm³.

De acordo com Chang, Ching e Ho (1989), Felfoul *et al.* (2002), Ajam *et al.* (2009) e Tayibi *et al.* (2009), o fosfogesso tem uma granulometria fina e pode ser classificado como silte, por apresentar a maioria das suas partículas com diâmetros situados entre 250µm e 45µm. Além

disso, conforme observado por Mesquita (2007) e Rufo (2009), quando é realizado o ensaio de sedimentação com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, ocorre um pequeno aumento no teor de argila e uma diminuição no teor de silte e areia.

A morfologia do fosfogesso mostra que esse resíduo é essencialmente constituído por cristais tabulares de sulfato de cálcio dihidratado, cujo comprimento varia entre 10 e 300 μm com média situada entre 50 e 60 μm e uma relação largura/comprimento em torno de 1/8 (CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998; FELFOUL *et al.*, 2002; AJAM *et al.*, 2009; TAYIBI *et al.*, 2009). Nota-se também a presença de pequenas partículas (diâmetro inferior a 10 μm), sendo a maioria delas grudadas na superfície dos cristais de sulfato de cálcio. Essas partículas são principalmente impurezas contidas no fosfogesso (CASTILHOS Jr. *et al.*, 1998). A Figura 2.4 mostra a microscopia eletrônica de varredura (MEV) de um fosfogesso produzido na região de Sfax na Tunísia, onde é possível observar a existência dos cristais e das impurezas.

Os ensaios feitos por Castilhos Jr. *et al.* (1998), Degirmenci, Okucu e Turabi (2007) e Mesquita (2007) indicaram que o fosfogesso é um material não plástico.

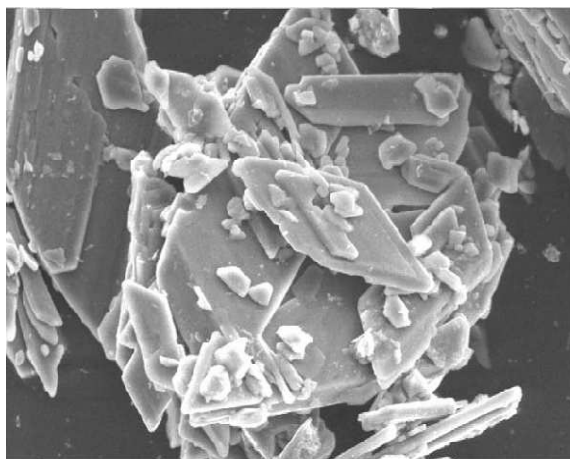


Figura 2.4 Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de um fosfogesso produzido na região de Sfax na Tunísia. Escala: — 100 μm (AJAM *et al.*, 2009).

2.6 UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO

Os problemas relacionados ao armazenamento do fosfogesso e seus potenciais riscos ambientais incentivaram pesquisadores a encontrarem aplicações econômicas e ambientalmente corretas desse resíduo. Por ser construído majoritariamente de sulfato de

cálcio hidratado, o fosfogesso tem despertado interesse cada vez maior em vários ramos da atividade industrial, em particular na agricultura, indústria de enxofre e do cimento, construção civil e na geotecnia. Em algumas delas, a utilização do fosfogesso tem mostrado algumas limitações técnicas quando não submetido a um processo de purificação. A seguir são apresentados alguns detalhes dessas utilizações.

2.6.1 Agricultura

Nessa área, os solos básicos (com teor elevado de sódio) são considerados problemáticos, pois tendem a se endurecer, limitando assim a penetração das águas de chuvas assim como o desenvolvimento das raízes das plantas. Para tornar os solos menos básicos, é comum utilizar o fosfogesso. Uma vez adicionado, o fosfogesso aumenta a porosidade do solo e facilita de fato, a infiltração da água. Essa propriedade é também válida para tratar os solos altamente intemperizados e os de regiões áridas. O fosfogesso pode também ser utilizado nas regiões onde a irrigação é feita com águas salgadas, para lavar os excessos de sais e impedir que os solos se tornem básicos. Essa técnica foi utilizada, por exemplo, na Holanda, para recuperar os solos salgados deixados após a construção de diques para fins agrícolas (LLOYD, 1985; SUMNER *et al.*, 1986). Além disso, o fosfogesso pode ser utilizado para reduzir a quantidade de Al nos solos ácidos (SUMNER *et al.*, 1986).

Por outro lado, é possível utilizar o fosfogesso para reduzir a concentração de alguns íons metálicos no solo por um mecanismo de fixação ou de promoção das condições que favorecem a lixiviação desses íons. Essa alternativa é valiosa principalmente nas regiões onde as práticas agrícolas e de fertilização conduziram a uma intoxicação das plantas por causa de altas concentrações iônicas no solo (LLOYD, 1985).

O fosfogesso é também utilizado como fonte de enxofre e cálcio para as plantas, sendo que esses elementos são de grande importância para o crescimento das plantas. O enxofre é assimilável pelas plantas em forma de molécula de sulfato e sua presença não altera o pH no solo.

Apesar do grande potencial de uso do fosfogesso na agricultura, alguns problemas dificultam seu emprego. Geralmente, esse subproduto encontra-se úmido, o que dificulta bastante sua

manipulação. Quando seco, seu manejo é melhorado, mas sua viabilidade econômica é reduzida. Por outro lado, por conter radionuclídeos, existe a preocupação de estes serem absorvidos pelas plantas e por seguinte transmitidos ao ser humano. Até o momento, não existe comprovação científica se isto ocorre ou não.

2.6.2 Produção de enxofre

A conversão do fosfogesso em enxofre é sem dúvida de grande interesse para as indústrias de fertilizantes. Esse interesse vem motivando alguns pesquisadores a elaborarem novas técnicas para a produção do enxofre a partir do fosfogesso.

Segundo Lloyd (1985), todos os processos de produção do enxofre a partir do fosfogesso necessitam no mínimo de um combustível para aquecer o fosfogesso durante a reação e uma fonte de carbono para reagir com o esse resíduo. As reações básicas para produzir o enxofre nessas condições estão apresentadas nas Equações 2.2 a 2.5:



A Equação 2.2 descreve a tratamento térmico do fosfogesso. O sulfeto de cálcio (CaS) sólido presente no reator é imerso numa água em ebulição, onde este reage com o dióxido de carbono (Equação 2.3). Por seguinte, o sulfeto de hidrogênio (H₂S) obtido é queimado pelo dióxido (Equação 2.4). Finalmente, o sulfeto de hidrogênio reage com o dióxido de sulfato para produzir o enxofre (Equação 2.5).

2.6.3 Indústria do cimento

Exceto pelas suas impurezas, o fosfogesso (CaSO₄·2H₂O) apresenta a mesma composição química que o gesso natural. Este é de uso comum como aditivo na indústria cimenteira. Por esse motivo, a substituição do gesso natural pelo fosfogesso vem sendo pesquisada cada vez

mais. Quanto mais escassas as jazidas de gesso e próximas as usinas de fertilizantes, maior o interesse para tais investigações.

Nesse ramo, por exemplo, Kacimi *et al.* (2006) observaram que a adição do 10% de fosfogesso ao cimento permite a clinquerização total do cimento com baixas temperaturas, 1200°C ao invés de 1470 °C como ocorre no processo tradicional. Isso torna o processo 25% mais eficiente e aumenta a vida útil dos fornos. Além disso, foi observado que, em comparação ao método tradicional, a utilização do fosfogesso preservou perfeitamente a estrutura cristalina da fase silicata, o que contribuiu para o aumento das propriedades físicas e mecânicas do cimento.

Mun *et al.* (2007) experimentaram um cimento não convencional a base de mistura fosfogesso (dihidratado e anidro), resíduos de cal e escórias granuladas de alto-forno, um subproduto da indústria metalúrgica. Primeiramente, o fosfogesso foi lavado por 0,5% de leite de cal a 20°C durante 5min. Em seguida, o fosfogesso foi desidratado a 80°C. Depois, uma parte deste foi calcinada a 450°C para o transformar em anidro. Os materiais obtidos foram misturados com a escória granulada do alto-forno para formar o cimento não convencional. Para os cimentos feitos com fosfogesso dihidratado ou resíduos de cal, foram observadas baixas resistências iniciais e elevadas resistências finais. Quando não é necessário obter grandes resistências iniciais, essas misturas são economicamente mais viáveis que aquelas realizadas com o fosfogesso anidro. Foi observado também que, embora as resistências iniciais à compressão obtidas com o cimento não convencional fossem muito comparáveis às encontradas com o cimento Portland convencional, as resistências finais foram atingidas com idade maior devido às reações contínuas entre a escória e o fosfogesso.

2.6.4 Construção civil

Diversos produtos e misturas de materiais foram estudadas por pesquisadores para fins de construção civil. Para limitar os efeitos deletérios das impurezas tanto sobre a qualidade dos materiais obtidos quanto para a saúde humana, o fosfogesso foi geralmente submetido a um processo de purificação antes do seu uso.

Sendo assim, Kumar (2002) investigou as propriedades mecânicas das misturas de cinzas volantes, cal e fosfogesso calcinado visando sua utilização na fabricação de alvenarias de baixos custos. Depois da moldagem, as alvenarias foram deixadas em cura durante uma semana para que ganhassem resistências necessárias para suas manipulações. Em seguida, foram submetidas a um teste de durabilidade. Para isso elas foram colocadas num ambiente agressivo de solução de sulfato a $25\pm 2^{\circ}\text{C}$. Algumas amostras de composições idênticas foram curadas na temperatura ambiente ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) e outras a 50°C . Um dia antes de serem submetidos ao ensaio de compressão simples, as amostras foram retidas da água. As amostras foram ensaiadas depois de tempos de cura de 24, 48, 72 e 96 dias. Para as amostras curadas na temperatura ambiente, foi observado um aumento da resistência com o tempo de cura. Porém, as maiores variações de resistências foram observadas apenas nos primeiros dias. Para uma proporção fixa de cinzas volantes, foi observado um aumento da resistência com o aumento do teor de fosfogesso. Foi verificado também que as resistências à compressão das alvenarias diminuía com o aumento do teor de cinzas volantes. Porém, a resistência à compressão das amostras com maior concentração de cinzas volantes ($5,9 \text{ N/mm}^2$) foi superior, ao limite exigido para tijolos de argilas na Índia ($3,5 \text{ N/mm}^2$). Para o mesmo tempo de cura, as alvenarias curadas a 50°C apresentaram melhor desempenho em comparação às curadas na temperaturas ambiente. As alvenarias com maior teor de fosfogesso apresentaram uma melhor durabilidade. Isso possibilita o uso de tais elementos nas fachadas. Resultados parecidos foram obtidos por Kumar (2002) e Min, Jueshi e Ying (2008).

Ainda nessa área, Ajam *et al.* (2009) estudaram a incorporação do fosfogesso na fabricação de tijolos a base de argila. O objetivo dessa pesquisa era de substituir a areia tradicionalmente misturada à argila para produzir esse tipo de tijolo. O fosfogesso foi adicionado nas proporções de 5, 15, 30 e 40%. Foi realizada uma mistura com 10% de areia e de 15% de fosfogesso para limitar as trincas e os riscos radioativos do produto. Os tijolos foram aquecidos até 850°C durante 14 horas. No final do processo, os autores observaram que apenas a mistura com 40% de fosfogesso trincou. Também foi realizado um teste de absorção de água. Nesse teste foi observado um aumento do coeficiente de absorção com o teor de fosfogesso. Entretanto, o valor máximo obtido (13,4%) foi inferior ao limite das normas tunisianas (15%). Da mesma forma, todos os tijolos apresentaram uma resistência maior que o limite de 2,5 MPa permitido pelas referidas normas. Esse estudo validou a aplicação desse tipo de produto na construção civil. Porém, os autores recomendam que sejam

preferencialmente utilizados os tijolos com mistura de fosfogesso (15%), areia (10%) e argila (75%) de forma a limitar os riscos de trincas.

No Brasil, Kanno, Rosseto e Ferreira (2008) desenvolveram um método para transformar o fosfogesso em produto cerâmico de elevada resistência à compressão. Esse método, chamado Umedecimento Compactação e Secagem (UCOS), consiste em passar o fosfogesso numa fase de pré-tratamento (desidratação) durante a qual ele é aquecido até as condições hemihidratadas. Por seguinte, o fosfogesso hemihidratado obtido é umedecido e colocado num molde no qual é submetido a uma compressão. O molde pode ser de diversos formatos, dependendo da orientação que se quer dar ao produto final. A compressão faz com que as partículas de fosfogesso se aglomerem e formem um corpo rígido e resistente. O tempo de compressão é de alguns minutos e, em seguida, o material é retirado dos moldes para secagem e uso. Essa fase leva em torno de 30 minutos. Esse método permite que o fosfogesso seja utilizado em construção civil até como elemento estrutural, já que as resistências obtidas (90MPa) foram superiores aos valores médios encontrados para o concreto (50MPa).

2.6.5 Pavimentação

Por ser uma área da indústria da construção que emprega enormes quantidades de materiais, a introdução do fosfogesso em pavimentação sempre despertou muitos interesses. Os trabalhos pioneiros neste sentido foram implementados pelo “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” (LCPC) na França e pelo “Florida Institute of Phosphore Research” (FIPR) nos Estados Unidos, no final da década 70. No Brasil, os estudos sobre o uso do fosfogesso em pavimentação iniciaram-se na Universidade de São Paulo, em 1995 (PARREIRA; KOBAYASHI; SILVESTRE, 2003). Aplicado sozinho, o fosfogesso tem apresentado características geotécnicas ruins além de grande sensibilidade a água.

Os trabalhos realizados por Parreira, Kobayashi e Silvestre (2003) tiveram como objetivo avaliar a influência do tipo de cimento na resistência à compressão simples e expansão das misturas de fosfogesso estabilizado com cimento visando sua utilização na construção de pavimentos. Para isso, foram utilizados cimentos com diferentes teores de C_3A : CP III-40 (2,4% C_3A), CP II E-32 (5,0% C_3A) e CP V-ARI (7,5% C_3A). As amostras foram

compactadas com as energias Protor normal e modificado e por seguinte, curadas durante 1, 3, 7, 28 e 84 dias na temperatura de 24°C e umidade relativa igual a 100%. Os resultados dessa pesquisa mostraram que as resistências à compressão das misturas aumentam com o teor de cimento, o tempo de cura e a energia de compactação. Foi observado que as amostras compactadas na energia modificada apresentaram resistências até 130% maiores que para aquelas compactadas na energia normal. Os autores verificaram que o aumento da porcentagem de C₃A nos cimentos reduz a resistência das misturas com o tempo de cura. Os valores de resistência obtidos foram aproximadamente iguais à metade dos obtidos para as misturas tradicionais de solo laterítico estabilizado com cimento. Quanto à expansão, os resultados mostraram que as energias de compactação não têm uma importância significativa nas misturas. O aumento do teor de C₃A nos cimentos reduziu a expansão das amostras. Os autores ressaltam que as expansões medidas foram da mesma ordem de grandeza que as dos materiais tradicionalmente utilizados em pavimentação.

Degirmenci, Okucu e Turabi (2007) estudaram a estabilização de dois solos turcos com fosfogesso, cimento e cinzas volantes. As misturas foram curadas durante 2 dias numa temperatura de 21°C. Foi observado que as estabilizações com cimento, e com cimento e fosfogesso reduziram a plasticidade e aumentavam os limites de liquidez dos solos. As densidades secas aparentes máximas aumentaram com o teor de cimento e de fosfogesso, enquanto a umidade ótima diminuiu. Já para os solos estabilizados com cinzas volantes foi notada uma diminuição significativa da plasticidade apenas para o solo altamente plástico. Por outro lado, as densidades secas aparentes e as umidades ótimas diminuíram com o aumento das cinzas volantes e do fosfogesso. Quanto à resistência à compressão simples, os valores obtidos para as misturas foram todos superiores aos do solo não estabilizado. Além disso, foi percebido o aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de cimento.

O trabalho de Shen, Zhou e Zhao (2007) investigou as características mecânicas das misturas fosfogesso, cinzas volantes e cal visando sua utilização na construção das camadas de bases de pavimentos semi-rígidos. O estudo tinha o objetivo de comparar o desempenho de tais misturas com as de cinzas volantes-cal e solo-cimento tradicionalmente utilizadas em pavimentação na China. Para os ensaios de compressão, as misturas foram moldadas num molde cilíndrico e depois, deixadas em cura em sacos plásticos na temperatura de 25±2°C. As amostras foram imersas na água 24 horas antes da realização do ensaio. Os resultados permitiram ver que as misturas solo-cimento são as que apresentaram as piores resistências à

compressão simples para todas as idades. As misturas de fosfogesso, cinzas volantes e cal tiveram as maiores resistências para todas as idades. Além disso, essas misturas apresentaram as maiores resistências iniciais.

Contribuindo para o uso do fosfogesso na prática rodoviária brasileira, Mesquita (2007) estudou as misturas de solos tropicais finos da região de Goiânia-GO com um fosfogesso dihidratado produzido no município de Catalão-GO. A autora observou que as misturas com 80% de solo e 20% de fosfogesso apresentavam melhores resistências e podiam ser utilizadas na construção de aterros, camadas de reforço de subleito até sub-base de pavimentos.

O trabalho de Faria (2007) mostrou que a adição da cal às referidas misturas aumentava consideravelmente suas resistências. Contudo, ao checar a viabilidade mecânica dessas misturas com um solo argiloso plástico da região de Catalão-GO, Rufo (2009) observou que havia formação de etringita, acompanhada de uma queda de resistência, e um aumento exagerado da expansão (18,5 a 29,5%) e dos limites de consistência ao acrescentar água na mistura de solo-fosfogesso-cal. Esses resultados inviabilizaram o uso de solos plásticos nas referidas misturas.

Na Flórida (EUA), Kenlay e Chang (1988) e Ho *et al.* (1988) testaram pistas a base de misturas de fosfogesso e areia. Os autores apontaram a facilidade de trabalhar com essas misturas além do fato que estas demonstraram resistências superiores às das misturas de argila com areia tradicionalmente utilizadas.

2.7 DISPOSIÇÃO FINAL E IMPACTOS AMBIENTAIS DO FOSFOGESSO

As enormes produções de fosfogesso vêm tornando sua gestão cada vez mais problemática para as indústrias de fertilizantes. Camichael (1988) estima que apenas 15% da produção mundial de fosfogesso é reprocessada, 28% é despejada nas águas e 58% é estocada em depósitos (pilhas). O armazenamento do fosfogesso em plataformas terrestres e sem nenhum tratamento prévio necessita de grandes áreas além de causar sérios riscos de contaminação ambiental dos solos, das águas, da atmosfera e conseqüentemente para a saúde humana (BERISH, 1990; TAYIBI *et al.* 2009).

2.7.1 Contaminação atmosférica

Segundo Berish (1990), existem dois principais mecanismos de liberação no ar dos radionuclídeos provenientes das pilhas de fosfogesso: a difusão do gás ^{222}Rn e a suspensão das partículas de radionuclídeos devido ao tráfego dos veículos e ao vento.

A quantidade de radônio liberada por uma pilha de fosfogesso depende de vários fatores: a atividade específica do ^{226}Ra no fosfogesso, a quantidade de radônio liberada por unidade de ^{226}Ra produzida, a pressão atmosférica, o coeficiente de difusão do radônio no fosfogesso (incluindo o teor de umidade e a porosidade), a superfície da pilha, a cobertura vegetal e as condições climáticas. O teor de umidade elevado ou a presença de água na superfície da pilha reduz consideravelmente a velocidade de exalação do ^{222}Rn . Essa exalação não é uniforme na superfície de uma mesma pilha por causa da não uniformidade da distribuição do ^{226}Ra na pilha (WINDHAM; HORTON, 1980; BERISH 1990).

Dueñas *et al.* (2007) analisaram a exalação do ^{222}Rn das pilhas de fosfogesso ativas, restauradas e não restauradas da região de Huelva na Espanha. As medidas foram efetuadas durante 24 horas. Nas pilhas ativas, foi medida uma exalação de $0,523\text{Bq/m}^2/\text{s}$. Esse valor foi duas vezes maior que os obtidos para as pilhas não restauradas ($0,262\text{ Bq/m}^2/\text{s}$) e oito vezes para as restauradas ($0,065\text{ Bq/m}^2/\text{s}$). Nas pilhas de fosfogesso de Catalão no Brasil, Silva, Cipriani e Taddei (2002) mostraram que a exalação do ^{222}Rn variava entre $0,35\text{ Bq/m}^2/\text{s}$ e $0,69\text{ Bq/m}^2/\text{s}$. Todos esses valores foram inferiores a $0,74\text{ Bq/m}^2/\text{s}$, limite máximo permitido pela USEPA (2000).

Rabi e Mohamad (2006) modelaram e simularam numericamente os fluxos de calor nas pilhas de fosfogesso a fim de determinar sua influência na liberação do gás ^{222}Rn na atmosfera. A pilha foi modelada em duas dimensões, na forma de retângulo e com porosidade e permeabilidade constantes. Os pesquisadores aplicaram os conceitos de Darcy – Brinkman – Boussinesq para avaliar os fluxos de ar nas pilhas. As temperaturas do terreno abaixo das pilhas foram consideradas constantes e admitiu-se que aumentavam exponencialmente quando esse terreno era exposto à pressão atmosférica. Esse estudo mostrou que os movimentos de convecção natural do calor que ocorrem nas pilhas de fosfogesso influenciam pouco no fluxo de emissão do ^{222}Rn na atmosfera.

Jang, Kang e Moon (2005) desenvolveram um modelo matemático para estimar a emissão do ^{222}Rn provenientes de alvenarias feitas a base de fosfogesso e prever o seu impacto sobre a saúde de moradores de uma peça de 1m^3 construída com esses materiais. As medidas foram feitas com base em dois tipos de alvenaria de espessuras e atividade de ^{222}Rn diferentes: FG1 (2,2 cm e 259 Bq/kg) e FG2 (3,7 cm e 289 Bq/kg). As medidas foram efetuadas durante 133 horas para o FG1 e 144 horas para o FG2. Os resultados estimados pelo modelo para o FG1 foi de $77,7\text{Bq/m}^3$ e a exalação medida foi $78,07\text{Bq/m}^3$. Para o FG2 os valores obtidos pelo modelo e por medição foram respectivamente $139,12\text{Bq/m}^3$ e $136,16\text{Bq/m}^3$. Esses resultados mostraram a boa eficiência do modelo proposto.

Roessler (1990) estudou a emissão de ^{222}Rn em pavimentos construídos com fosfogesso estabilizado com cimento (SPC) e misturas de fosfogesso com areia, cascalho e granito. O fosfogesso foi misturado nas proporções de 20, 40 e 80% e foi construído um trecho com 100% de SPC. As pistas foram revestidas por um concreto betuminoso usinado a quente. As medições foram realizadas em onze seções. Os resultados obtidos mostraram que a emissões radioativas das camadas de base foram proporcionais ao teor de fosfogesso nas misturas da seguinte forma: 20% de FG ($1\text{pCi/m}^2/\text{s}$), 40% ($2\text{pCi/m}^2/\text{s}$) e 80% ($4\text{pCi/m}^2/\text{s}$). Com 100% de fosfogesso estabilizado com cimento (SPG) foi medida uma radiação de apenas $1\text{pCi/m}^2/\text{s}$. Para os aterros de 60cm de espessuras, a emissão de ^{222}Rn variou de 2 a $4\text{pCi/m}^2/\text{s}$. Esses valores são inferiores ao limites prescritos pela EPA ($20\text{pCi/m}^2/\text{s}$). Roessler (1990) afirma que o revestimento reduz o fluxo radioativo proveniente das bases. Porém, as medidas de exalação de ^{222}Rn feitas na superfície do revestimento foram mais elevadas do que esperado. Essa situação levou o autor a questionar o potencial radioativo do CBUQ utilizado na pista, já que esse parâmetro não foi medido antes da sua aplicação.

2.7.2 CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A segunda preocupação ambiental com as pilhas de fosfogesso é a contaminação dos solos, das águas subterrâneas e marinhas por lixiviação das impurezas do fosfogesso (BERISH, 1990). Essa preocupação levou vários pesquisadores a avaliarem as características de lixiviação das diferentes impurezas do fosfogesso.

Foi nesse sentido que Haridasan *et al.* (2002) estudaram a lixiviação ^{226}Ra das amostras de fosfogesso da região de Kochi na Índia, utilizando como líquido lixiviador a água destilada (pH = 6,0) e águas de chuvas (pH=5,0 a 5,8). A atividade inicial do ^{226}Ra nas amostras era de 8,5 Bq. Os resultados mostraram que o ^{226}Ra é menos lixiviado pela água de chuva (0,09 – 0,28 Bq/l) do que pela água destilada (0,08 – 0,38 Bq/l). Os autores estimaram que a atividade total do ^{226}Ra na água de chuva foi de 18% e de 24% na água destilada. Esse último valor é próximo do encontrado por Azouazi *et al.* (2001) com o fosfogesso da região de Khourigba no Marrocos (26%). Haridasan *et al.* (2002) explicam que essa diferença é devida à presença na água de chuva dos íons de sulfato provenientes da atmosfera. Observou-se que a maioria das taxas de lixiviação ^{226}Ra determinadas foram maiores que o limite permitido pela “Bureau of Indian Drinking Water Standards” (0,1 Bq/l). Porém, ficaram abaixo do limite indicado pela Organização Mundial da Saúde (1 Bq/l). Esse fato é confirmado com o estudo do fosfogesso de Khourigba cuja atividade do ^{226}Ra lixiviado é de 0,2 Bq/l (AZOUAZI e al., 2001).

Burnett e Elzeman (2001) estudaram o processo de migração dos radionuclídeos e outras impurezas nas pilhas de fosfogesso da Flórida e no seu redor. Para isso, foram cravados 70 poços de monitoramento em volta das pilhas até atingir o aquífero superficial e 11 poços em cima da pilha de fosfogesso a mais antiga. Os pesquisadores observaram que os fluidos extraídos dos poços da pilha antiga tinham baixo valor de pH ($2,43 \pm 0,10$), uma alta concentração iônica e um quantidade elevada de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) estimada em $18700 \pm 2300 \mu\text{g}/\text{kg}$. Já para os poços em volta das pilhas, os pH eram mais elevados ($6,33 \pm 0,65$) com uma menor quantidade de STD ($3300 \mu\text{g}/\text{kg}$), sendo esses valores mais próximos das propriedades das águas subterrâneas normais. Os autores ainda notaram que as concentrações de alguns componentes como SiO_2 , PO_4^{-3} e F^- eram muito mais elevadas na pilha do que no aquífero. A concentração de F^- na pilha, por exemplo, é mais de 1900 vezes maiores do que no aquífero superficial. Isso mostra que a contaminação das águas subterrâneas pelos ácidos do fosfogessos é muito baixa. Do ponto de vista radioquímico, os poços da pilha apresentaram atividades excepcionalmente elevada de ^{238}U (10 – 17 Bq/l), ^{222}Rn (300 – 1200 Bq/l) e ^{210}Pb (7 – 70 Bq/l) em comparação à água aquífera. Além disso, os autores observaram que atividade do ^{226}Ra na pilha (0,1-0,2 Bq/l) é menor que na maioria dos poços em volta e ligeiramente mais elevada que nas águas aquíferas normais. Esse resultado permitiu afirmar que as pilhas de fosfogesso não são as fontes dos ^{226}Ra presentes nas águas aquíferas superficiais.

O estudo da lixiviação do Cd, Cu, U, e Zn do fosfogesso da Síria foi realizado por Masri *et al.* (2004). No ensaio de lixiviação contínua durante 60 minutos com água destilada, 50% dos elementos Cd, Cu e Zn foram dissolvidos, enquanto que essa porcentagem foi de 20% para o U. Já quando foram realizadas medidas sucessivas entre os intervalos de tempo variando de 10 a 120 minutos, o Zn apresentou a maior susceptibilidade à lixiviação com uma taxa de transferência de 97%. Na ordem decrescente, seguem o Cu (68%), Cd (57%) e U (31%). Realizando o ensaio com uma solução ácida, os elementos se dissolveram na seguinte seqüência: U(31%), Cd(25%), Zn(10%) e Cu(10%). Aumentando a acidez da solução lixiviadora com adição de H₂SO₄ houve aumento da solubilidade dos diferentes elementos.

Com foco na aplicação do fosfogesso em pavimentação, Mesquita (2007) estudou a lixiviação de alguns metais pesados nas misturas de um fosfogesso de Catalão (GO) e do solo tropical de Goiânia (GO) de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004b). Além do fosfogesso e do solo, as misturas analisadas foram definidas da seguinte forma:

- Mistura A: 50% Solo + 50% Fosfogesso;
- Mistura B: 80% Solo + 20% Fosfogesso;
- Mistura C: 20% Solo + 80% Fosfogesso.

A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos nesse ensaio. Observa-se que esses resultados se encontram dentro dos limites especificados pela norma brasileira.

Tabela 2.2. Resultados das características químicas do extrato lixiviado das amostras estudadas (MESQUITA, 2007)

Parâmetros	Resultados das características químicas do lixiviado (mg/l)					L.D (mg/l)
	Fosfogesso	Solo	Mistura A	Mistura B	Mistura C	
Arsênico	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Bário	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Cádmio	< 0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
Chumbo	< 0,20	0,24	0,37	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Cromo Total	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,20
Mercúrio	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,10
Prata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Selênio	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,20
Fluoretos	4,36	< 0,10	10,1	6,87	15,4	1,0

Obs. L.D. Limites 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.

Nifong e Harris (1993) monitoraram o comportamento ambiental das pistas experimentais a base de fosfogesso dos municípios de Polk e Columbia nos Estados Unidos. Durante 2 anos e meio, foi analisada a qualidade das águas subterrâneas, a atividade do ^{222}Ra no solo e sua exalação no ar. Desses estudos, os autores concluíram que o impacto ambiental a longo prazo da utilização do fosfogesso em pavimentação é mínimo.

CAPÍTULO 3

SOLOS TROPICAIS E PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

3.1 DEFINIÇÕES

As técnicas rodoviárias utilizadas em pavimentação nos países em desenvolvimento são, geralmente, originárias de países já desenvolvidos. No Brasil, de maneira geral, os órgãos responsáveis pela construção de pavimentos seguem o que recomendam as normas e instruções do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), as quais, por sua vez, se baseiam nas normas de instituições norte-americanas, tais como: *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *Asphalt Institute (AI)* e *Portland Cement Association (PCA)*. Tais normas resultaram, basicamente, de estudos do comportamento de rodovias e pistas experimentais situadas nos Estados Unidos da América e envolvem fixação de condições empíricas válidas para os ambientes e solos mais representativos daquele país. Nelas não se consideram, portanto, as particularidades relacionadas com as condições e com os solos mais freqüentes no Brasil, onde, tanto os solos quanto os climas predominantes, podem ser englobados, genericamente, como do tipo “tropical úmido” (VILLIBOR; NOGAMI, 2009). Por esse motivo, vêm se encontrando várias discrepâncias entre as previsões efetuadas com a aplicação dos princípios dessas normas e instruções e o real comportamento dos solos nas obras (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Villibor *et al.* (2009) definem os solos como materiais naturais não consolidados, isto é, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água, e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplanagem (pá de carregadeira, motoescavotranspotadora, etc.).

Os solos tropicais apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação no mesmo de processos

geológicos ou pedológicos, típicas das regiões tropicais úmidas (VILLIBOR *et al.*, 2009). Entre eles, destacam-se duas grandes classes:

- Os solos lateríticos (*later*, do latim: tijolo), são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultante de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, por processo denominado laterização. Várias peculiaridades associam-se ao processo de laterização sendo, as mais importantes do ponto de vista tecnológico, o enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro ou alumínio, e a permanência de caulinita como argilomineral predominante e quase exclusivo. Estes minerais conferem aos solos de comportamentos lateríticos coloração típica: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado (VILLIBOR *et al.*, 2009).

- Os solos saprolíticos (*sapro*, do grego: podre), são aqueles que resultam da decomposição ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas, insolação, geadas) e mantêm, de maneira nítida, a estrutura da rocha que lhe deu origem. São genuinamente residuais, isto é, derivam de uma rocha matriz, e as partículas que os constituem permanecem no mesmo lugar em que se encontravam em estado pétreo. Os solos saprolíticos constituem, portanto, a parte subjacente à camada do solo superficial laterítico aparecendo na superfície do terreno, somente por causa de obras executadas pelo homem ou erosões. Estes solos são heterogêneos e constituídos por uma mineralogia complexa contendo minerais ainda em fase de decomposição. São designados também de solos residuais jovens, em contraste com os solos superficiais lateríticos, maduros (VILLIBOR *et al.*, 2009).

A Figura 3.1 ilustra um perfil de corte rodoviário, no qual, aparece a delimitação entre horizontes laterítico e saprolítico. Pode-se observar a grande suscetibilidade do horizonte saprolítico à erosão, característica que limita bastante sua utilização rodoviária. Na Figura 3.2 é ilustrada a ocorrência dos solos de comportamento laterítico no Brasil. Nela percebe-se uma predominância dos solos lateríticos sobre os saprolíticos. Por esses dois motivos, será dada uma maior ênfase sobre os solos lateríticos neste trabalho.

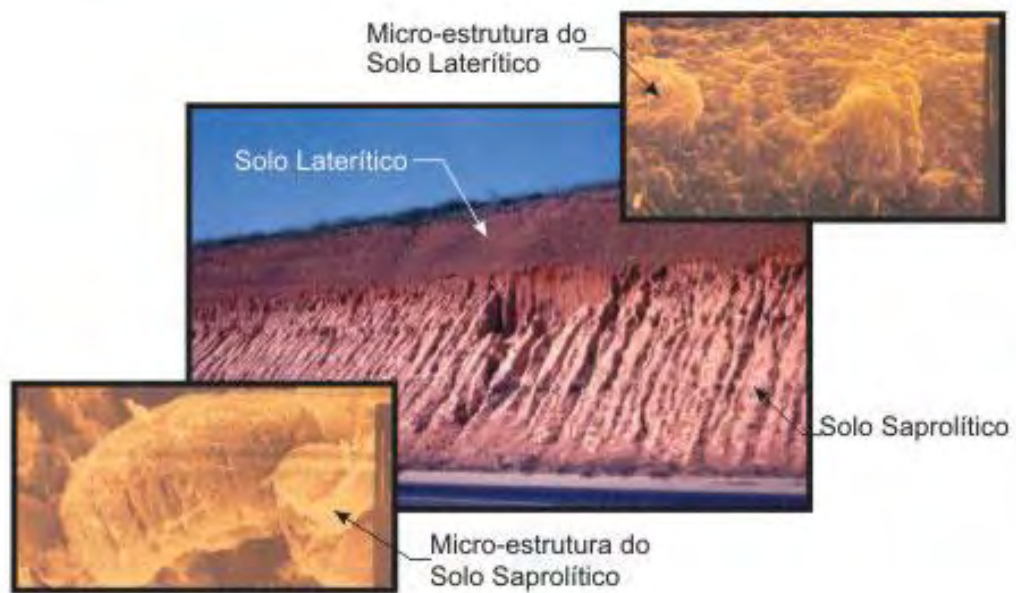


Figura 3.1. Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente a uma camada saprolítica de origem sedimentar, com as correspondentes micro-fábricas (VILLIBOR *et al.*, 2009)



Figura 3.2. Ocorrência dos solos de comportamento laterítico no território brasileiro (modificado de VILLIBOR *et al.*, 2009)

3.2 SOLOS LATERÍTICOS

Os solos lateríticos constituem perfis naturais caracterizados pedologicamente por conterem horizontes A e B podendo atingir espessuras de uma dezena de metros. Existem três tipos de ocorrência de solos lateríticos: os latossolos, os solos podzólicos e as terras roxas estruturadas.

De acordo com os interesses geotécnicos, nos latossolos observa-se pequena diferença entre os horizontes assim como elevada porosidade aparente, elevada permeabilidade, agregações geralmente bem desenvolvidas, variedade granulométrica, desde argila até areia argilosa. Já nos solos podzólicos, a diferenciação de horizontes é bastante nítida, podendo-se distinguir horizonte orgânico ou vegetal que se sobrepõe a um horizonte nitidamente mais rico em argila. Esse horizonte argiloso prejudica frequentemente as condições de drenagem dos solos podzólicos. A granulometria nesse tipo de ocorrência evoluía desde as variedades arenosas até as argilosas. Por sua parte, as terras roxas estruturadas apresentam diferenças pouco nítidas entre os horizontes, no que se refere principalmente à cor. O horizonte apresenta uma granulometria tipicamente argilosa.

A mineralogia dos solos lateríticos é relativamente simples, sendo esta constituída na sua grande maioria pelo o quartzo. Esse mineral encontra-se quase sempre, de maneira dominante nas frações de areia e pedregulhosa desses solos e imprime ao solo propriedades e comportamentos decorrentes de suas peculiaridades: 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. Além do quartzo, destacam-se outros minerais, genericamente chamados de minerais pesados, dos quais são pode citar: magnetita, ilmenita, turmalina, zircão, etc. Ainda na fração pedregulhosa, pode-se notar a presença de concreções lateríticas, principalmente constituídas por óxidos hidratados de ferro ou alumínio (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

De acordo com Idalíra (2007), na fração argila dos solos lateríticos encontra-se constituintes minerais, como argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro ou alumínio e constituintes orgânicos. O argilomineral predominante nesses solos é a caulinita, de estrutura atômica 1:1, ou seja, formada por repetição sucessiva de pacotes constituídos de uma camada tetraedros de

sílica e de uma camada de alumina ligados por uma força atômica do tipo ponte hidrogênio. Esse tipo de ligação proporciona ao argilomineral pequena atividade coloidal, que nos solos lateríticos é ainda reduzida pela associação com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Os óxidos, apesar de possuírem elevada superfície de específica e reduzidas dimensões, não são plásticos, ou são muito pouco plásticos, não expansivos e possuem uma capacidade de troca catiônica desprezível nas condições de pH predominantes nos solos. Além disso, os óxidos de ferro e alumínio possuem propriedades cimentantes, auxiliando na formação de agregados e concreções lateríticas.

Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos de mesma granulometria, constituição e classificação geotécnicas podem ter comportamentos bem diferentes de acordo com as suas partículas de fábrica, isto é, da disposição espacial dos seus constituintes sólidos, dos seus vazios e das suas superfícies de descontinuidades. Nos solos lateríticos, a macro-fábrica (fábrica observada a olho nu) é homogênea, isto é, não se distingue um desenho especial quando à distribuição dos grãos. A peculiaridade geotécnica mais notável dos solos lateríticos está na permanência da resistência dessa macro-fábrica mesmo após molhagem ou umedecimento. Isso faz com que os solos mantenham elevada porosidade aparente e permeabilidade quando são submetidos ao aumento de umidade (por imersão em água ou molhagem pelas chuvas) no seu estado natural. Além disso, observa-se a permanência dos torrões na fração areia do solo, resistência à compressão e ao cisalhamento muito mais acima da prevista pelos índices físicos tradicionais assim como maior facilidade a se prestar às misturas com água ou estabilizantes químicos.

Essas diferentes peculiaridades vêm inviabilizando os parâmetros obtidos pelos métodos tradicionais, quando esses são utilizados para classificar os solos lateríticos. De acordo com Rezende (2003), geralmente, quando se aplicam essas normas verifica-se através de ensaios de laboratório (granulometria, limites de liquidez e de plasticidade, Índice de Suporte Califórnia – ISC) que o solo laterítico não é indicado para a utilização em pavimentação. No entanto, com a realização de pesquisas, a utilização desse material em campo e a determinação de novos parâmetros (módulo resiliente e metodologia MCT – Miniatura, Compactado, Tropical) tem-se verificado o seu bom desempenho.

3.3 UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

Segundo Villibor et al.(2009), um pavimento é considerado de baixo custo quando utiliza bases constituídas de solos locais *in natura*, ou em misturas, com custos substancialmente inferiores à bases convencionais, revestimento betuminoso esbelto do tipo tratamento superficial ou concreto betuminoso usinado a quente, com espessura máxima de 3 cm e é dimensionado para atender os tráfegos urbanos, de muito leve a leve com um volume diário médio (VDM) inferior a 1500 veículos, com máximo 30% de veículos comerciais, e com $N < 5.10^6$ solicitações do eixo simples padrão de 80 kN.

No Brasil, há uma predominância dos solos lateríticos arenosos e argilosos sendo que estes representam 65% do território nacional. Essa grande ocorrência faz desses solos de potenciais materiais para pavimentação de baixo custo.

De acordo com Nogami e Villibor (1995) o melhor aproveitamento dos solos lateríticos de granulação fina (argilosos ou arenosos), em camadas de pavimentos ocorreu no estado de São Paulo na década 50, quando foram utilizados em reforço de subleito. Na mesma época, o engenheiro Francisco Pacheco e Silva, da então Seção de Solos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), orientou a primeira tentativa experimental da utilização de uma argila laterítica compactada em camada de base de pavimento. Essa camada foi protegida em seus lados por pintura betuminosa e tem mostrado bom desempenho até 20 anos após sua execução, quando comparada com camadas vigentes naquela época e essencialmente constituídas de pedra britada.

A primeira utilização dos solos arenosos finos lateríticos (SAFL) como base de pavimento data de maio 1967. Esse fato ocorreu com a construção de dois trechos como variantes de trânsito, de aproximadamente 300 m cada, na via Washington Luis (SP-310), nas proximidades de Araraquara, no interior de São Paulo (COREA; VILLIBOR; GRANDE¹, 1972 *apud* NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Essas variantes foram revestidas de tratamento superficial simples e teriam um funcionamento de apenas 3 meses e meio até a construção do

¹ CORRÊA, F. C.; VILLIBOR, D. F.; GRANDE, G., **Utilização de solos finos estabilizados na execução de bases**. II reunião das organizações rodoviárias. Brasília. 1972.

trecho definitivo. Após o termino desse prazo, constatou-se que as variantes estavam em perfeitas condições.

Villibor *et al.*(2009) ressaltam ainda que trechos inicialmente projetados como proteção à terraplanagem (entre eles, Cambaratiba - Borborema, Ibitinga-Itápolis e Itajobi – Novo Horizonte) e construídos em 1974/75 funcionaram sem grandes problemas, como estradas pavimentadas, até meados da década de oitenta. Neles ocorreram apenas defeitos inerentes ao tipo de pavimento adotado (tratamento superficial delgado). Tendo em vista o excelente comportamento apresentado nos trechos experimentais, a base de SAFL começou a ser empregada como parte integrante da estrutura de pavimentos econômicos, em substituição às bases convencionais, geralmente constituídas de material britado, pedregulho ou solo cimento. Atualmente, já foram executados aproximadamente 12.300 km de rodoviária vicinais com bases de SAFL, cujos 8.000 km apenas no estado de São Paulo. Em termos de vias urbanas, já foram construídos mais de 12 milhões de m² de bases em SAFL no território nacional (VILLIBOR *et al.*, 2009).

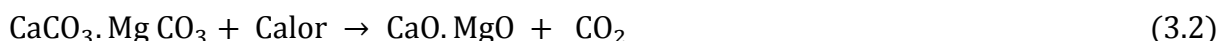
Quanto às argilas lateríticas, Villibor *et al.* (2009) relatam que um dos primeiros trechos experimentais utilizando esses materiais em base foi o acesso norte de Campinas à Via Anhangüera (SP-330), executado no início da década 50. Nesse trecho, a base foi envelopada com pintura betuminosa. Mais tarde, no Plano de Pavimentação de 1958 do Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP), foram executadas em grande escala sub-base e reforços de subleito com uso de argilas lateríticas. A construção de trechos experimentais com uso de argilas lateríticas foi retomada a partir de meados da década de 80 nos estados de São Paulo e Paraná. Hoje na cidade de Jaú em São Paulo, estima-se que o total de ruas pavimentadas com base de argila laterítica atinge mais de 500.000 m².

Como esses solos não se enquadravam nas especificações de normas, teve-se a necessidade de desenvolver novos procedimentos laboratoriais que possibilitassem uma melhor caracterização. Procurou-se relacionar novos critérios com propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados. Assim no início da década de oitenta, desenvolveu-se uma nova metodologia dos ensaios geotécnicos denominados MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) e nova classificação dos solos lateríticos e não lateríticos (REZENDE, 1999).

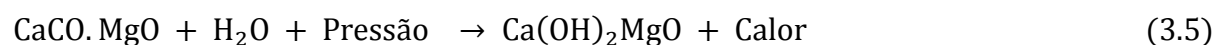
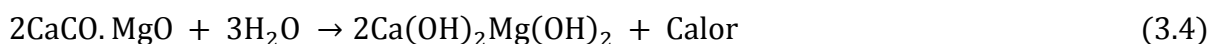
3.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS COM A CAL

A estabilização química de um solo em vista sua aplicação em pavimentação é um procedimento antigo e refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de certa quantidade de aditivo, suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, possibilitando o seu emprego para fins de projeto (FRANÇA, 2003). Na prática rodoviária assim como na literatura científica, o cimento, o betume e a cal ocupam lugares de destaque como estabilizantes químicos.

De acordo com Palmer (1986), a cal é um produto químico resultante da reação de calcinação de vários tipos de rochas calcárias (aragonitas, cálcicas, dolomitas, etc.) nas temperaturas da ordem de 1900° a 2400° F. Dois tipos de rochas são principalmente utilizados na produção industrial das cais: as rochas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio (no mínimo 97% de CaO_3) e as rochas dolomitas, possuindo um importante teor de carbonatos de magnésio (no mínimo 20 % de MgCaO_3). Da calcinação dessas duas rochas obtém-se respectivamente a cal cálcica virgem (CaO) e a cal dolomítica virgem (CaO.MgO). Genericamente, ambas as cais são denominadas de cais virgens ou vivas. As reações químicas de calcinação são realizadas segundo as Equações 3.1 e 3.2.



Depois da sua fabricação, as cais virgens podem ser submetidas a um processo de hidratação, dando assim origem à cais cálcicas e dolomitas hidratadas. As cais hidratadas, tanto cálcicas como dolomitas, são genericamente conhecidas como cais hidratadas. As reações envolvidas nesse processo são exotérmicas e ilustradas pelas Equações 3.3 a 3.5.



Em que:

$\text{CaO} \cdot (\text{OH})_2$: cal cálcica hidratada;

$\text{Ca(OH)}_2\text{Mg(OH)}_2$: cal dolomítica dihidratada;

$\text{Ca(OH)}_2\text{MgO}$: cal dolomítica monohidratada.

Segundo Palmer (1986), as cals hidratadas são mais estáveis que as virgens. Elas possuem uma aparência branca quando originam das rochas calcárias puras e apresentam colorações creme, amarelada e levemente cinza quando provém de rochas impuras (SHIRLEY, 2005).

Em pavimentação, é comum utilizar tanto as cals virgens como as cals hidratadas, sendo que no Brasil, há uma predominância pelo emprego das cals hidratadas. Recorre-se ao uso da cal para a modificação ou para estabilização dos solos. O termo modificação significa que se quer alterar apenas algumas propriedades do solo. Neste caso, se precisa de uma pequena quantidade de cal. A estabilização, por sua parte, tem como objetivo principal o ganho de resistência e a diminuição da plasticidade. Neste caso, são necessárias maiores quantidades de cal. A cal atua em duas etapas na melhoria das propriedades físico-químicas dos solos argilosos:

- Uma ação imediata, que segundo Lovato (2004) demora de horas a dias. Essa fase é caracterizada pela troca catiônica que se realiza entre os cátions Ca^{2+} trazidos pela cal e os íons metálicos presentes na superfície das partículas da argila. Estas ficam cercadas por uma difusão hídrica o que gera uma modificação da densidade das cargas elétricas ao redor das partículas e uma atração das partículas entre si. Esse processo é chamado de floculação e se acompanha geralmente por uma diminuição da plasticidade (BELL, 1996).
- Uma ação ao longo prazo caracterizada pelas reações pozolânicas. Lovato (2004) explica que essas reações são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica das misturas solo – cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentícios.

A adição da cal no solo traz outras modificações nas suas propriedades físicas, químicas, estruturais e mecânicas. Afês e Didier (2000) observaram uma diminuição contínua do valor do azul de metileno quando se adiciona a cal no solo, o que é traduzido por uma diminuição da superfície específica do solo. Diversos autores notaram que para uma mesma energia de compactação, as misturas solo-cal apresentam um menor peso específico aparente máximo

enquanto se percebe um aumento significativo do teor de umidade ótimo, em comparação ao solo natural (AFÈS; DIDIER, 2000; ANGELIM, 2005). Também foi observado um acréscimo da massa específica do material misturado (ANGELIM, 2005). Afès e Didier (2000) realizaram uma análise ao difratrometro de raios-X de uma argila da Argélia misturada com cal e observaram uma mudança da estrutura da mistura traduzida pela criação de novos cristais e a desaparecimento de outros. Foi observado também que as misturas de solo – cal apresentam uma granulometria mais grosseira. O trabalho de Lima; Bueno e Fontes (2000) mostrou que há um ganho significativo no valor da coesão nas misturas.

A melhoria das propriedades dos solos pela adição da cal depende de vários fatores. Pode ser citado o tipo de solo (expansivo ou não), os tipos de argilo – minerais, o tipo de cal empregada, o tempo de cura, o retardamento da compactação, o teor em matéria orgânica, o teor de cal utilizado, a temperatura de cura. Lovato (2004) estudou o comportamento mecânico de misturas de latossolos vermelhos de região de Cruz Alta (RS) com cal cálcica e dolomítica. Observou maiores resistências à compressão simples, tração por compressão diametral e, módulo resiliente com o uso da cálcica. Angelim (2005) investigou a influência do procedimento de mistura da cal no solo. Ele observou melhores valores de índice de suporte para misturas realizadas por imersão da cal na água de compactação em comparação às misturas obtidas por adição da cal em pó, sendo essa forma a mais empregada na prática.

3.5 TRECHOS EXPERIMENTAIS EM GOIÁS E NO DISTRITO FEDERAL

Nos últimos anos, vêm sendo investigada cada vez mais a utilização em pavimentação dos solos argilosos lateríticos regionais. Rezende (2003) estudou em laboratório, solos finos da região de do Distrito Federal e misturas desses solos com cal (2, 3 e 6% de cal hidratada). Em seguida, a autora analisou o comportamento estrutural de trechos experimentais, onde esses materiais foram utilizados em base. Esses materiais apresentaram comportamentos satisfatórios tanto em laboratório como em campo. Oliveira (2007) mostrou a viabilidade técnica da utilização em base de misturas de agregados reciclados de resíduos da construção civil com solos argilosos do município de Goiânia. Luz (2008) por sua parte investigou as propriedades laboratoriais e de campo de misturas de argila laterítica de Goiânia – GO com

filer de pedreira do mesmo município. A pesquisadora concluiu que essa mistura adéqua-se às condições estabelecidas pelas normas vigentes em pavimentação.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa pode ser considerada uma continuidade dos trabalhos realizados por Mesquita (2007), Faria (2007) e Rufo (2009). Com base nos resultados obtidos pelas referidas autoras e na revisão da literatura apresentada neste trabalho, propôs-se avaliar o comportamento mecânico em campo de uma pista experimental executada com misturas de solo-cal, solo-fosfogesso e solo-fosfogesso-cal em sua base. Para atingir esse objetivo, primeiramente foi realizada uma visita técnica na indústria onde ocorre a geração do fosfogesso. Em seguida, foi definido o local para a execução da pista experimental, foram coletados os materiais selecionados para o estudo e realizados ensaios de laboratório para determinar suas características físicas e mecânicas. Durante a construção da pista experimental foram executados ensaios de campo para controle de compactação, avaliação estrutural e avaliação radiométrica. Neste capítulo, são apresentadas detalhadamente as etapas adotadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.2 VISITA TÉCNICA E DEFINIÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

Este trabalho iniciou-se por uma visita técnica feita em Catalão (GO), na indústria geradora do fosfogesso estudado: a Copebrás Ltda. A visita foi realizada em quatro dias, de 25 a 28 de maio 2009 e teve como objetivos conhecer a empresa e acompanhar o processo de produção e de armazenamento do fosfogesso.

Inicialmente, tentou-se viabilizar a execução de um pavimento flexível experimental no município de Catalão-GO, já que o mais lógico seria tentar reutilizar o resíduo no próprio local onde ele é gerado. No entanto, como não foi obtido apoio local para a implantação dessa

estes apenas diferenciados pelo tipo de material utilizado na base, conforme mostrado a seguir:

- Estaca 0+00 a 3+00: solo local (80%) + fosfogesso (20%);
- Estaca 3+00 a 6+00: solo local (80%) + fosfogesso (11%) + cal calcítica CH-I (9%);
- Estaca 6+00 a 9+00: solo local (91%) + cal calcítica CH-I (9%);
- Estaca 15+00 a 18+00: cascalho (100%).

A escolha desses materiais e das porcentagens das misturas foi definida a partir de resultados de ensaios de laboratório, sendo que os subtrechos executados com misturas do solo encontrado no próprio local da obra com fosfogesso e com cal podem ser consideradas ambientalmente corretas. A seção de cascalho foi executada para servir de comparação com as misturas alternativas e foi o material utilizado para a composição da base de todas as vias pavimentadas desse bairro.

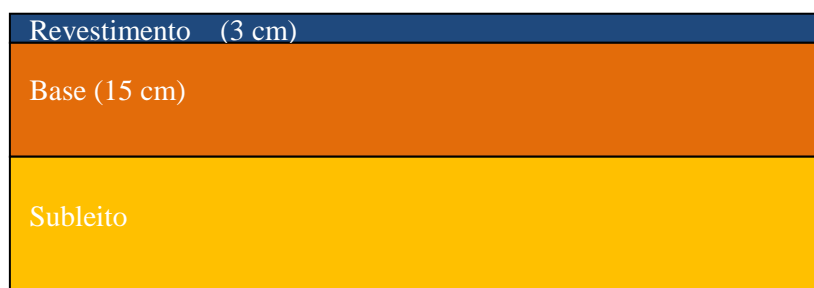


Figura 4.2 - Croqui esquemático da estrutura do pavimento

4.3 MATERIAIS

Os materiais descritos nesta seção são aqueles que foram utilizados tanto nos ensaios de laboratório quanto na construção da pista.

O fosfogesso utilizado neste trabalho foi trazido de Catalão-GO por uma empresa terceirizada contratada pela Copebrás direto para a área destinada ao depósito de materiais utilizados na obra em Aparecida de Goiânia-GO. Para tanto foi obtida uma licença ambiental junto à Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA) para transporte e utilização do fosfogesso. No Apêndice A está apresentada cópia dessa licença, bem como cartas de ciência de diversos órgãos sobre a realização da pesquisa. Para limitar ao máximo os riscos de contaminação dos solos, do lençol freático e das áreas próximas, seja por lixiviação, infiltração ou transporte do fosfogesso, esse material foi depositado em cima de uma lona preta e em seguida recoberto

pela mesma. Além disso, um controle radiométrico foi realizado pelo Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro Oeste (CRCN-CO), unidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), antes e depois do depósito do fosfogesso na lona. O equipamento usado para esse controle foi IdentFINDER N° SÉRIE 2614-57. A Figura 4.3 mostra as diferentes etapas adotadas durante o depósito do fosfogesso. O fosfogesso ficou acondicionado nesse local 4 dias até sua aplicação na pista e durante esse período foram adotados todos os cuidados para evitar perda do material e possíveis contaminações.

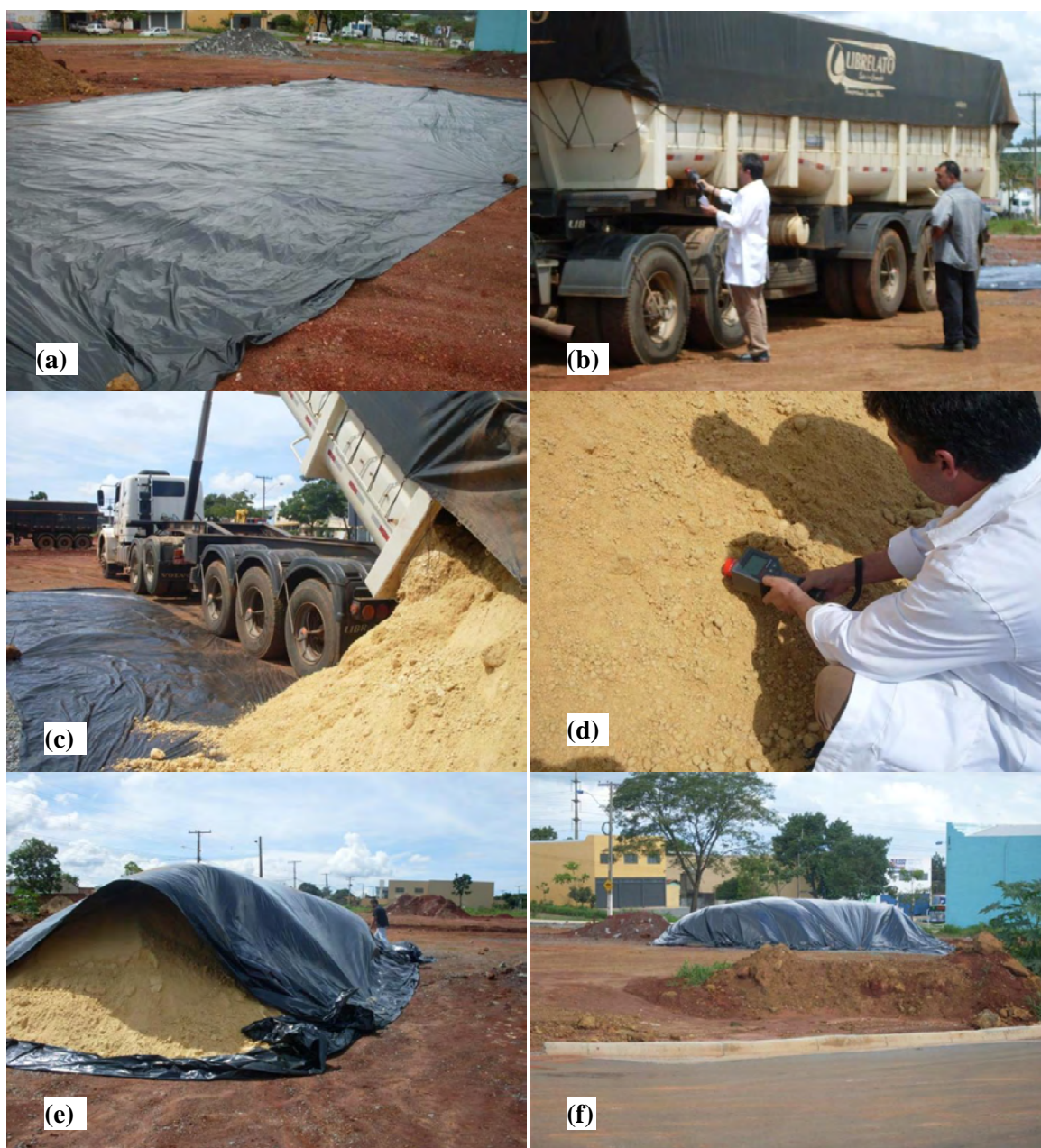


Figura 4.3 – Depósito do fosfogesso: (a) Instalação da lona preta.; (b) Medições radiométricas antes do descarregamento;(c) Descarregamento; (d) Medições radiológicas depois do descarregamento; (e) Recobrimento da pilha de fosfogesso;(f) Pilha de fosfogesso completamente recoberta.

O solo foi extraído de uma jazida próxima do trecho experimental e consiste no solo encontrado no próprio local onde foi construído o trecho experimental. Este solo foi utilizado tanto como material de subleito como nas misturas que compuseram as camadas de base.

Para essa pesquisa, foi utilizada a cal calcítica do tipo CH-I proveniente do estado de Minas Gerais. Essa escolha deveu-se aos resultados não satisfatórios obtidos em laboratório com o uso da cal dolomítica (RUFO, 2009), além da maior disponibilidade da cal CH-I no mercado local.

O cascalho utilizado na pista foi o mesmo cascalho utilizado pela Secretaria de Infra-Estutura de Aparecida de Goiânia para a pavimentação de todo o bairro. Sua jazida está localizada na região Cemitério Jardim da Paz do referido município.

4.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Essa fase teve como objetivo principal, determinar as características geotécnicas dos materiais estudados antes da aplicação em campo e comparar o desempenho mecânico em laboratórios dos diferentes materiais. Além das misturas definidas para a pista experimental, foram ensaiadas, individualmente, amostras de solo, fosfogesso e cascalho.

4.4.1 Ensaios de caracterização

Inicialmente, as amostras foram submetidas aos tradicionais ensaios de caracterização: massa específica dos grãos, análise granulométrica e limites de consistências. Todos esses ensaios foram executados no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal de Goiás (UFG). Os resultados obtidos possibilitaram a classificação geotécnica dos materiais de acordo os sistemas da “Transportation Research Board” (TRB) e Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

a) Massa Específica dos Grãos

Para cada amostra, a determinação da massa específica dos grãos foi realizada pelo método do picnômetro como especificado pela norma NBR 6508 (ABNT, 1984a). A Figura 4.4 ilustra alguns passos realizados com esse método.

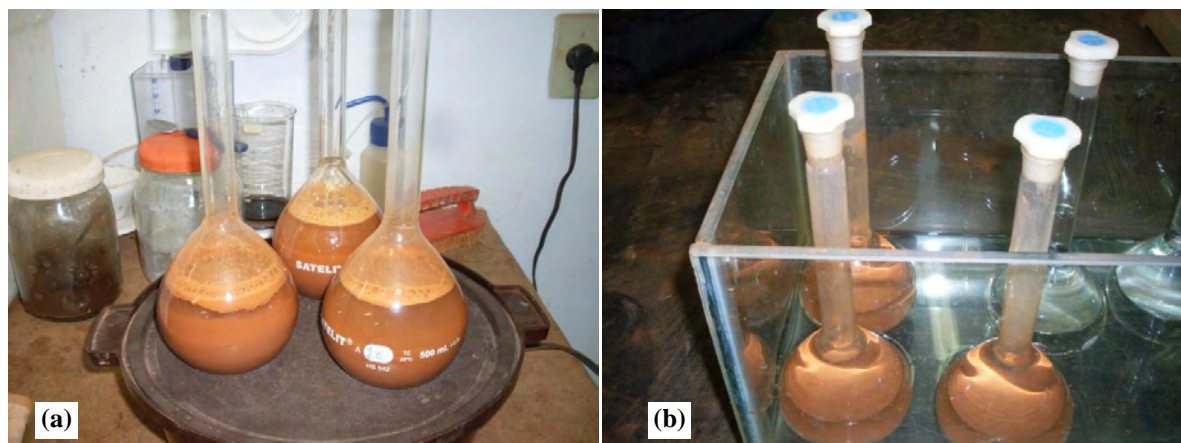


Figura 4.4 – Determinação da massa específica dos grãos: (a) Aquecimento dos picnômetros para eliminar as bolhas de ar; (b) Picnômetros deixados em repouso para atingir a temperatura ambiente.

b) Análise Granulométrica

A determinação da distribuição dos grãos foi feita por peneiramento para as partículas grossas e com sedimentação com e sem defloculante (hexametáfosfato de sódio) para as partículas finas conforme a norma NBR 7181(ABNT, 1984b). A Figura 4.5 mostra algumas etapas desse ensaio.

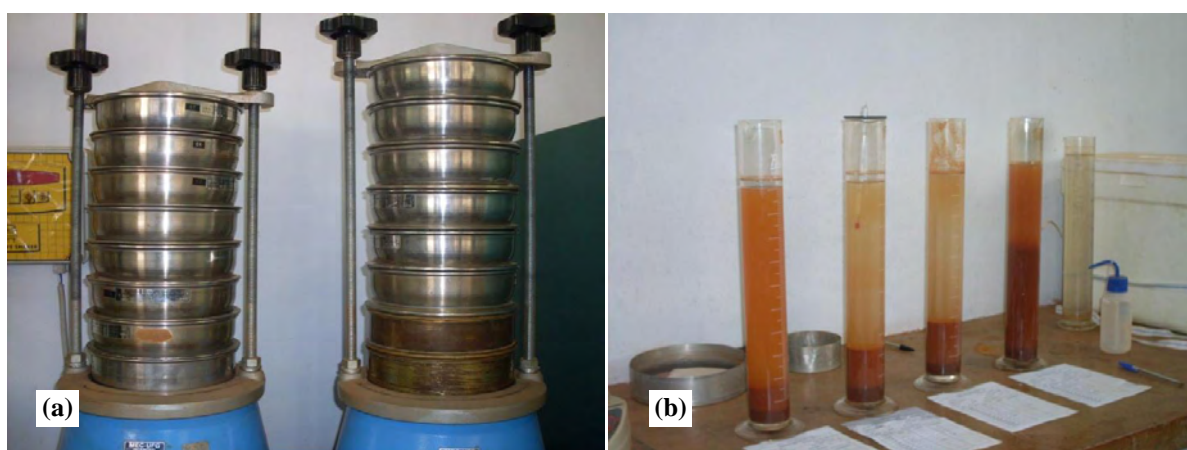


Figura 4.5 - Ensaio de análise granulométrica: (a) Peneiramento; (b) Sedimentação

c) Limites de Consistência

Essa fase constituiu-se pela determinação do limite de liquidez e de plasticidade dos materiais. O ensaio de limite de liquidez foi executado de acordo a norma NBR 6459 (ABNT,

1984c). Quanto ao ensaio de limite de plasticidade, foram seguidos os passos descritos na NBR 7180 (ABNT, 1984d). A partir dos valores determinados nesses ensaios, foi calculado o índice de plasticidade das amostras ensaiadas. Como já discutidos nas pesquisas anteriores (MESQUITA, 2007; RUFO, 2009), o fosfogesso é um material não plástico. Por esse motivo, nesse trabalho não foram realizados ensaios de limites de consistência com esse material. A Figura 4.6 ilustra os ensaios sendo realizados.

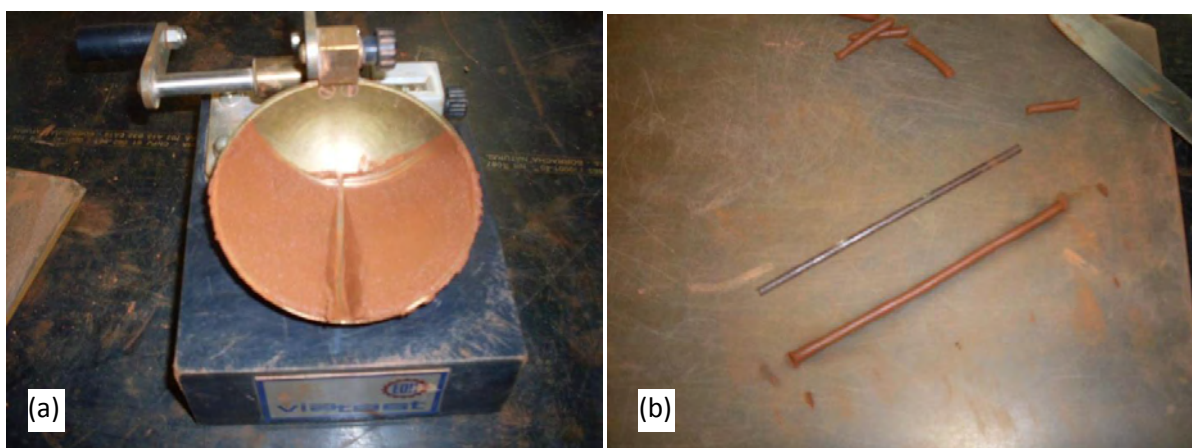


Figura 4.6 – Ensaio de limites de consistência: (a) Limite de liquidez; (b) Limite de plasticidade.

4.4.2 Metodologia MCT

A metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi elaborada em 1980 pelos Professores Nogami e Villibor para classificar mais apropriadamente os solos tropicais. Para determinar os parâmetros necessários à classificação MCT do solo fino, foram realizados dois ensaios: a compactação mini-MCV e a perda de massa por imersão. Esses ensaios foram executados no Instituto Federal de Goiás (IFG). O ensaio de compactação mini-MCV foi executado de acordo com a norma ME 258 (DNER, 1994a) e foram determinados todos os parâmetros e índices necessários para realizar a classificação.

4.4.3 Ensaio de compactação, Expansão e “California Bearing Ratio” (CBR)

O solo fino, o cascalho e as diferentes misturas foram submetidos ao ensaio de compactação para determinar os valores de peso específico aparente seco máximo e as umidades ótimas

conforme a norma NBR 7182 (ABNT 1986). Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Goiás (IFG), em Goiânia. Para o solo de subleito, a compactação foi realizada na energia Proctor normal. Já para as diferentes misturas e o cascalho, foi utilizada a energia intermediária, considerando que esses materiais seriam aplicados em camada de base. A Figura 4.7 apresenta alguns passos executados durante a compactação. Em seguida, foram executados os ensaios de expansão e CBR como indicado pela norma NBR 9895 (ABNT, 1987). A Figura 4.8 mostra a execução dos ensaios de expansão e CBR.



Figura 4.7 – Compactação: (a) Homogeneização das misturas; (b) Compactação no cilindro Proctor.

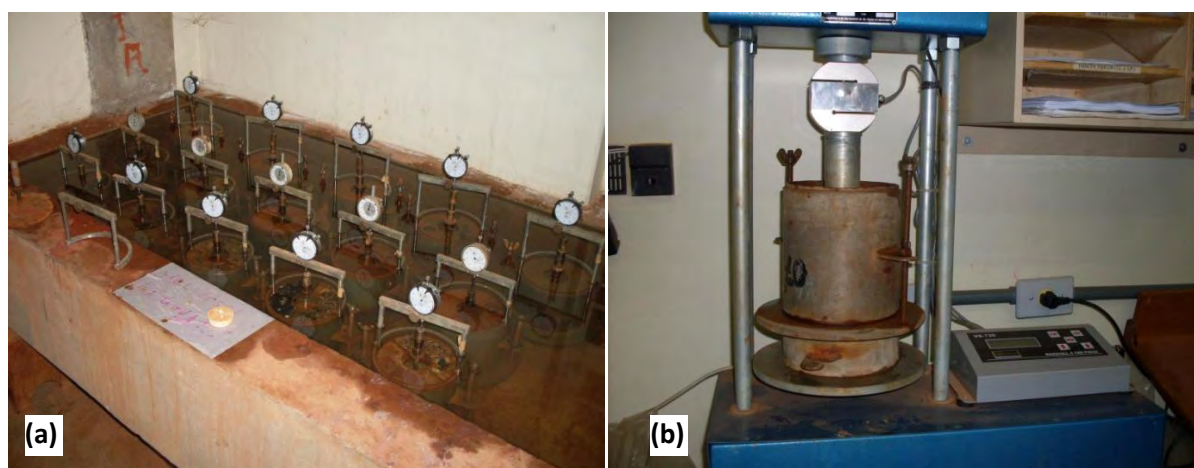


Figura 4.8 – Ensaios em andamento: (a) expansão; (b) CBR.

4.4.4 Ensaios de compressão simples

O ensaio de compressão simples foi realizado de acordo com a norma NBR 12770 (ABNT, 1992). Esse ensaio teve como objetivos obter as curvas tensão-deformação dos materiais e suas resistências de ruptura. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Especiais

do Centro Tecnológicos de FURNAS, em Aparecida de Goiânia (GO) e no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre (RS).

As amostras foram compactadas na energia Proctor intermediária e com teores de umidade próximos do teor ótimo. Em seguida, as amostras foram moldadas para se adequarem ao tamanho das prensas e ensaiadas. Apenas para as misturas, os ensaios foram realizados com tempos de curas diferentes para acompanhar a evolução da resistência ao longo do tempo. Os tempos de cura adotados foram de 0, 7, 14 e 21 dias. Nesse caso, após a moldagem, os corpos de provas foram envelopados com papel filme para manter a umidade e deixados para curar. Na Figura 4.9 são apresentados alguns passos do ensaio.

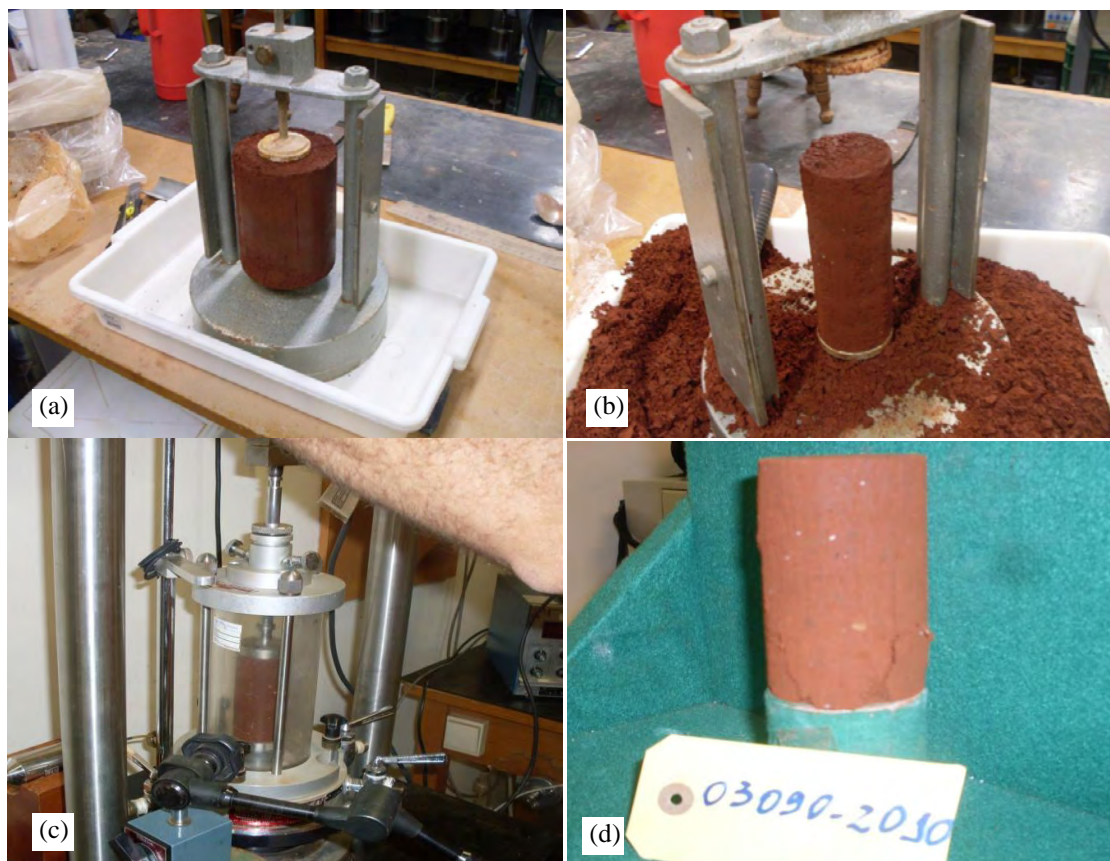


Figura 4.9 – Ensaio de compressão simples: (a) Corpo de prova levado ao torno; (b) Corpo de prova moldado; (c) Ensaio em andamento. (d) Corpo de prova após ensaio.

4.4.5 Ensaio de compressão dinâmica e determinação do módulo resiliente

Os ensaios triaxiais dinâmicos foram executados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS-LAPAV) de acordo com a norma T

307-99 (AASHTO, 2003). O equipamento triaxial utilizado (Figura 4.10) para a execução desse ensaio é constituído por pórticos de reação, câmara triaxial, cilindro pneumático, sistemas de aplicação de cargas, sistemas de medição de deslocamento internos e externos constituídos por “Linear Variable Differential Transformers” (LVDTs). O sistema de aquisição de dados utilizado nesse equipamento é o SEEPAVE 8200 fabricado pela empresa Doering e Brito Ltda.

Para a moldagem dos corpos de provas foi utilizado um molde cilíndrico tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura como mostrado na Figura 4.11. Antes da compactação, os diferentes componentes do molde eram lubrificadas para evitar o arranchamento dos materiais durante a fase de extração.



Figura 4.10 - Equipamento triaxial de cargas repetidas.

O procedimento do ensaio foi realizado conforme os seguintes passos:

- 1º. Monta-se e pesa-se o molde tripartido;
- 2º. Compacta-se os materiais em cinco camadas e de forma que as umidades e densidades secas finais fossem as mais próximas possível dos valores de referência obtidos no ensaio de compactação;
- 3º. Pesa-se o conjunto CP – molde e determina-se da massa úmida do CP;

- 4°. Coloca-se uma pedra porosa e um papel a filtro sobre a base da célula triaxial;
- 5°. Extrai-se o CP em cima do conjunto papel filtro – pedra porosa – base da célula triaxial;
- 6°. Colocam-se o segundo papel filtro e pedra porosa assim como o cabeçote, no topo do CP;
- 7°. Envolve-se o CP com uma membrana elástica;
- 8°. Coloca-se anéis de borracha na base e no topo da membrana, evitando que estes estejam em contato como o CP;
- 9°. Medem-se três diâmetros do conjunto membrana – CP, sendo que depois é desconta o dobro da espessura da membrana;
- 10°. Instalam-se os suportes dos transdutores (LVDTs);
- 11°. Coloca-se a câmara triaxial;
- 12°. Instala-se as hastes e fixa-se a câmara triaxial;
- 13°. Mede-se a altura do corpo de prova;
- 14°. Instala-se a célula triaxial no pórtico de reação;
- 15°. Encosta-se a célula de carga sobre o topo do pistão da célula de carga;
- 16°. Encaixam-se as mangueiras para aplicação das tensões desvio (σ_d) e confinante (σ_3);
- 17°. Conectam-se as componentes elétricas (LVDTs, solenóide e célula de carga);
- 18°. Libera-se o ar comprimido;
- 19°. Liga-se o sistema de aquisição dos dados (SEEPAVE 8200);
- 20°. Ajustam-se os transdutores;
- 21°. Executa-se a fase de condicionamento. Essa fase serve para eliminar as grandes deformações plásticas que ocorrem no início da aplicação das cargas e consiste na aplicação de 500 golpes com $\sigma_3 = 103,4$ kPa e $\sigma_d = 93,1$ kPa;
- 22°. Após o condicionamento, ajusta-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio;
- 23°. Acompanha-se o ensaio para verificar se não ocorrem anomalias (deformação excessiva, rompimento do CP). Se não houver nenhuma irregularidade, o sistema de aquisição de dados interrompe o ensaio depois o último ciclo de carga. Caso contrário, é necessário parar o ensaio manualmente e com antecedência;
- 24°. Por fim, desmonta-se o equipamento e determina-se a umidade do CP.



Figura 4.11 – Moldagem do corpo de prova: (a) Cilindro tripartido u; (b) Corpo de prova compactado

As diferentes misturas foram ensaiadas sem e com de cura de 7, 14 e 21 dias com objetivo acompanhar a variação do módulo de resiliência com o tempo.

4.5 CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

A pista experimental foi construída entre os meses de outubro e dezembro 2009 pela equipe da Secretaria de Infra-Estrutura de Aparecida de Goiânia (GO). No município, esse período foi marcado por uma pluviometria elevada, como confirmado pelos dados apresentados no próximo Capítulo. Sabe-se que esse não é o período ideal para a execução de obras de pavimentação, mas como a pista experimental deveria ser construída no ano de 2009 e as tentativas anteriores não foram bem sucedidas, optou-se por correr esse risco.

4.5.1 Preparo do subleito

Essa fase teve como objetivo a obtenção de uma superfície de subleito obedecendo às condições geométricas e geotécnicas estabelecidas pelo projeto geométrico e nos ensaios de laboratório. Essa operação constituiu-se primeiramente em corte, carga, transporte e descargas de materiais não apropriados presentes no trecho. Em seguida, procedeu-se à escarificação e destorroamento da camada superficial do subleito, numa espessura de 15 cm. Por seguinte, o material foi irrigado por um caminhão pipa, de forma a obter um teor de umidade próximo da ótima. O material assim umidificado foi homogeneizado com grade de discos e distribuído de forma regular e uniforme em toda a largura do leito pela motoniveladora. Após isso, usou-se o

rolo compactador pé de carneiro vibratório para compactar o material. Depois algumas passadas com o rolo, a superfície do subleito foi regularizada e compactada novamente, dessa vez, com o rolo compactador tipo liso vibratório. Em seguida, foram realizados ensaios de controle de compactação e umidade. Devido ao risco de chuvas durante a execução do trecho e para proteger o subsolo por possível contaminação do fosfogesso, optou-se por imprimir o subleito com CM-30 após sua compactação. A Figura 4.12 mostra a execução de algumas etapas do subleito.



Figura 4.12 – Execução do subleito: (a) Pista no início do projeto; (b) Pista depois da remoção dos materiais não apropriados; (c) Escarificação da superfície do subleito; (d) Homogeneização dos materiais; (e) Distribuição do material na largura do trecho; (f) Compactação.

4.5.2 Execução das camadas de base

Inicialmente, o cascalho proveniente da jazida foi depositado no seu subtrecho. Depois, este foi distribuído uniformemente na largura do trecho, removendo-se as pedras maiores sempre que encontradas. Em seguida, o material foi umidificado, homogeneizado e compactado, conforme procedimentos usualmente adotados nas obras da região.

No subtrecho executado com mistura solo-cal, o solo foi primeiramente depositado e espalhado sobre o subleito. Por seguinte, os sacos de cal CH-I foram alinhados sobre o solo de forma que a proporção solo-cal de 91% e 9% fossem respeitadas. Os sacos foram abertos manualmente e a cal removida. Essa etapa foi seguida pela distribuição uniforme do material na largura do trecho com a motoniveladora. Depois disso, os dois materiais foram misturados e homogeneizados com grade de disco. Quando se obteve uma boa homogeneização dos materiais, estes foram umidificados e compactados. A compactação com o rolo compactador pé de carneiro de patas longas foi feita até que não houvesse mais penetração das patas. Após isso, a superfície foi regularizada, compactada com o rolo liso vibratório e finalmente imprimada com CM-30. A Figura 4.13 mostra alguns passos seguidos nessa etapa.

A construção da base do subtrecho solo-fosfogesso-cal iniciou pela pré-mistura do fosfogesso e do solo no depósito dos materiais como mostrado na Figura 4.14. O material assim obtido foi levado ao trecho e espalhado. A mistura com a cal se deu exatamente da mesma forma que no subtrecho solo-cal. O subtrecho foi imediatamente imprimado depois de sua compactação para limitar os riscos de expansão da mistura devido à infiltração de água da chuva. Apesar dessa precaução, foram observadas expansões de materiais nos bordos mais expostos aos escoamentos assim como nas transições dos subtrechos (Figura 4.15a), algumas horas depois da ocorrência de uma chuva noturna. Nesses locais, algumas amostras foram retiradas e levadas ao Laboratório de Mecânica das Rochas do Centro Tecnológico de FURNAS para serem submetidas ao ensaio de difração de Raios-X. Ressalta-se que essas ocorrências não foram observadas no restante do trecho. As áreas degradadas foram escarificadas, umedecidas e recompactadas (Figura 4.15b).

Para o trecho solo-fosfogesso, a mistura dos materiais envolvidos foi realizada na área de depósito da mesma maneira já explicada no subtrecho de solo-fosfogesso-cal. Durante a

aplicação da mistura na pista, foi observada certa dificuldade na compactação, principalmente devido ao alto teor de umidade do fosfogesso. Depois de sua compactação, o subtrecho foi imprimado para impermeabilizá-lo.

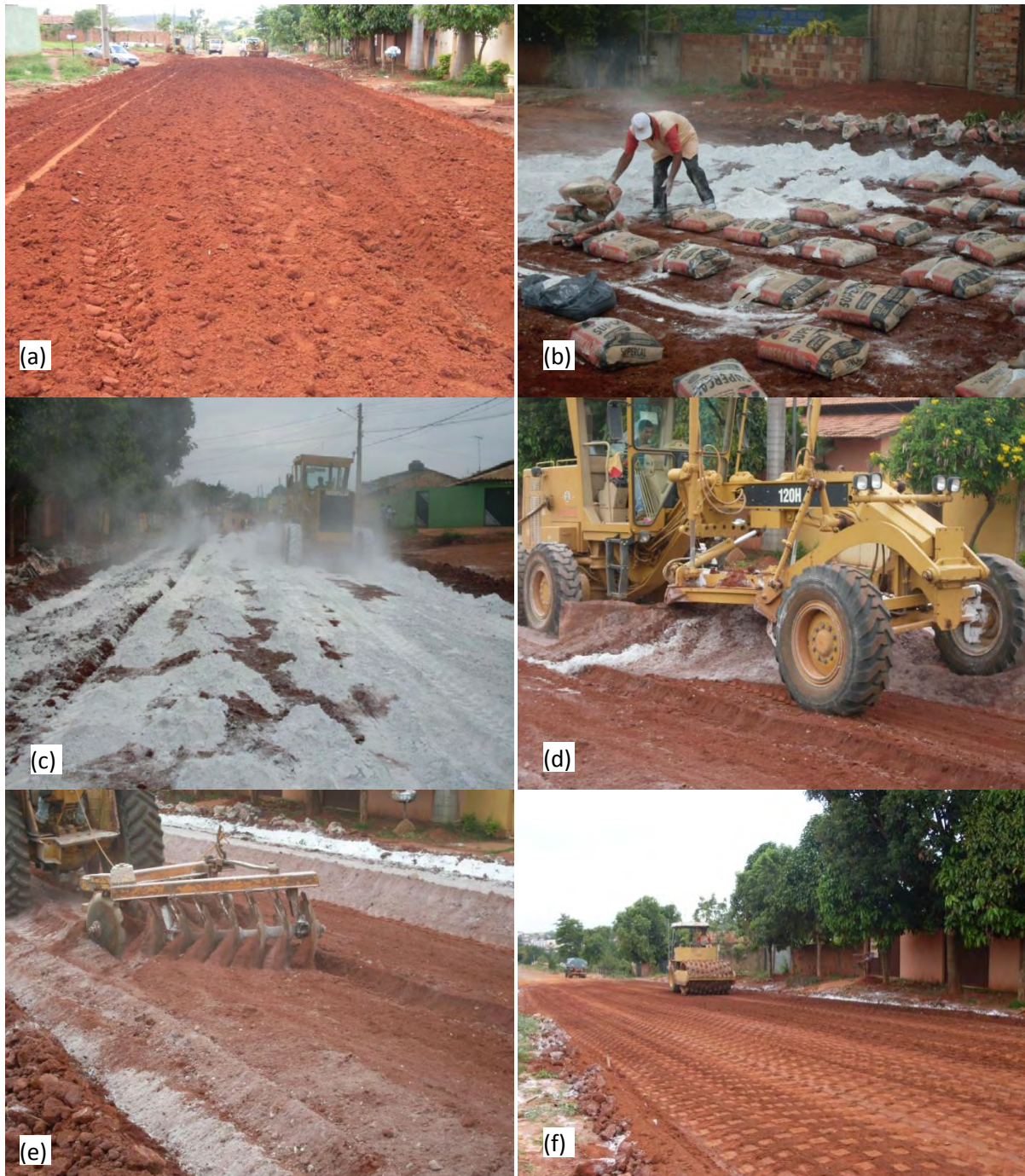


Figura 4.13 – Execução do subtrecho de solo-cal: (a) Solo distribuído no subleito; (b) Alinhamento dos sacos de cal e aberturas destes; (c) Espalhamento da cal; (d) Distribuição da mistura; (e) Homogeneização; (f) Compactação com rolo pé de carneiro.



Figura 4.14 - Diferentes etapas da mistura do solo com o fosfogesso.



Figura 4.15 – Problemas observados no subtrecho de solo-fosfogesso-cal: (a) Expansão da camada ; (b) Restauração do bordo esquerdo depois da expansão.

Após o término da execução de cada base constituída de solo fino, esta era submetida a um processo de secagem de 48 horas. Essa operação é de fundamental importância, pois proporciona aumento da capacidade de suporte e melhora as condições de recebimento da

imprimadura betuminosa. Além disso, permite examinar o padrão de trincamento que se desenvolve posteriormente (VILIBOR; NOGAMI, 2009). Os padrões de trincamento observados neste trabalho são apresentados na Figura 4.16(a). Ressalta-se que para o trecho solo-fosfogesso-cal, exceto os lugares que expandiram, não foi observado o aparecimento de trincas significativas (Figura 4.15b).

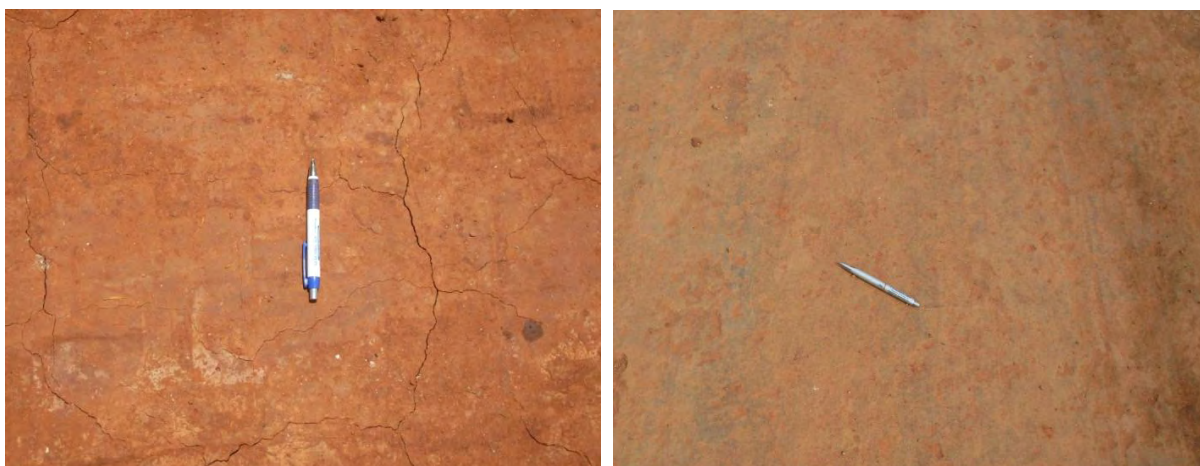


Figura 4.16 – Aspectos dos subtrechos após o período de secagem: (a) Trincamento da base do subtrecho de solo-cal;- (b) Ausência de trincas em grande parte do subtrecho de solo-fosfogesso-cal.

4.5.3 Execução da camada de revestimento

Depois da fase de secagem, os trechos foram varridos para eliminar o material solto presente na superfície e fechar as trincas de grandes aberturas de forma que estas não se propagassem até o revestimento (Figura 4.17). Em seguida, foram levemente irrigados para facilitar a penetração das partículas finas e da imprimadura final. Cerca de quinze minutos após a irrigação, a pista foi completamente imprimada com um ligante asfáltico de tipo CM-30. Vinte quatro horas mais tarde, foi aplicada uma pintura de ligação e logo depois, a pista foi revestida por uma camada de 3 cm de pré-misturado a frio produzido pela própria prefeitura, como mostrado na Figura 4.18, e compactada com um rolo compactador estático em tandem liso.

O trabalho de construção da pista terminou com a instalação dos dispositivos de drenagem superficial: meio fio e sarjetas. A Figura 4.19 mostra a configuração final da pista experimental, seis meses após sua execução.



Figura 4.17 – Tratamento das trincas: (a) Varrição da camada de base; (b) Aspecto da camada depois varrição.



Figura 4.18- Execução do revestimento: (a) Imprimação da base; (b) Aplicação do revestimento.



Figura 4.19 - Configuração final do trecho seis meses após sua construção.

4.6 ENSAIOS DE CAMPO

A execução das diferentes camadas da pista foi acompanhada da execução de ensaios de campo. Estes tiveram como objetivos o controle das compactações e a avaliação estrutural das camadas. Assim, foram realizados os ensaios de frasco de areia, “speedy”, viga Benkelman, prova de carga sobre placa e o penetrômetro dinâmico de cone (DCP). Para melhor entender o comportamento da pista, uma segunda etapa de ensaios de campo foi realizada 6 meses após a abertura da pista ao tráfego. Essa etapa constituiu-se pelo ensaio de viga Benkelman, prova de carga sobre o revestimento e DCP nas bases do pavimento, até atingir o subleito.

4.6.1 Frasco de areia e “Speedy”

O controle de compactação das camadas foi executado por meio da realização dos ensaios de “speedy” e frasco de areia, conforme as normas ME 92 (DNER, 1994a) e ME 52 (DNER, 1994b) respectivamente, e permitiram determinar a umidade e o peso específico aparente seco dos materiais em campo. A Figura 4.20 ilustra a execução desses dois ensaios sobre o subleito. Em cada subtrecho foram realizados três ensaios em cada camada (subleito e base), sendo um no bordo esquerdo, outro no eixo e o último no bordo direito conforme mostrado na Figura 4.21. Nos bordos, os ensaios eram realizados a 90 cm da extremidade do pavimento. Com os resultados obtidos em campo e no laboratório, foi possível determinar o grau de compactação das camadas e saber se estas atingiram as especificações de projeto.

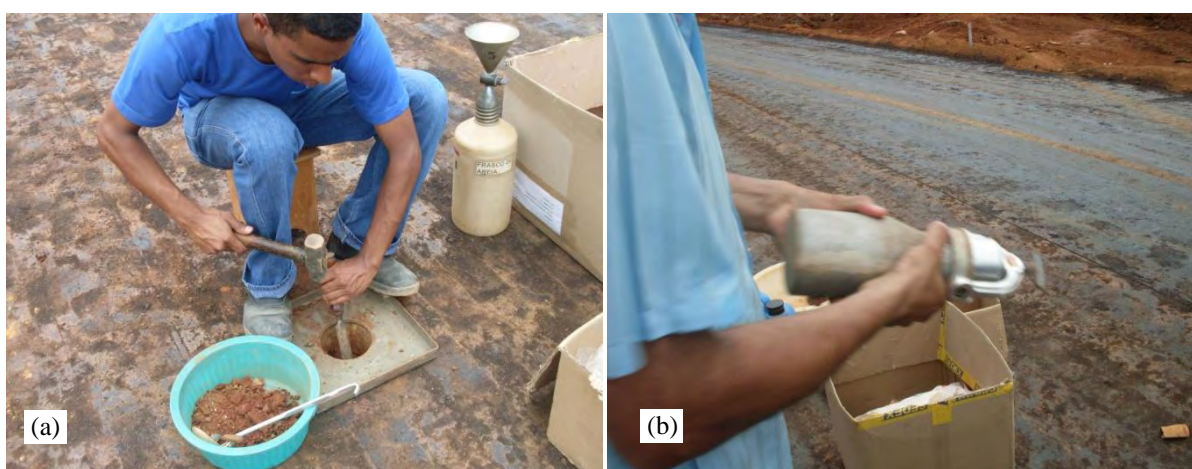


Figura 4.20 – Ensaios para controle de compactação: (a) Frasco de areia; (b) “Speedy”

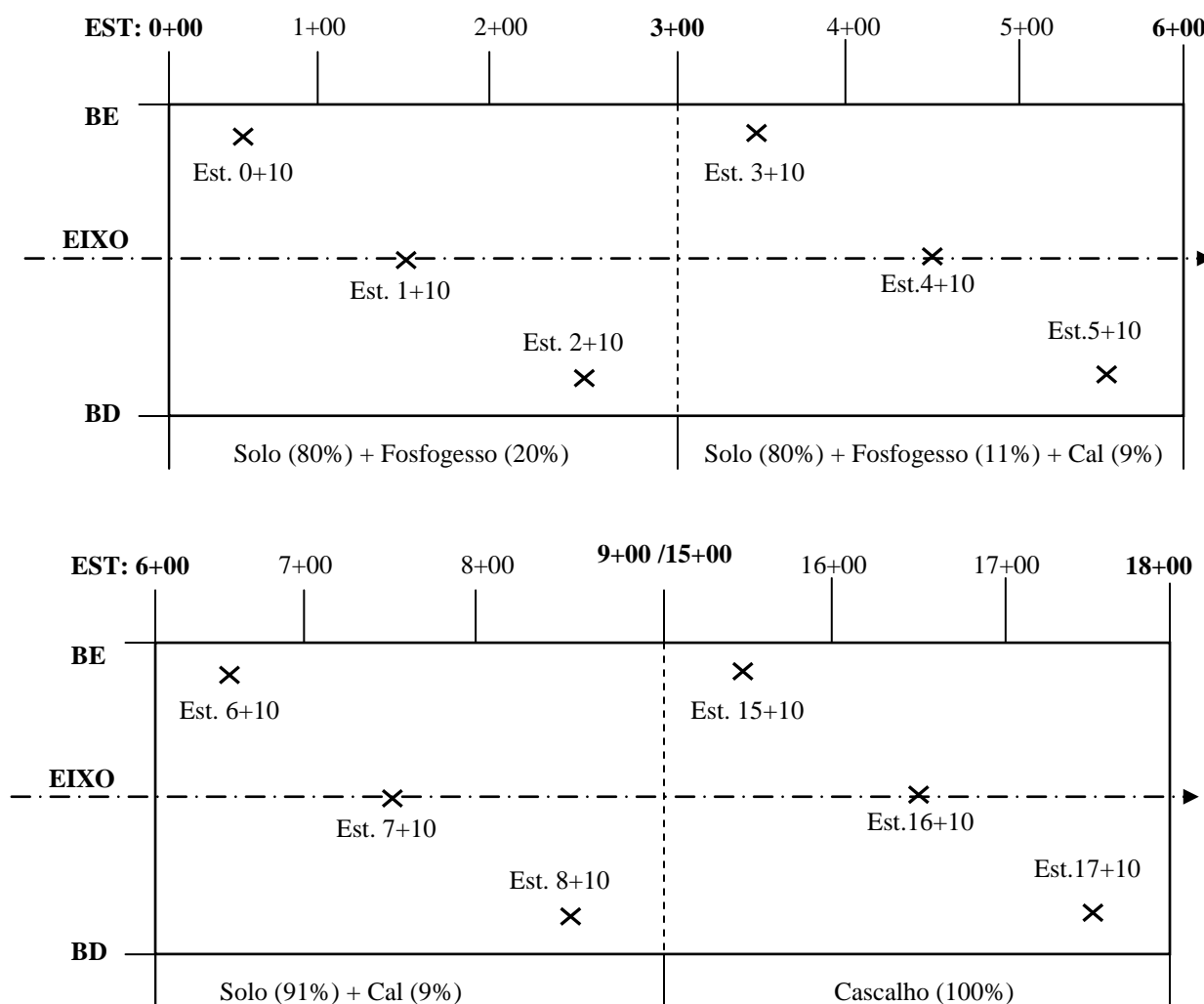


Figura 4.21 – Localização dos ensaios de frasco de areia, “Speedy”, prova de carga e DCP.
Obs. EST.: Estaca; BE: Bordo Esquerdo; BD: Bordo Direito.

4.6.2 Viga Benkelman

O ensaio de viga Benkelman foi realizado sobre o subleito, sobre a base e sobre o revestimento de acordo com as especificações da norma ME 24 (DNER, 1994c). Os ensaios foram realizados de 10 em 10 metros em cada bordo ao longo de todo o trecho experimental. A partir desse ensaio, foi possível determinar os deslocamentos gerados no pavimento quando submetido à ação de um caminhão carregado de 8,2 t no seu eixo traseiro e com pneus calibrados com 560 kPa. A Figura 4.22 ilustra a execução desse ensaio em cima do revestimento.



Figura 4. 22 - Execução do ensaio da viga Benkelman sobre o revestimento.

4.6.3 Prova de carga

Esse ensaio teve como objetivo medir as deformações verticais do pavimento quando submetido à ação de carregamento estático. Como equipamentos foram utilizados: uma placa metálica de 30 cm de diâmetro, um sistema de reação constituído por um caminhão de 8,2t, uma célula de carga acoplada a um macaco hidráulico para medição e aplicação dos carregamentos e três extensômetros com precisão de 0,01mm instalados sobre a placa de forma que suas posições formassem um triângulo equilateral. Os extensômetros eram fixados por meio de braços de aço, numa viga metálica horizontal instalada numa distância fora da área de interferência do ensaio. Os ensaios foram realizados com estágios de carregamentos com duração de 5 minutos cada. Após o último estágio de carregamento, procedeu-se o descarregamento com intervalos de carga maiores, mas também com tempo de estabilização de 5 minutos. Ressalta-se que não há norma brasileira para a realização desse ensaio.

Os ensaios foram realizados sobre as camadas de subleito, base e revestimento nas mesmas estacas definidas para os ensaios de frasco de areia e “speedy” (Figura 4.20). Para evitar qualquer interferência entre os ensaios, foi observada uma distancia mínima de 50 cm entre dois pontos ensaiados. A Figura 4.23 mostra a execução da prova de carga sobre as camadas de subleito e de revestimento no eixo do pavimento.



Figura 4.23 - Execução do ensaio de prova de carga estática; (a) Sobre o subleito; (b) Sobre o revestimento.

4.6.4 Ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP)

O ensaio com penetrômetro dinâmico foi realizado no subleito e na base. Constituiu na aplicação de golpes sucessivos, deixando cair livremente um peso de 8 kg numa altura constante de 57,5cm em cima de um suporte conectado a uma haste de 1m de comprimento e munida de uma ponta em forma de cone a 60° e 20 mm de diâmetro. A energia de queda aplicada faz penetrar essa ponta na camada. Em seguida, mede-se o quanto penetrou no solo com uma régua fixada ao equipamento. As leituras eram feitas apenas depois ter verificado que o cone tivesse penetrado até o seu diâmetro maior. Os ensaios DCP foram executados nas mesmas estacas definidas para o frasco de areia e o “Speedy” e de acordo com a norma D6951-03 (ASTM, 2003). A Figura 4.24 mostra a execução desse ensaio no subleito.



Figura 4.24 - Execução do ensaio DCP no subleito.

4.6.5 Medição dos parâmetros radiométricos

As medições radiométricas foram realizadas nos subtrechos onde foi utilizado o fosfogesso para a composição da camada de base, a um metro de altura do nível do solo, em três grades regulares com espaçamento de 3 metros entre pontos. Os ensaios foram executados com equipamentos e por técnicos do CRCN-CO após a compactação da camada (Figura 4.25). O objetivo dessa medição foi avaliar a existência ou não de riscos radiativos da utilização do fosfogesso como material de pavimentação durante a fase de construção.



Figura 4.25 - Medições radiométricas nos subtrechos constituídos de fosfogesso

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório realizados com os materiais estudados e dos ensaios de campo executados na pista experimental durante sua construção e seis meses após a abertura ao tráfego.

5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

5.2.1 Ensaios de caracterização

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e a classificação dos materiais estudados de acordo com a “Transportation Research Board” (TRB) e o Sistema de Classificação Unificado (SUCS), sendo estes os sistemas de classificações tradicionalmente utilizados na área de pavimentação.

a) Massa Específica dos Grãos

Os valores obtidos na determinação da massa específica dos grãos estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de massa específica dos grãos

Materiais	Fosfogesso	Solo	Solo (80%) + FG (20%)	Solo (80%) +FG (11%) + Cal (9%)	Solo (91%) + Cal (9%)	Cascalho
ρ_s (g/cm ³)	3,293	2,697	2,876	2,841	2,775	2,810

Obs. ρ_s = massa específica dos grãos, FG = fosfogesso.

A massa específica dos grãos obtida para o fosfogesso foi semelhante aos valores de 3,359 g/cm³ e 3,542 g/cm³ encontrados por Mesquita (2007) e Rufo (2009), respectivamente. Isto seria esperado, pois o fosfogesso utilizado nesta pesquisa provém da mesma mineradora das

demais. A pequena variação observada nos valores obtidos pode estar relacionada com a época da coleta do fosfogesso e com a profundidade e localização dos furos no depósito do resíduo.

Quanto ao solo e ao cascalho, os valores obtidos estão dentro da faixa geralmente observada para solos da região (entre 2,60 e 2,80 g/cm³), onde geralmente podem ser encontrados os seguintes minerais: caulinita (2,61 – 2,68 g/cm³), quartzo (2,59 – 2,63 g/cm³) e gibbsita (2,40 g/cm³).

Observa-se que adição de 20% de fosfogesso ao solo aumentou o valor de massa específica dos grãos. Isso ocorre porque a massa específica dos grãos do fosfogesso é maior que a do solo, o que proporciona o aumento desse parâmetro na mistura.

A incorporação de 9% de cal ao solo aumentou ligeiramente a massa específica dos grãos. Por outro lado, na mistura de solo (80%) + fosfogesso (11%) a adição de 9% de cal provocou redução pouco significativa desse parâmetro.

b) Análise Granulométrica

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica sem e com uso de defloculante hexametáfosfato de sódio na fase de sedimentação. Considerando apenas a distribuição granulométrica determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984a), observa-se que o solo é considerado uma areia silto-argilosa, o fosfogesso um silte areno-argiloso e as misturas areias silte-argilosas. Quando não se utiliza o defloculante proposto pela norma, são verificadas variações nos resultados obtidos.

O uso do defloculante gera desagregação das partículas de solo, tornando este mais fino. Este é um comportamento típico dos solos tropicais, cujas concreções são somente desfeitas pela ação do defloculante.

Tabela 5.2 – Frações granulométricas dos materiais estudados

Parâmetros	Solo	FG	Solo+FG	Solo+FG+Cal	Solo+Cal	Cascalho
<i>Sem defloculante</i>						
Pedregulho (%)	0,80	0,00	0,80	0,80	0,79	40,98
Areia (%)	71,44	51,88	67,75	73,15	79,69	33,18
Silte (%)	27,56	47,83	31,14	25,09	19,21	23,98
Argila (%)	0,21	0,30	0,31	0,96	0,31	1,87
<i>Com defloculante</i>						
Pedregulho (%)	0,80	0,00	0,80	0,80	0,79	40,98
Areia (%)	54,35	35,10	67,95	56,50	58,16	26,56
Silte (%)	13,63	62,32	23,66	41,13	37,05	14,21
Argila (%)	34,23	2,59	7,59	1,57	3,99	18,25

Obs. FG = Fosfogesso.

No ensaio de sedimentação sem defloculante, o fosfogesso apresentou uma fração maior de areia em comparação à de silte. No entanto, quando foi realizado o ensaio com defloculante, houve aumento significativo da quantidade de silte e diminuição da fração de areia. Isto mostra que o defloculante reage nesse material desfazendo os torrões formados pelas ligações entre as partículas menores. Esta análise também foi realizada por Mesquita (2007) e Rufo (2009).

A incorporação de fosfogesso ao solo parece gerar agregação das partículas, pois obteve-se redução no teor de argila e aumento nos teores de silte e areia. No entanto, ao analisar o ensaio sem o uso do defloculante, é possível observar que as variações nas porcentagens de cada faixa granulométrica ocorrem devido à própria proporção de cada material utilizada na mistura (80% solo e 20% fosfogesso). Na mistura solo-fosfogesso, o defloculante provocou variações entre as porcentagens de finos da mistura (silte e argila).

Já a adição da cal ao solo gera floculação das partículas, pois são observados aumentos dos teores de areia e de silte. Entre os dados obtidos sem e com o uso do defloculante, são observadas diferenças de valores caracterizadas por porcentagem maior de fino com o uso do defloculante.

Ao se misturar os três materiais (solo – fosfogesso – cal), a mesma tendência é observada: redução no teor de argila e aumento no teor de silte e areia. O uso ou não do defloculante nesta mistura gera alterações significativas entre as porcentagens de silte e areia.

Quanto ao cascalho, pela análise granulométrica tem-se que ele pode ser classificado como um pedregulho – areno – argiloso. Comparando os ensaios feitos com e sem uso do defloculante, verifica-se que o defloculante atua na fração areia e silte, desfazendo essas agregações e aumentando o teor de argila. Dessa forma, é possível identificar o caráter laterítico desse material.

Nas Figuras 5.1 a 5.6 estão apresentadas as curvas granulométricas dos diferentes materiais estudados, onde é possível observar com maior clareza as diferenças entre as curvas com e sem o uso do defloculante. Observa-se que as menores diferenças entre essas curvas existem nas amostras onde o fosfogesso está presente.

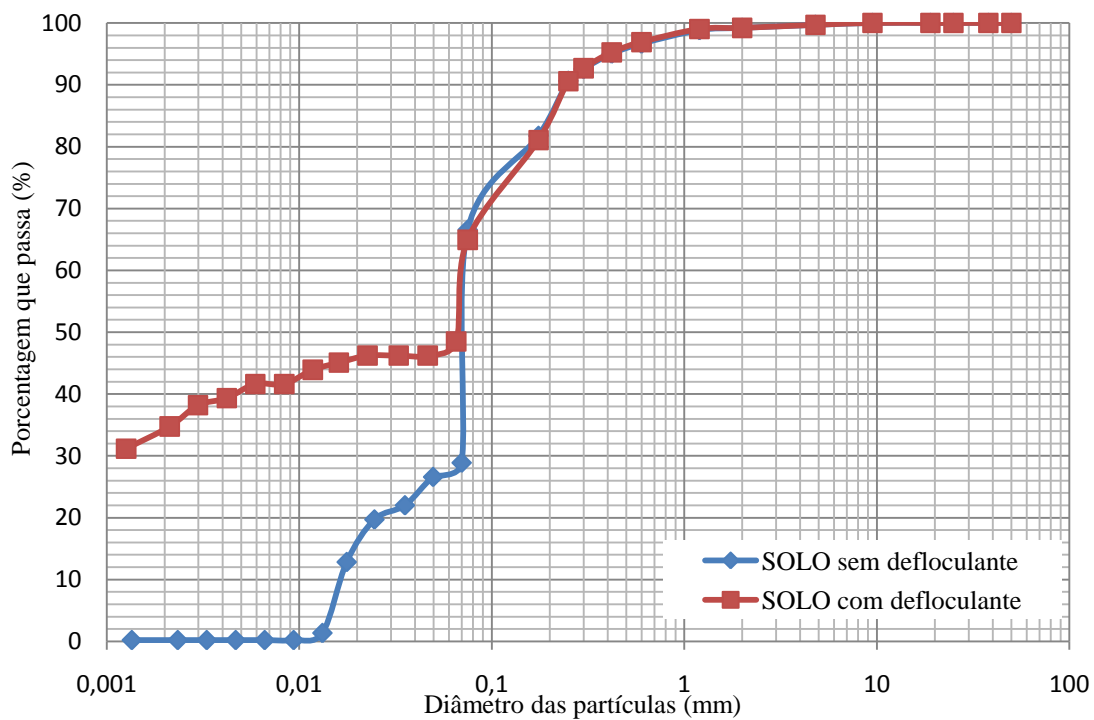


Figura 5.1 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o solo.

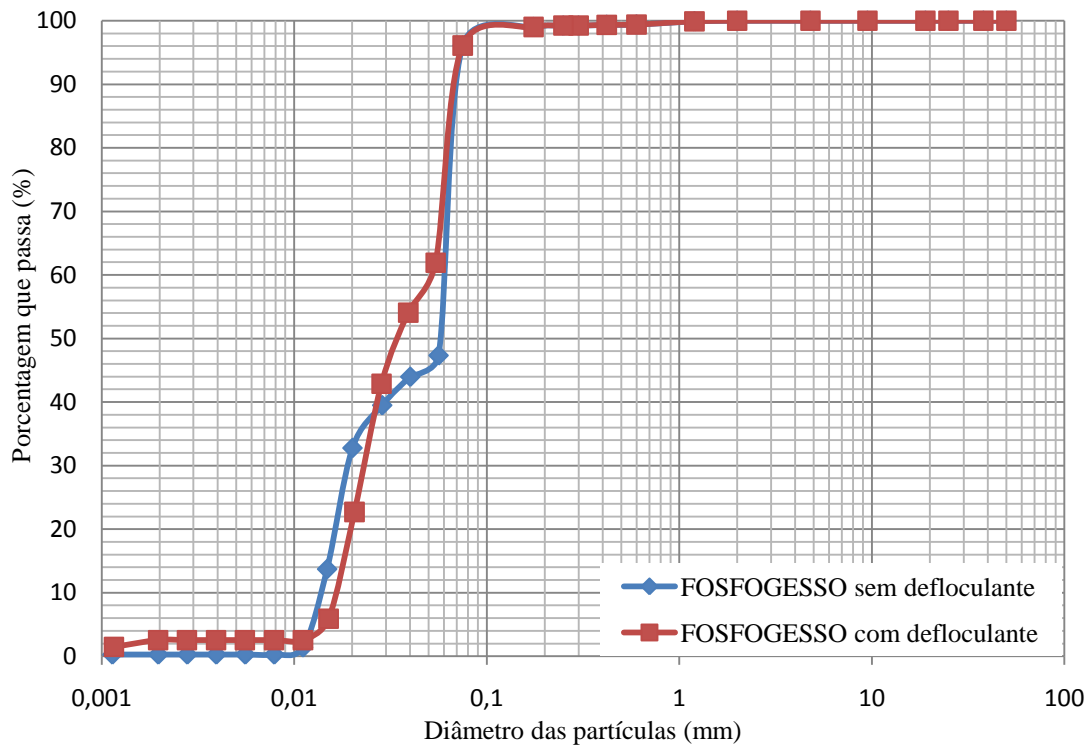


Figura 5.2 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o fosfogesso.

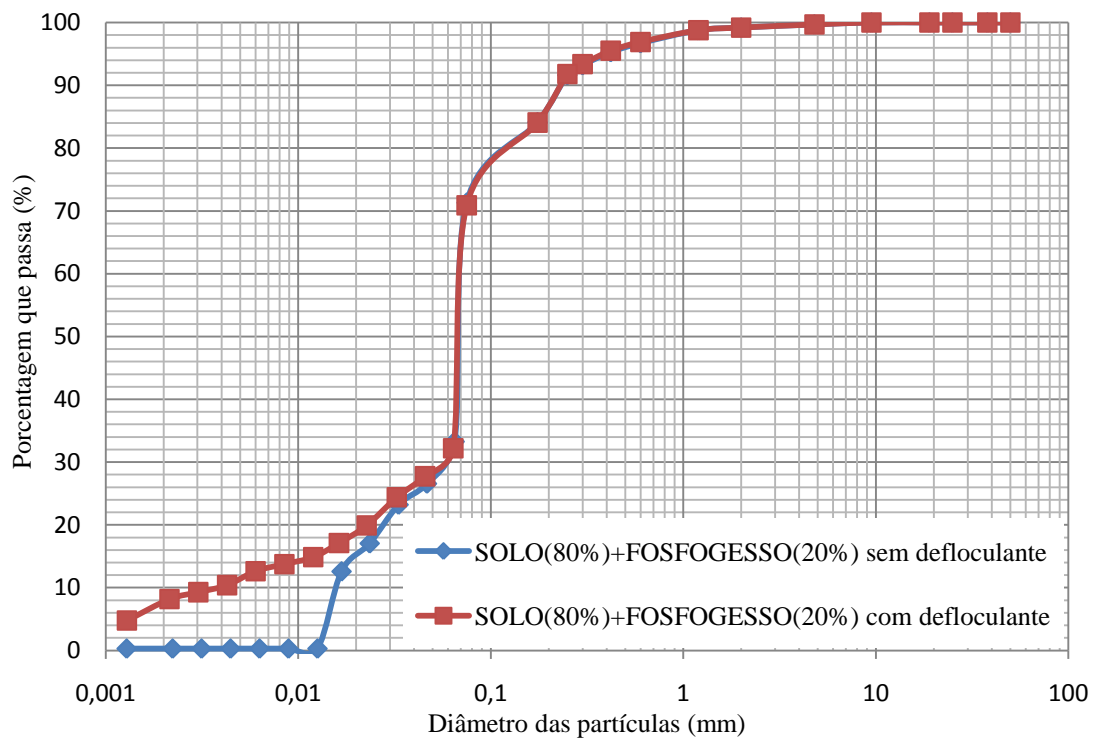


Figura 5.3 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para a mistura Solo (80%)+Fosfogesso(20%).

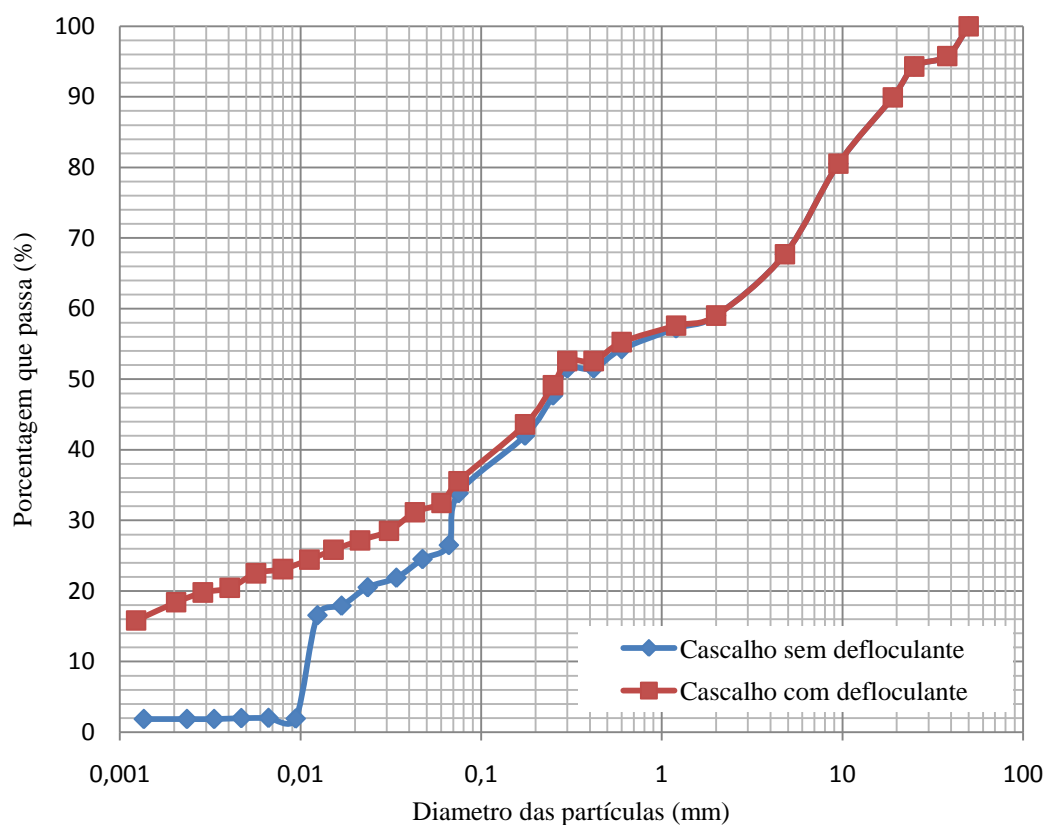


Figura 5.6 – Curvas granulométricas sem e com defloculante obtidas para o cascalho.

Nas Figuras 5.7 e 5.8, os mesmos dados já apresentados são mostrados de outra forma: na primeira tem-se todas as curvas granulométricas obtidas para os diferentes materiais estudados sem o uso do defloculante. Verifica-se que o fosfocesso apresenta uma curva com material mais fino que os demais. O solo e as misturas apresentam curvas bastante semelhantes. Já na segunda, tem-se as curvas para os ensaios com defloculante. Neste caso, são observados padrões diferenciados para as curvas obtidas. Sendo assim, pensando na aplicação desses materiais em campo, em termos de granulometria acredita-se que as curvas da Figura 5.7 representariam melhor essa situação já que nas obras não ocorre o contato dos solos com o defloculante.

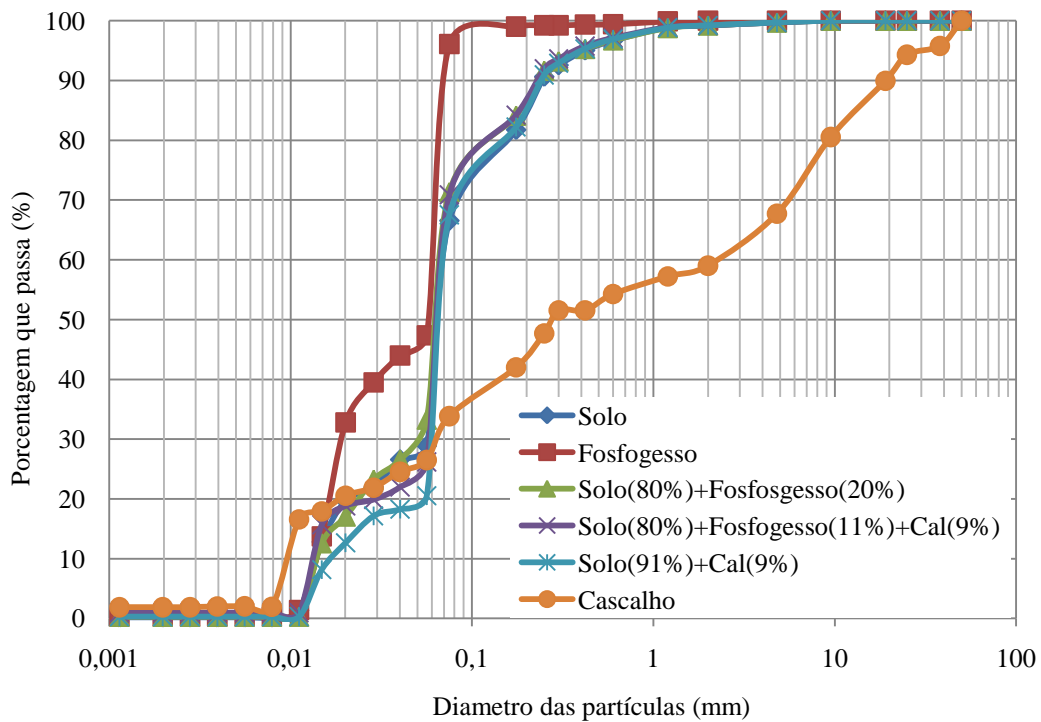


Figura 5.7 – Comparação entre as curvas granulométricas sem defloculante obtidas para os diferentes materiais.

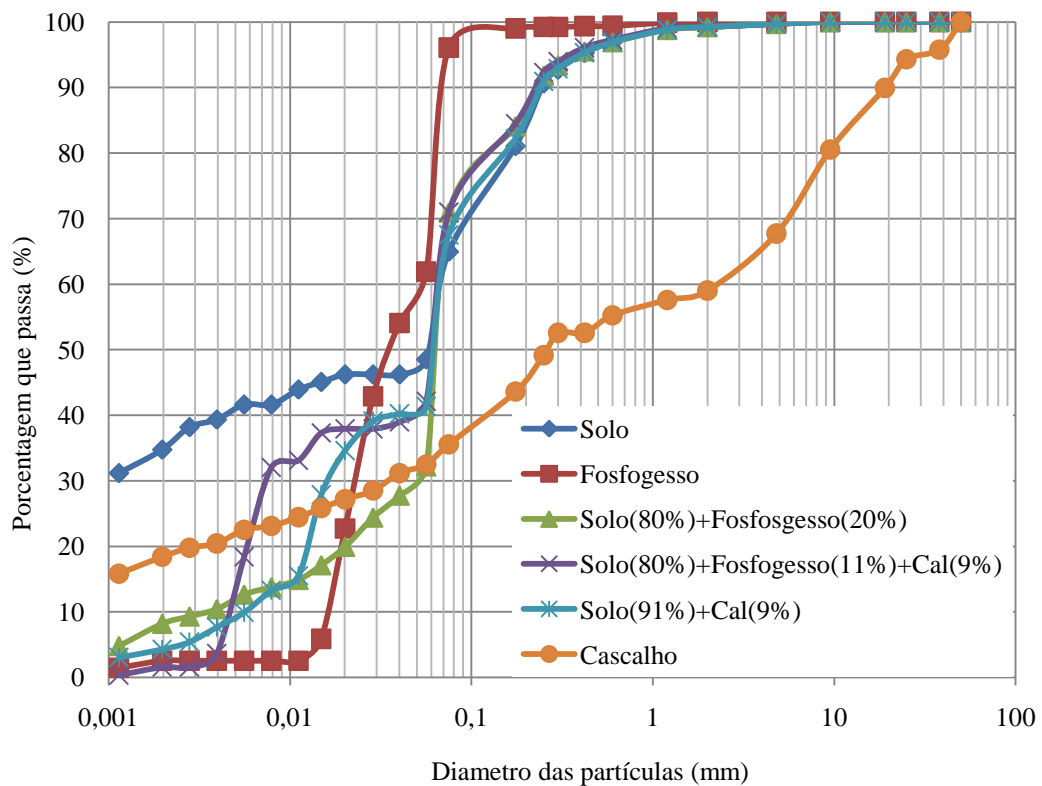


Figura 5.8 – Comparação entre as curvas granulométricas com defloculante obtidas para os diferentes materiais.

c) Limites de consistência

Os valores obtidos de limite liquidez, plasticidade e índice de plasticidade dos diferentes materiais estão apresentados na Tabela 5.3. Como já discutido por Mesquita (2007) e Rufo(2009), o fosfogesso não apresenta a trabalhabilidade necessária para a execução dos ensaios de limite de consistência. Portanto, este pode ser classificado como não plástico.

Tabela 5.3. Resultados dos ensaios de limites de consistência

Parâmetros	Solo	FG	Solo+FG	Solo+FG+Cal	Solo+Cal	Cascalho
w _L (%)	34	-	38	32	31	38
w _p (%)	29	-	30	29	28	25
IP (%)	5	NP	8	3	3	13

Obs.: w_L=Limite de liquidez, w_p=Limite de plasticidade, IP=Índice de plasticidade; NP=Não Plástico; FG=fosfogesso

Verifica-se que o solo estudado apresenta baixo valor de IP. A incorporação de fosfogesso ao solo gerou aumento de w_L e conseqüentemente de IP. No entanto, a adição de cal consegue corrigir esta questão tanto para o solo quanto para a mistura solo-fosfogesso-cal. Quanto ao cascalho, verifica-se que sua parcela fina apresenta plasticidade maior que a dos demais materiais.

d) Classificação dos materiais

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica com defloculante e de limites de consistência, foi possível classificar as amostras estudadas de acordo com a “Transportation Research Board” (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A Tabela 5.4 apresenta a classificação dos materiais nos referidos sistemas.

Tabela 5.4 – Classificação dos materiais de acordo com os sistemas convencionais

Classificação	Solo	FG	Solo+FG	Solo+Cal	Solo+FG+Cal	Cascalho
TRB	A-4	A-4	A-4	A-4	A-4	A-2-6
SUCS	ML	ML	ML	ML	ML	SC

Obs.: FG= Fosfogesso; TRB= “Transportation Research Board”; SUCS= Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Observa-se que o solo, o fosfogesso e bem como as diferentes misturas avaliadas são classificados como solo siltoso (A-4) pela classificação TRB e como areia siltosa (ML)

segundo o SUCS. Ressalta-se que os índices classificatórios do fosfogesso correspondem àqueles encontrados por Mesquita (2007) e Rufo (2009). Quanto ao cascalho, este é classificado como pedregulho plástico (A-2-6) pela a TRB e como areia argilosa (SC) segundo o SUCS.

5.2.2 Classificação MCT

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram as famílias de curvas de deformabilidade e as de compactação obtidas a partir da metodologia MCT para o solo estudado. Na Tabela 5.5 estão apresentados os parâmetros obtidos a partir dessa metodologia.

Na Figura 5.11 está apresentada a localização do ponto para a classificação do grupo MCT para o solo estudado. Observa-se que o solo estudado pertence ao grupo de LG', sendo assim considerado um solo de comportamento argiloso laterítico.

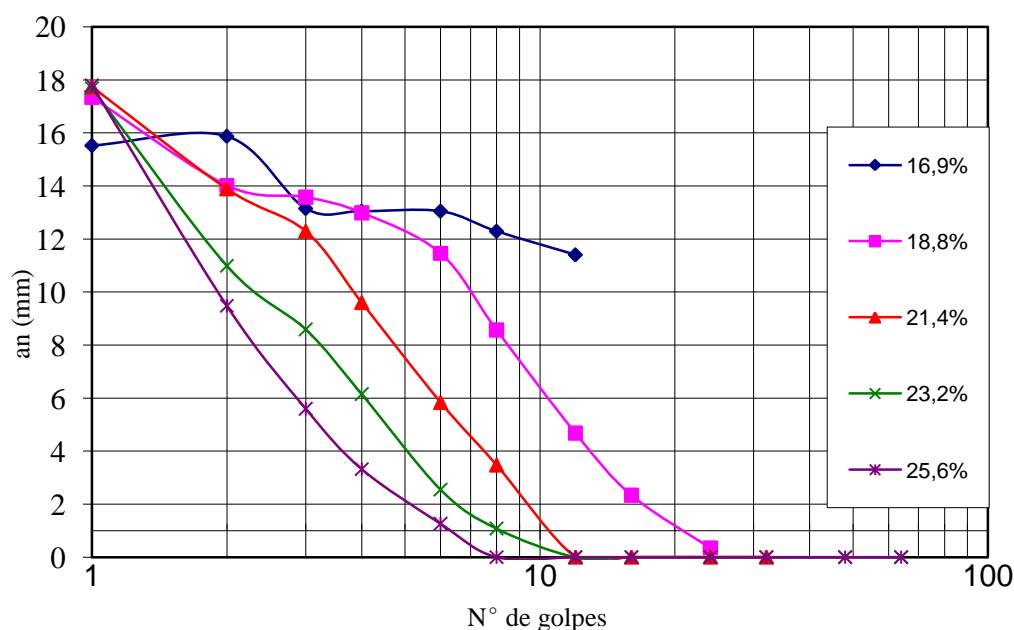


Figura 5.9 – Família de curvas de deformabilidade

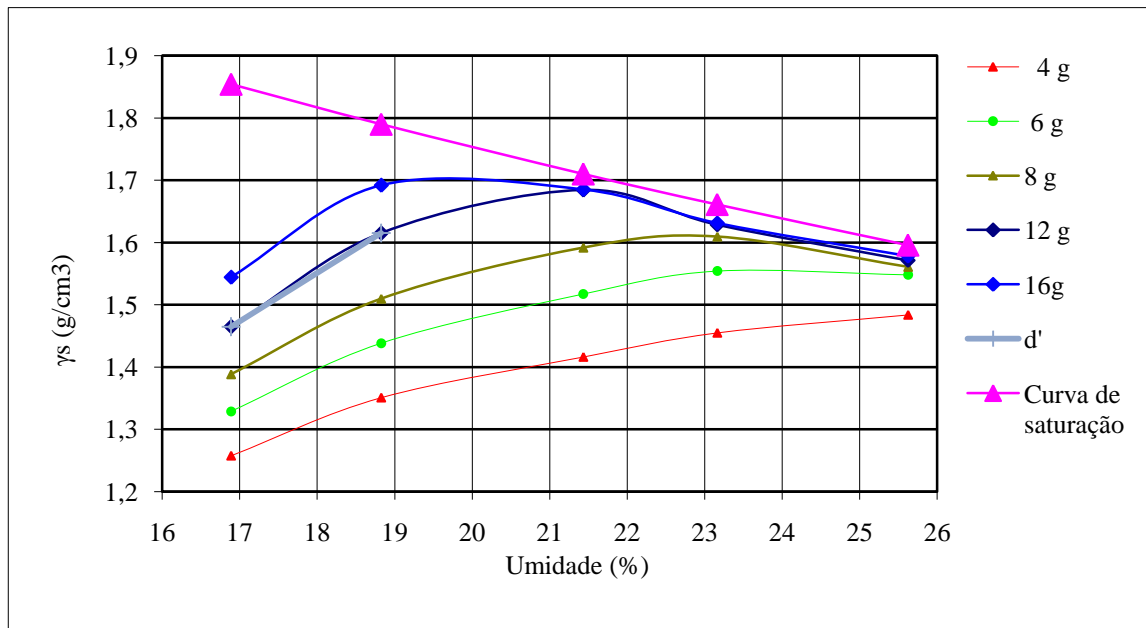


Figura 5.10 – Curvas de compactação mini-MCV

Tabela 5. 5 Parâmetros obtidos a partir dos ensaios da metodologia MCT para o solo

c'	d'	Pi (%)	e'
2,3	82,47	84,0	1,03

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

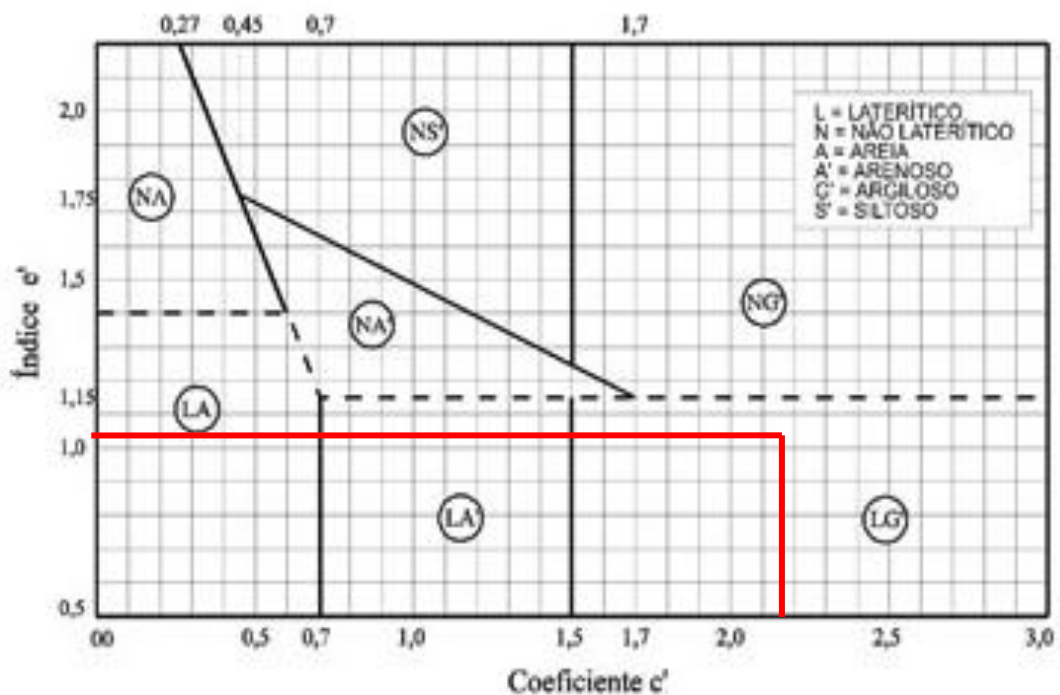


Figura 5.11. Localização do grupo MCT do solo estudado.

5.2.3 Compactação, Expansão e CBR

A Tabela 5.6 mostra os valores de peso específico aparente seco máximo, umidade ótima, expansão e “California Bearing Ratio” (CBR) obtidos para o solo, o cascalho e as misturas compactadas na energia Proctor intermediário. Esta energia foi escolhida, pois foi aquela específica para a construção da camada de base do trecho experimental. Ainda nessa tabela, constam os valores desses parâmetros obtidos para o solo compactado na energia Proctor normal, pois esta seria a condição do material utilizado no subleito do trecho experimental. As Figuras 5.12 a 5.17 mostram as curvas de compactação, de saturação ($S_r = 100\%$) e de umidade x CBR obtidas.

Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, expansão e CBR

Amostra	Energia de compactação	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{ot} (%)	Exp. (%)	CBR (%)
Solo	Normal	14,70	22,0	0,05	10
Solo	Intermediária	16,00	21,0	0,00	14
Solo+FG	Intermediária	14,90	25,3	0,30	24
Solo+Cal	Intermediária	14,30	25,8	0,07	44
Solo+FG+Cal	Intermediária	14,80	24,3	1,05	88
Cascalho	Intermediária	19,00	11,1	0,13	41

Obs.: FG = fosfogesso; γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo; w_{ot} = umidade ótima; Exp. = expansão; CBR = “California Bearing Ratio”.

Verifica-se que o solo apresenta parâmetros de compactação referentes a solos finos. Dessa forma, ele sozinho tem uso limitado em camadas de pavimentos, podendo apenas ser utilizado como subleito ou reforço do subleito. Mesmo aumentando a energia de compactação, neste caso não foi verificado ganhos significativos.

A adição do fosfogesso e da cal provocou diminuição do peso específico aparente seco máximo, aumento da umidade ótima e aumento da capacidade de suporte em relação aos valores obtidos para o solo compactado na energia intermediário. A mistura solo – fosfogesso – cal apresentou a maior capacidade de suporte, porém foi essa mistura que apresentou a maior expansão (1,05%). Quando comparado aos estudos de Rufo (2009) para as mesmas dosagens, essa expansão é ligeiramente inferior ao valor obtido com o solo de Goiânia – GO (2,25%) e muito menor do que aqueles encontrados com misturas realizadas com o solo coletado em Catalão – GO (18,5% e 29,6%). Isto confirma que o tipo de solo determina a

viabilidade da utilização das misturas solo +fosfogesso+cal em pavimentação e que seria interessante realizar estudos para controlar esse fenômeno

No caso das misturas com cal, ressalta-se que os ensaios de CBR foram realizados em corpos de prova sem cura. Provavelmente, se forem considerados períodos de cura para essas misturas, poderão ser observados ganhos de resistência devido à ocorrência de reações químicas durante o processo de estabilização. No entanto, como o CBR é um ensaio limitado para esse tipo de análise e não é o mais indicado para os estudos com misturas estabilizadas quimicamente, nesta pesquisa optou-se por fazer essa avaliação nos ensaios de compressão simples e triaxial dinâmico apresentados nos próximos itens.

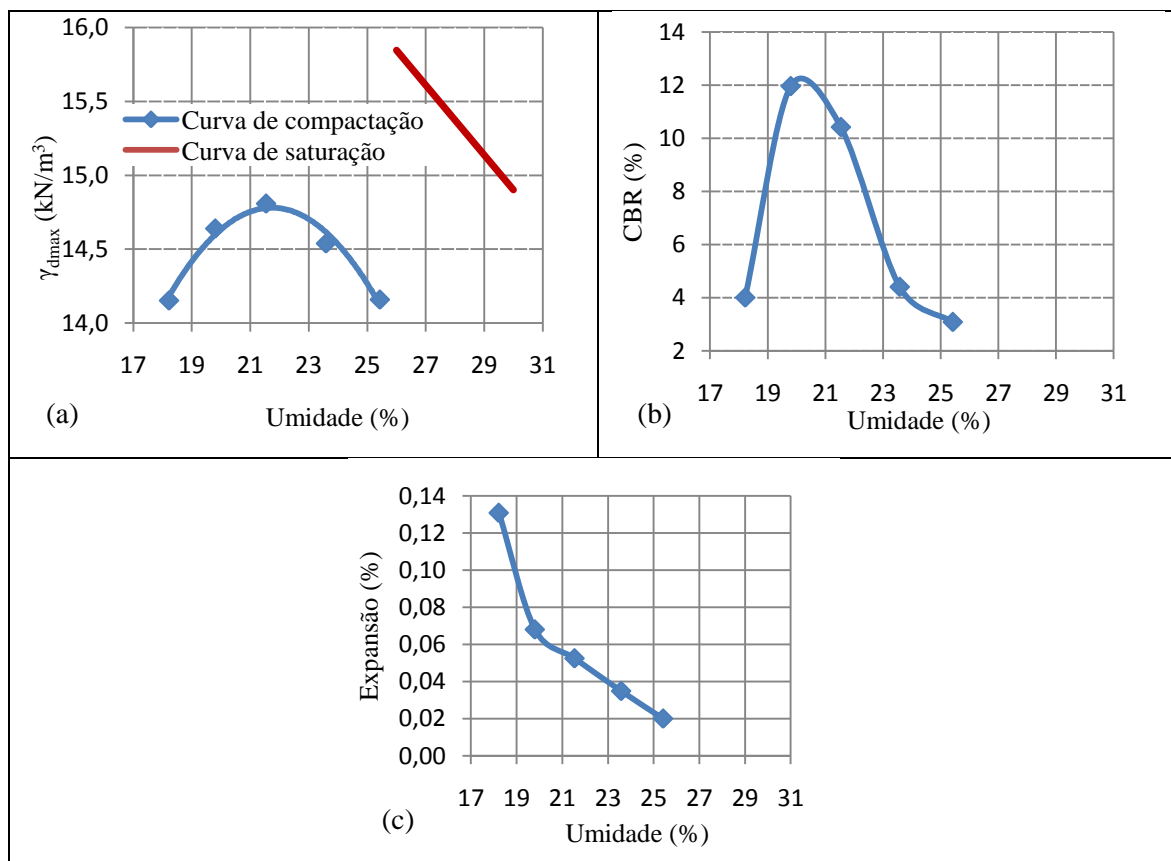


Figura 5.12 – Resultados obtidos para o solo compactado na energia normal: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

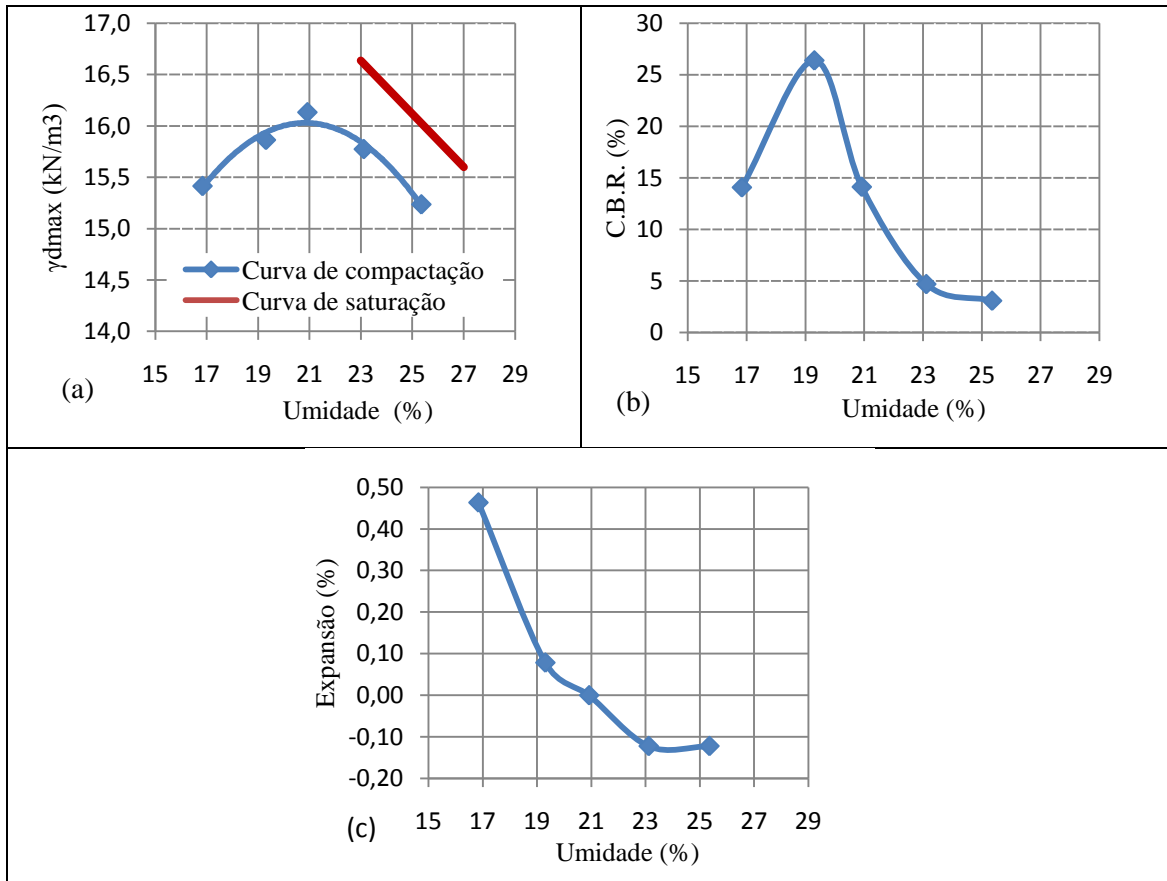


Figura 5.13 – Resultados obtidos para o solo compactado na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

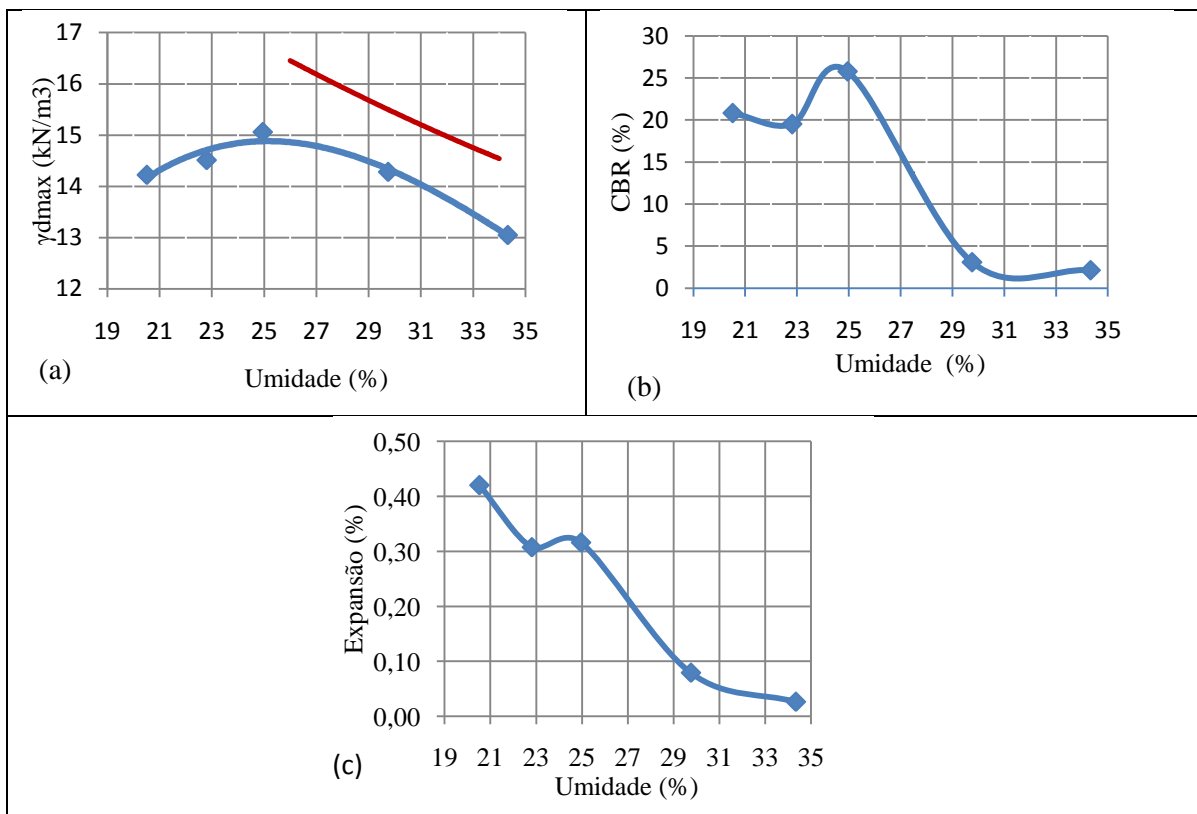


Figura 5.14 – Resultados obtidos para a mistura solo+fosfogesso compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

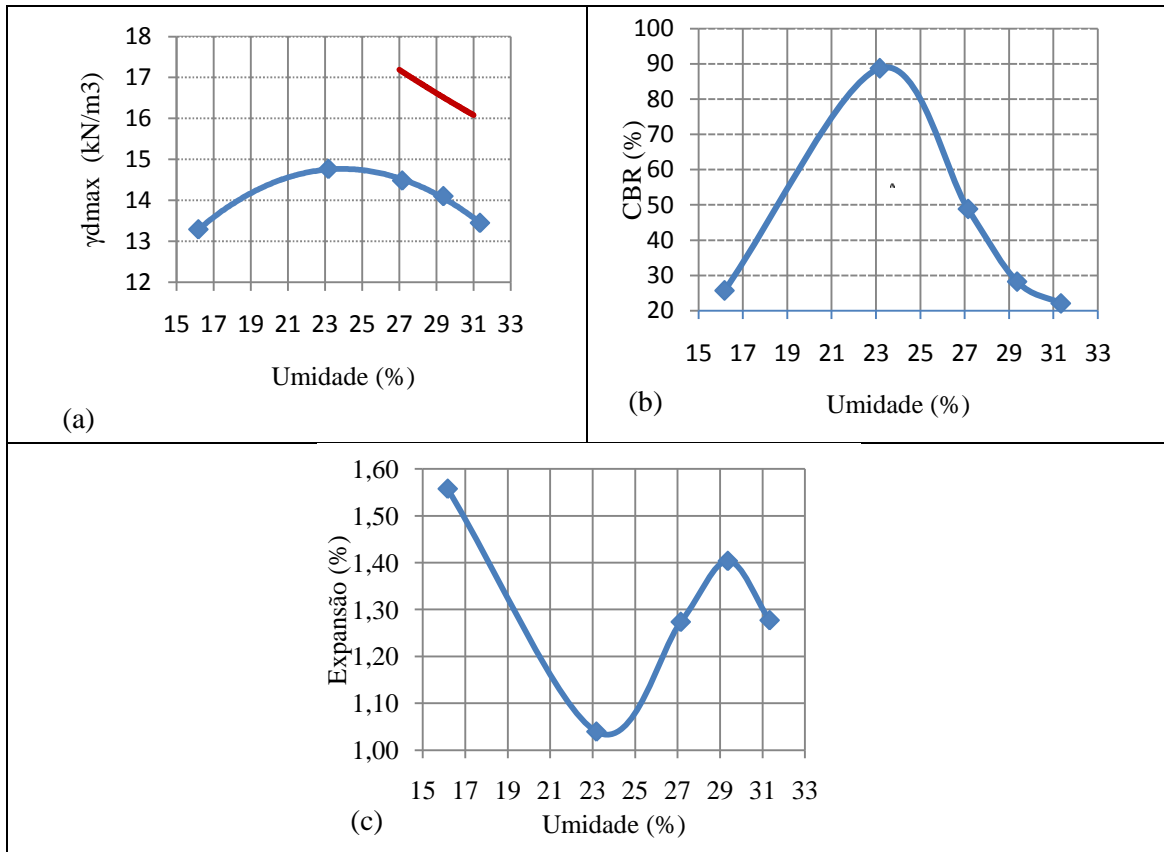


Figura 5.15 – Resultados obtidos para a mistura solo+fosfogesso+cal compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

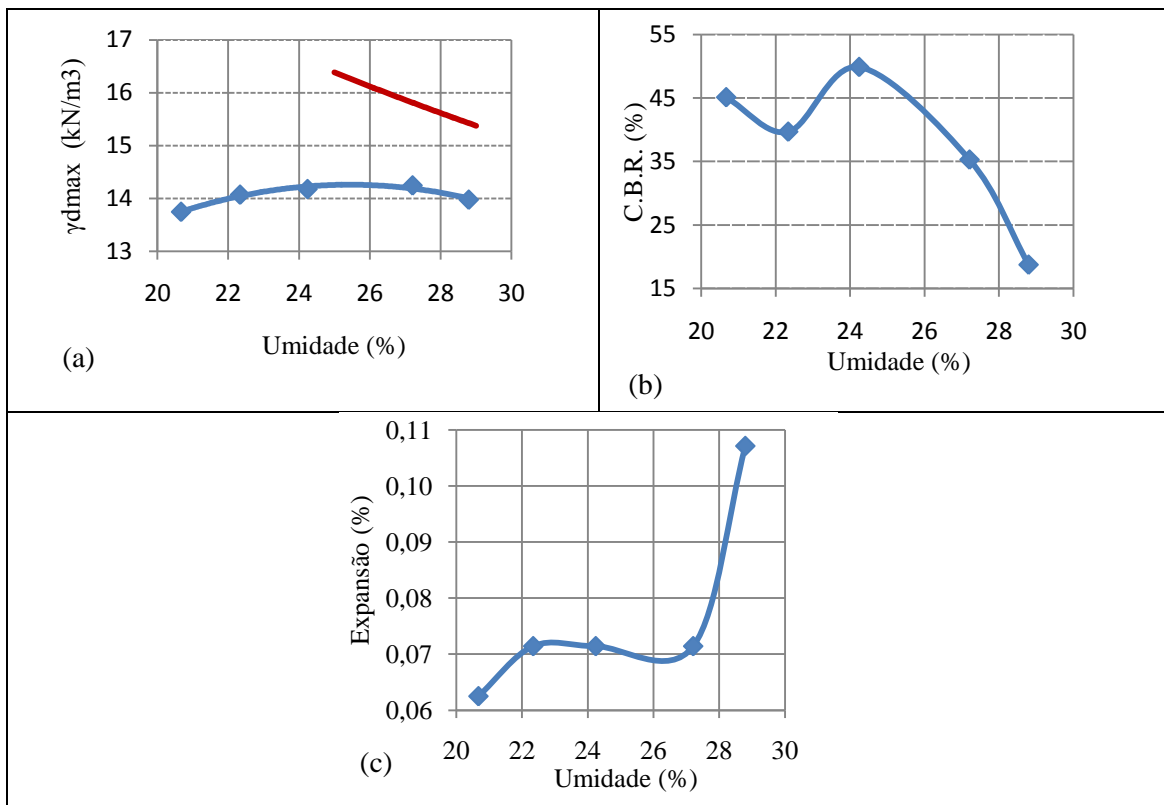


Figura 5.16 – Resultados obtidos para a mistura solo+cal compactada na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

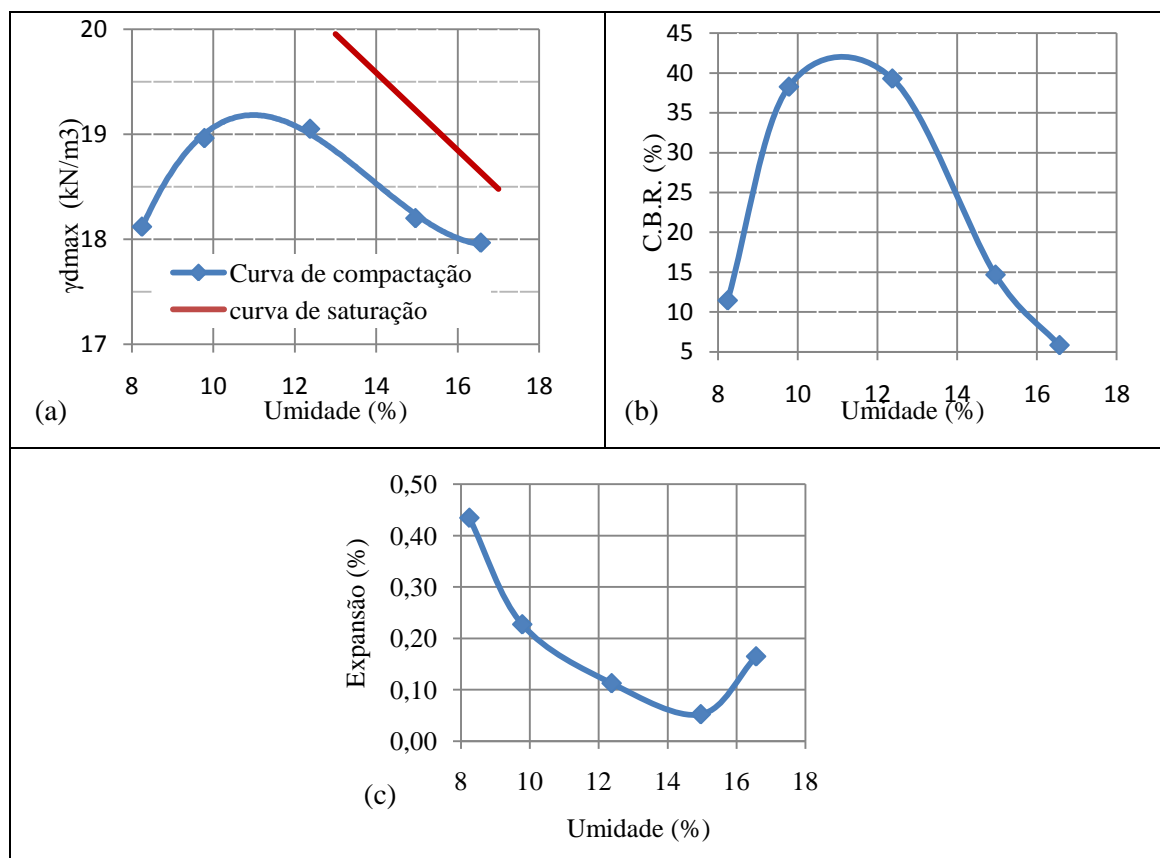


Figura 5.17 – Resultados obtidos para o cascalho compactado na energia intermediária: (a) Curvas de compactação e saturação; (b) Curva de umidade x CBR; (c) Curva umidade x Expansão

5.2.4 Resistência à compressão simples

O resumo dos resultados obtidos no ensaio de compressão do solo assim como das misturas sem e com cura estão apresentados na Tabela 5. 7. Nas Figuras 5.18 a 5.20 são apresentadas as curvas obtidas nos ensaios.

Tabela 5.7 Resistência à compressão das misturas com e sem cura.

Amostra	Pressão de ruptura (kPa)		
	Sem cura	21 dias	49 dias
Solo	376	-	-
Solo+Fosfогesso	307	389	803
Solo+Fosfогesso+Cal	444	1722	-
Solo+Cal	536	1308	940

Observa-se que o material que apresentou a menor resistência à compressão simples sem cura foi a mistura do solo com fosfогesso. Com 21 dias de cura, o ganho de resistência foi pequeno. No entanto, após 49 dias verificou-se mais que o dobro de ganho, mostrando a estabilização química que ocorre entre os materiais ao longo do tempo.

A mistura solo+cal apresentou o melhor comportamento inicial. Este comportamento se deve às reações instantâneas de floculação entre a cal e as partículas de solo que, de acordo com Bell (1996), aumenta a resistência inicial da mistura. Percebe-se também um aumento significativo desse parâmetro com a cura. Isso mostra a existência de reações pozolânicas entre os dois materiais envolvidos. Porém, foi observada uma queda de resistência com 49 dias de cura. Comportamento parecido foi observado por Lovato (2004) e Araújo e Barroso (2007). Provavelmente, isto ocorre devido à formação da etringita ou da traumasita que provocam uma queda de resistência das misturas depois do término das reações pozolânicas.

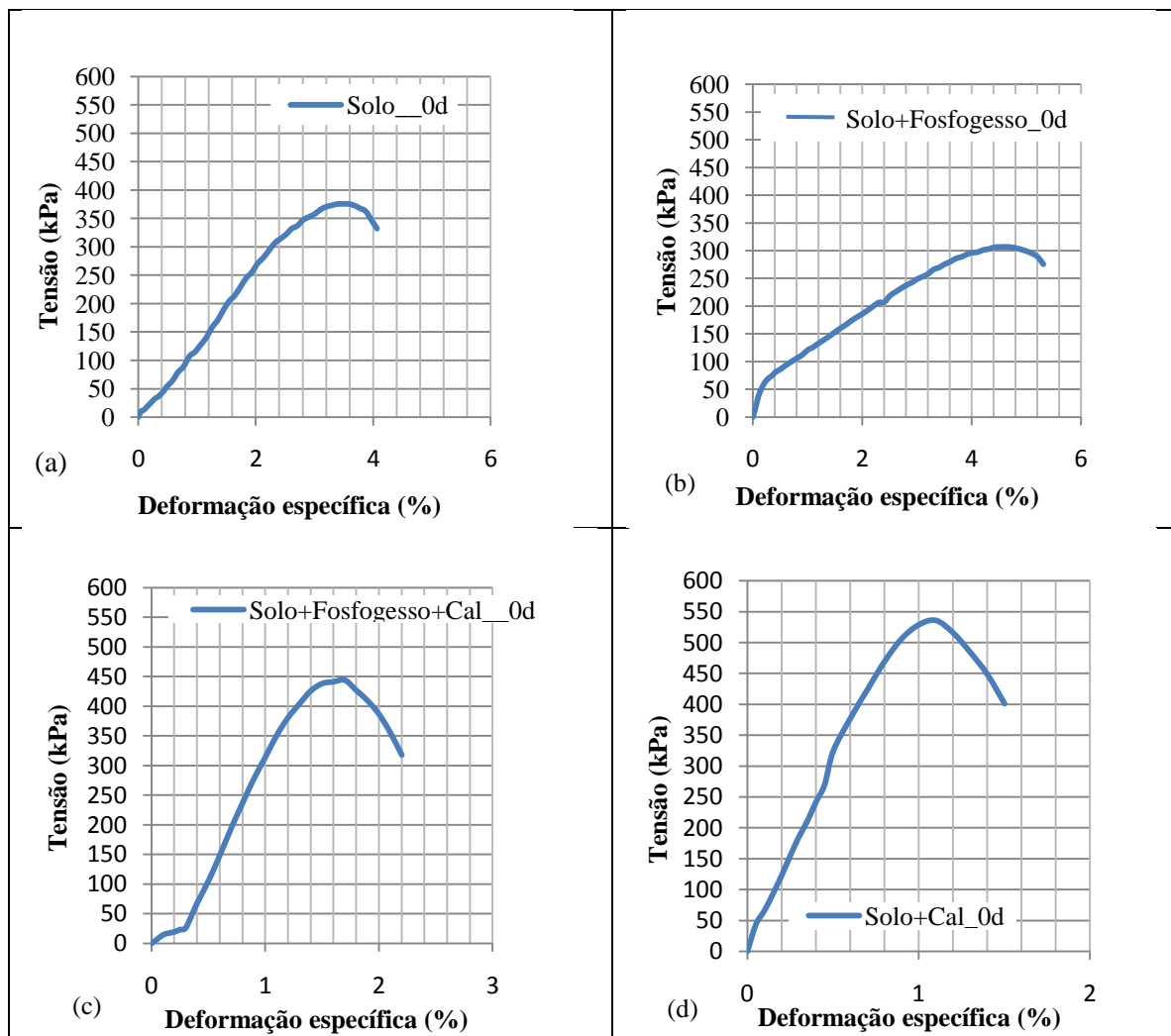


Figura 5.18. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras sem cura (a) Solo; (b) Solo+fosfogesso; (c) Solo+fosfogesso+cal; (d) Solo+cal.

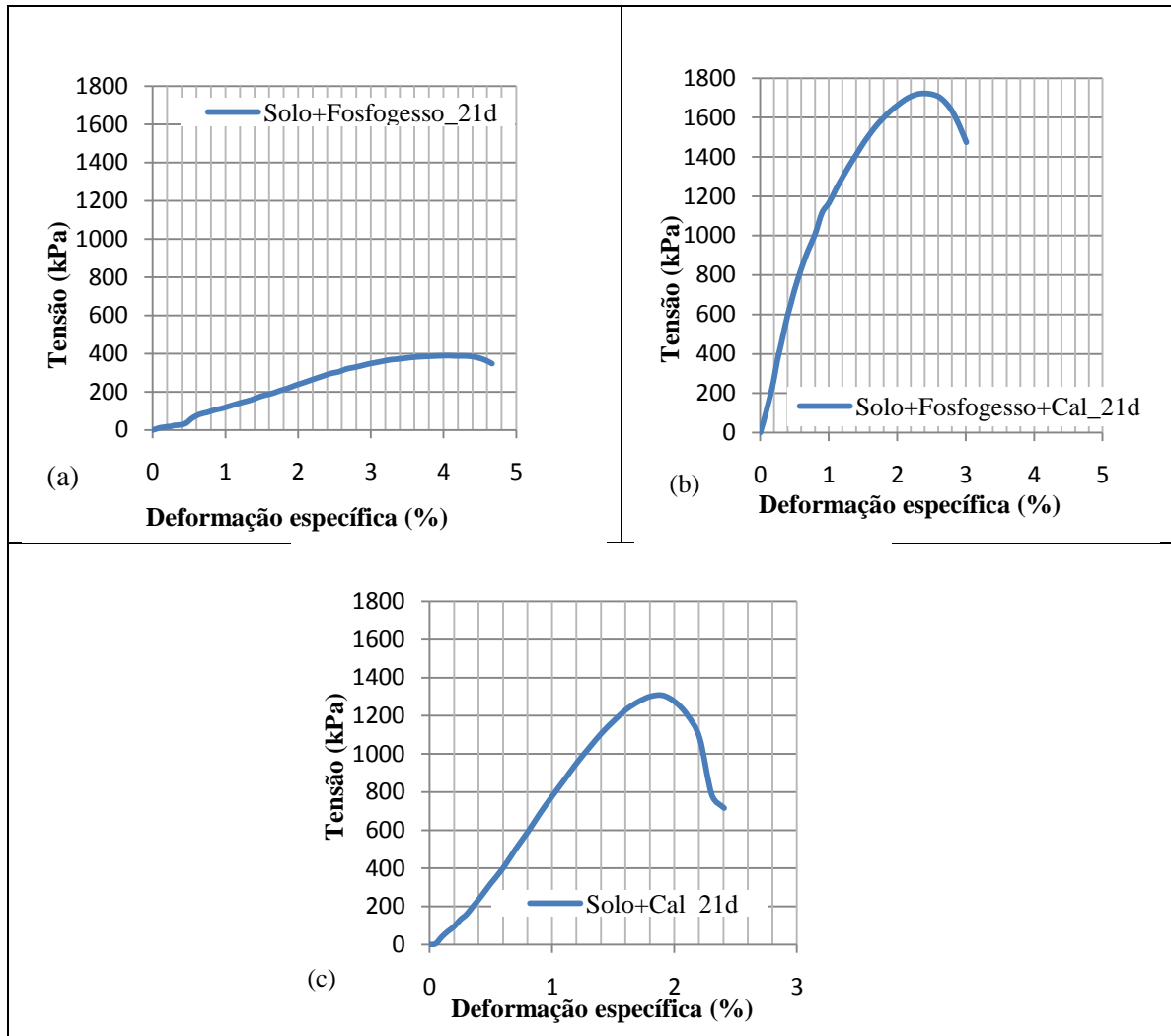


Figura 5.19. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras com 21 dias de cura (a) Solo+fosfogesso; (b) Solo+fosfogesso+cal; (c) Solo+cal.

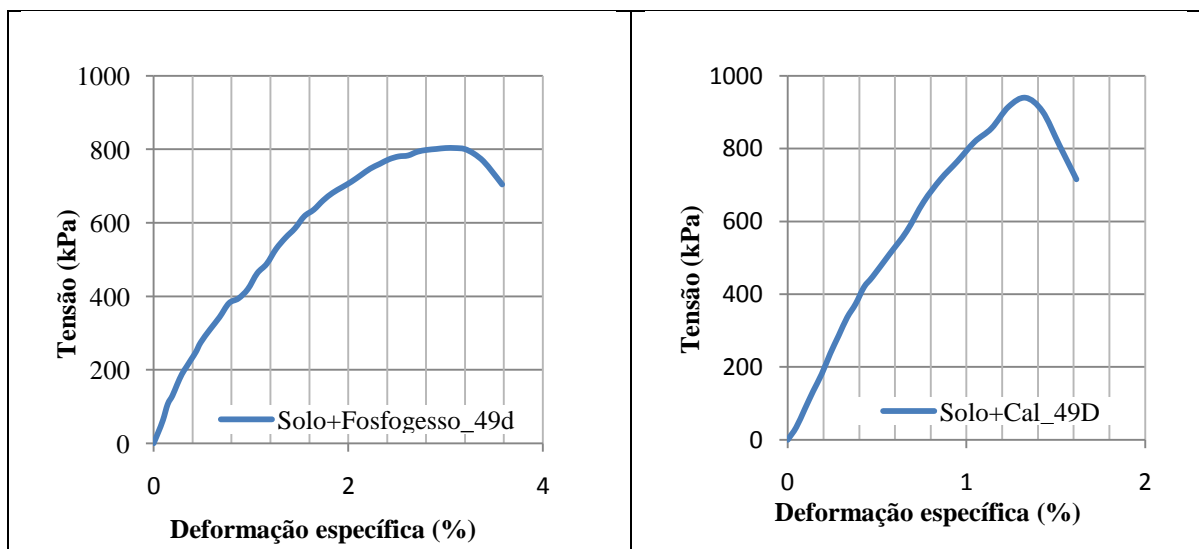


Figura 5.20. Curvas Tensão x Deformação obtidas com o ensaio de compressão simples das amostras com 49 dias de cura (a) Solo+fosfogesso; (b) Solo+cal.

Dentre os materiais analisados, a mistura Solo+Fosfogesso+Cal foi aquela que apresentou a maior resistência à compressão com 21 dias de cura. Por outro lado, nota-se que foi ela que apresentou maior variação de resistência entre os períodos analisados. Isso mostra que as reações pozolânicas entre os materiais utilizados nessa misturas, além de serem as mais rápidas, geram ligações mais fortes entre partículas. Foi desconsiderado o resultado obtido com essa mistura com 49 dias de cura, pois o corpo de prova apresentou umidade muito baixa antes da execução do ensaio e não houve tempo hábil para realizar a repetição.

5.2.5 Módulo resiliente

O ensaio de compressão dinâmica foi realizado com os materiais sem cura e com cura de 7, 14 e 21 dias. As amostras foram moldadas de forma a atingir no máximo possível suas condições ótimas de compactação. Na Tabela 5.8 estão apresentados os resultados obtidos da fase de preparação dos corpos de provas ensaiados.

Tabela 5.8 Parâmetros obtidos na preparação dos corpos de prova para ensaios de compressão dinâmica.

Cura	Amostra	w _{ot} (%)	w(%)	Δw (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	GC (%)
0 dia	Solo	21,0	21,9	0,9	16,00	16,34	102
	Solo+FG	25,3	24,3	-1,0	14,90	15,02	101
	Solo+FG+Cal	24,3	24,1	-0,2	14,80	15,49	105
	Solo+Cal	25,8	25,1	-0,7	14,30	13,90	97
7 dias	Solo+FG	25,3	24,3	-1,0	14,90	13,76	95
	Solo+FG+Cal	24,3	25,3	1,0	14,80	12,77	86
	Solo+Cal	25,8	25,1	-0,7	14,30	14,72	103
14 dias	Solo+FG	25,3	24,8	-0,5	14,90	14,99	98
	Solo+FG+Cal	24,3	25,0	0,7	14,80	12,27	84
	Solo+Cal	25,8	25,3	-0,5	14,30	14,88	101
21 dias	Solo+FG	25,3	24,1	-1,2	14,90	15,52	104
	Solo+FG+Cal	24,3	24,6	0,3	14,80	12,21	83
	Solo+Cal	25,8	24,8	-1,0	14,30	14,80	102

Observa-se que para todas as amostras, as umidades de moldagem encontraram-se nas faixas admissíveis ($\pm 2\%$ da umidade ótima), atingindo diferença máxima de 1,2% para a amostra de solo + fosfogesso com 21 dias de cura.

Quanto aos graus de compactação, foram encontrados valores acima de 95% para todas as amostras, exceto para as de Solo+Fosfogesso+Cal com tempo de cura. Isto ocorreu devido à

variação volumétrica avaliada em torno de 23% dessas misturas, causada pelo seu caráter expansivo quando deixadas em cura. A Figura 5.21 ilustra a variação diametral de um corpo de prova de solo+fosfogesso+cal depois da cura.



Figura 5.21. Variação volumétrica de um corpo de prova de solo+fosfogesso+cal por expansão.

Os resultados obtidos durante os ensaios triaxiais dinâmicos para cada amostra e com os tempos de curas correspondentes estão apresentados nas Tabelas 5.9 a 5.12. Nessas tabelas, além dos valores dos módulos resilientes MR, das tensões confinante σ_3 e desvio σ_d obtidas durante os ensaios, foram incluídos valores dos somatórios das tensões principais θ ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2 \sigma_3 = \sigma_d + 3 \sigma_3$).

Ressalta-se que por causa de deformações permanentes excessivas, alguns corpos de provas romperam antes do término dos ciclos de carregamento. Isso foi o caso do solo e das misturas solo+fosfogesso com 7 e 21 dias de cura, o que mostra o pior desempenho dessas amostras quando submetidas ao carregamento dinâmico.

Tabela 5.9 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais sem cura.

TENSÕES (MPa)			MR (MPa)			
σ_3	σ_d	$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$	Solo	Solo+FG	Solo+FG+Cal	Solo+Cal
0,021	0,019	0,082	28	57	73	62
0,021	0,037	0,100	26	47	75	63
0,021	0,056	0,119	25	44	77	65
0,035	0,031	0,136	31	67	106	88
0,035	0,062	0,167	30	57	103	87
0,035	0,093	0,198	26	51	98	86
0,069	0,062	0,269	38	104	156	138
0,069	0,124	0,331	33	81	136	128
0,069	0,186	0,393	-	64	110	108
0,103	0,062	0,371	-	138	172	180
0,103	0,093	0,402	-	119	159	166
0,103	0,186	0,495	-	94	138	147
0,138	0,093	0,507	-	161	201	218
0,138	0,124	0,538	-	150	238	208
0,138	0,248	0,662	-	117	198	178

Tabela 5.10 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais com 7 dias de cura.

TENSÕES (MPa)			MR (MPa)		
σ_3	σ_d	$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$	Solo + FG	Solo + FG + Cal	Solo + Cal
0,021	0,019	0,082	36	62	48
0,021	0,037	0,100	27	72	55
0,021	0,056	0,119	24	82	64
0,035	0,031	0,136	29	70	54
0,035	0,062	0,167	25	86	68
0,035	0,093	0,198	26	100	79
0,069	0,062	0,269	24	83	66
0,069	0,124	0,331	23	102	88
0,069	0,186	0,393	-	96	111
0,103	0,062	0,371	-	64	69
0,103	0,093	0,402	-	74	81
0,103	0,186	0,495	-	92	112
0,138	0,093	0,507	-	67	79
0,138	0,124	0,538	-	76	93
0,138	0,248	0,662	-	89	126

Tabela 5.11 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes obtidos para os materiais com 14 dias de cura.

TENSÕES (MPa)			MR (MPa)		
σ_3	σ_d	$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$	Solo+FG	Solo+FG+Cal	Solo+Cal
0,021	0,019	0,082	55	50	76
0,021	0,037	0,100	51	58	84
0,021	0,056	0,119	47	68	101
0,035	0,031	0,136	71	54	119
0,035	0,062	0,167	65	70	157
0,035	0,093	0,198	58	86	193
0,069	0,062	0,269	107	67	382
0,069	0,124	0,331	93	91	418
0,069	0,186	0,393	76	109	462
0,103	0,062	0,371	143	58	614
0,103	0,093	0,402	127	72	584
0,103	0,186	0,495	107	108	617
0,138	0,093	0,507	172	70	734
0,138	0,124	0,538	160	83	726
0,138	0,248	0,662	130	123	725

Tabela 5.12 Tensões confinante σ_3 , desvio σ_d aplicadas, somatório das tensões principais θ e valores de módulos resilientes MR obtidos para os materiais com 21 dias de cura.

TENSÕES (MPa)			MR (MPa)		
σ_3	σ_d	$\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$	Solo+FG	Solo+FG+Cal	Solo+Cal
0,021	0,019	0,082	43	54	78
0,021	0,037	0,100	41	61	86
0,021	0,056	0,119	43	71	96
0,035	0,031	0,136	46	58	82
0,035	0,062	0,167	47	74	100
0,035	0,093	0,198	47	91	118
0,069	0,062	0,269	49	71	95
0,069	0,124	0,331	48	100	126
0,069	0,186	0,393	41	124	152
0,103	0,062	0,371	42	65	86
0,103	0,093	0,402	39	81	104
0,103	0,186	0,495	41	123	145
0,138	0,093	0,507	37	78	97
0,138	0,124	0,538	37	94	117
0,138	0,248	0,662	-	148	165

A partir dos resultados obtidos nesses ensaios, procurou-se avaliar o comportamento dos módulos de resiliência com os estados de tensões atuando nos materiais. Para tanto, foram utilizados os quatro modelos matemáticos a seguir:

- $MR=k_1 \sigma_3^{k_2}$, geralmente utilizado para solos arenosos sem coesão e que relaciona o módulo resiliente apenas com a tensão confinante σ_3 ;
- $MR=k_1 \sigma_d^{k_2}$, relacionando o módulo resiliente apenas com a tensão desvio σ_d ;
- $MR=k_1 \theta^{k_2}$, relacionando o módulo resiliente com o somatório das tensões principais θ ;
- $MR=k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$, conhecido como Modelo Composto.

Cabe ressaltar que, embora alguns trabalhos tenham orientados escolhas dos modelos em função do tipo de materiais, nada impede que, para fins comparativos, todos esses modelos sejam aplicados a um mesmo material.

Para a determinação dos parâmetros k_i ($i=1,2,3$) dos modelos, as equações destes foram primeiramente linearizadas utilizando o logaritmo neperiano como mostrado a seguir para o modelo composto (Equações 5.1 e 5.2):

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (5.1)$$

$$\therefore \ln MR = \ln k_1 + k_2 \ln \sigma_3 + k_3 \ln \sigma_d \quad (5.2)$$

Onde:

MR = Módulo de resiliência,

σ_3 = Tensão confinante,

σ_d = Tensão desvio,

k_1, k_2, k_3 = parâmetros do modelo.

Em seguida, foi feita uma regressão multilinear com o programa Excel 2007. Para determinar o parâmetro k_1 , foi aplicada a função exponencial neperiano ao $\ln k_1$. Desta regressão multilinear, foi obtido o coeficiente R^2 . Além disso, calculou-se as médias das porcentagens de erros gerados por cada modelo. Nas Tabelas 5.13 a 5.16 estão apresentados os parâmetros k_i obtidos assim como os valores dos R^2 e das médias das porcentagens associados a cada modelo e tempo de cura. Na mesma seqüência, as Figuras 5.22 a 5.34 ilustram os gráficos obtidos com cada modelo para as amostras e tempos de cura estudados.

Tabela 5. 13 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras sem cura.

Modelos	Materiais	Parâmetros dos modelos				
		k_1	k_2	k_3	R^2	Erro Médio (%)
Modelo σ_3	Solo	67,09	0,25	-	0,75	5,7
	Solo+FG	412,17	0,57	-	0,86	14,2
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2}$	Solo+FG+Cal	533,68	0,51	-	0,92	7,3
	Solo+Cal	647,34	0,6	-	0,97	5,5
Modelo σ_d	Solo	33,64	0,05	-	0,04	10,4
	Solo+FG	164,49	0,27	-	0,19	33,0
$MR=k_1 \sigma_d^{k_2}$	Solo+FG+Cal	292,55	0,33	-	0,38	25,7
	Solo+Cal	321,95	0,40	-	0,41	27,0
Modelo θ	Solo	42,01	0,20	-	0,44	8,3
	Solo+FG	168,78	0,54	-	0,68	22,2
$MR=k_1 \theta^{k_2}$	Solo+FG+Cal	250,62	0,51	-	0,82	12,5
	Solo+Cal	264,77	0,61	-	0,87	13,3
Modelo composto	Solo	64,25	0,36	-0,15	0,97	2,1
	Solo+FG	352,62	0,81	-0,33	0,98	4,0
	Solo+FG+Cal	507,45	0,58	-0,11	0,94	7,6
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Solo+Cal	613,80	0,68	-0,11	0,98	4,5

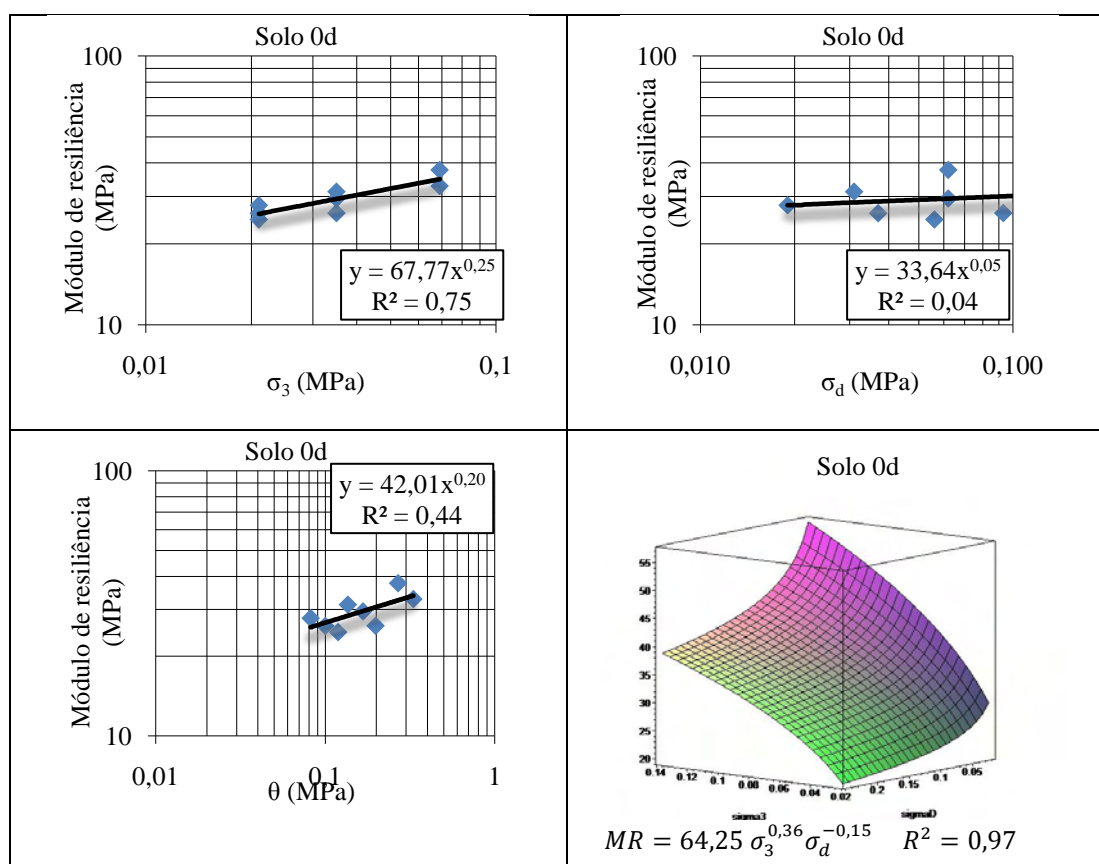


Figura 5.22. Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

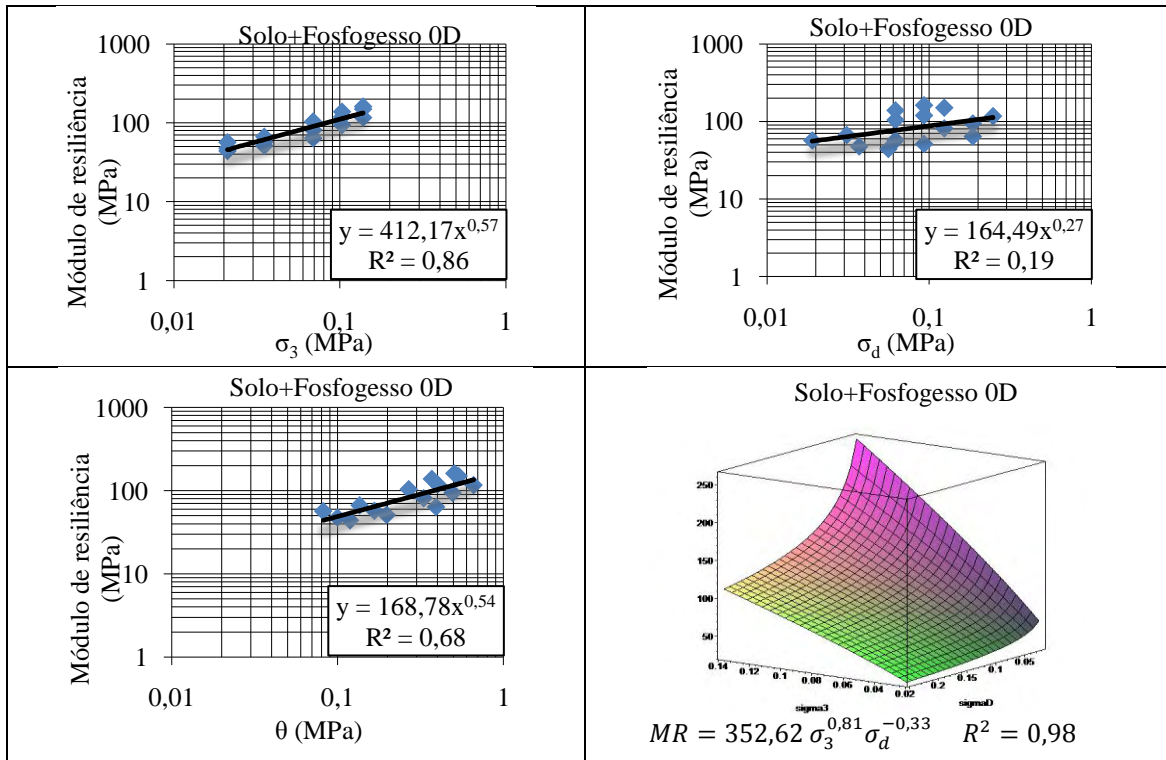


Figura 5.23. Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

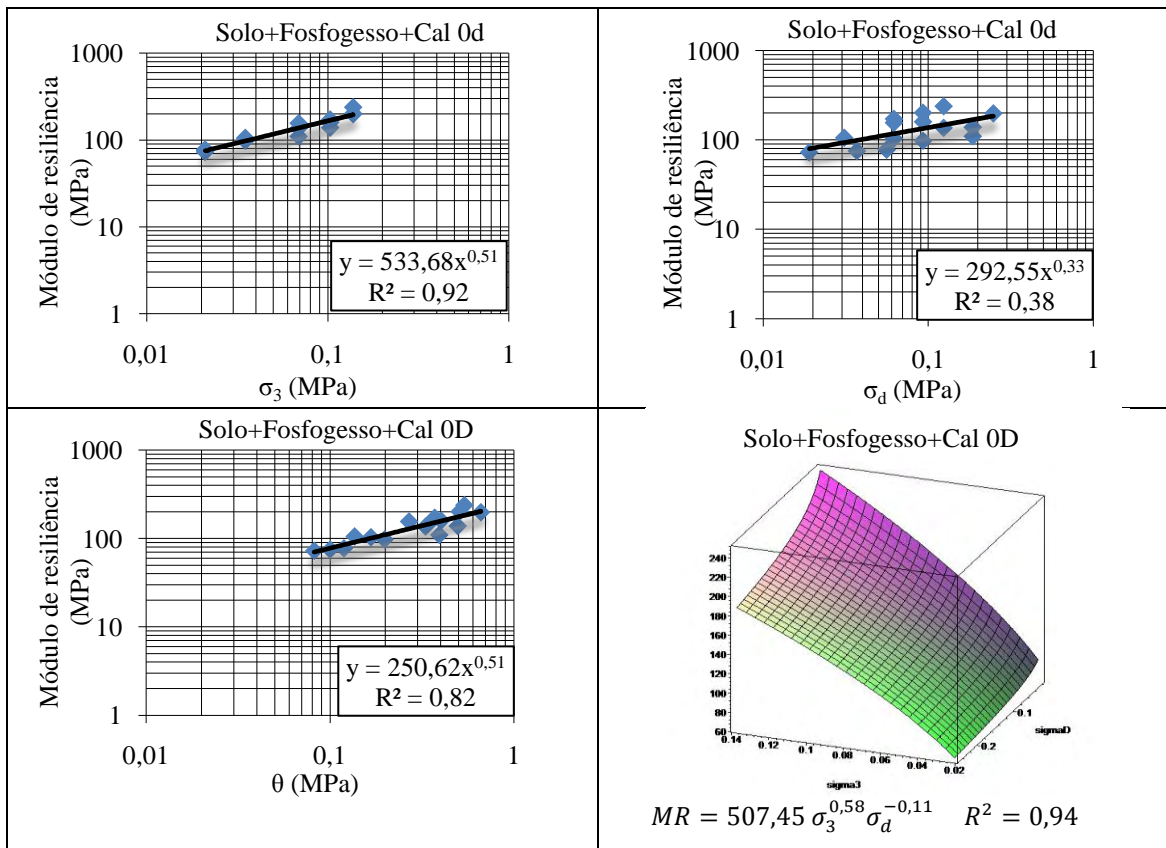


Figura 5.24 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

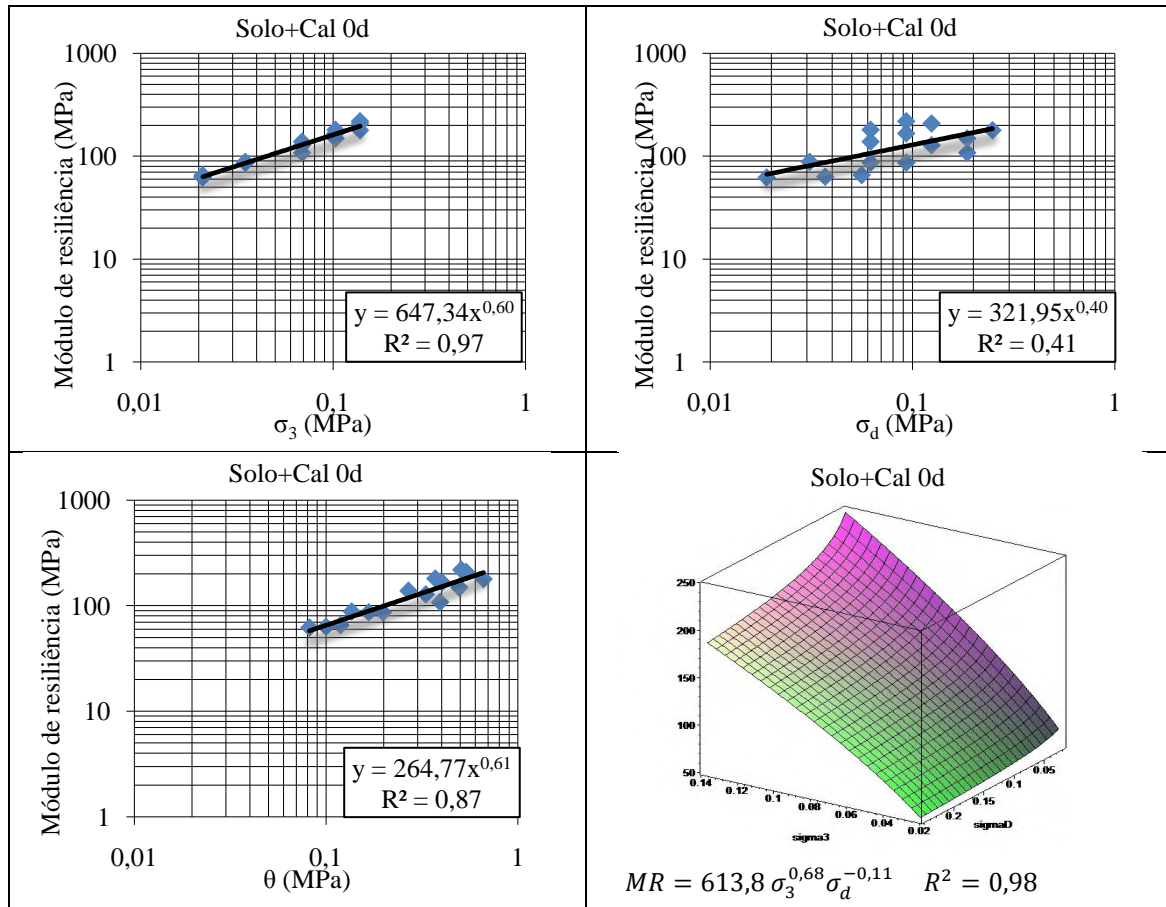


Figura 5.25 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal sem cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

Tabela 5.14 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 7 dias de cura.

Modelos	Materiais	Parâmetros dos modelos				
		k_1	k_2	k_3	R^2	Erro Médio (%)
Modelo σ_3	Solo+FG	15,68	-0,16	-	0,32	8,1
	Solo+FG+Cal	85,14	0,02	-	0,01	13,7
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2}$	Solo+Cal	172,89	0,29	-	0,54	16,3
Modelo σ_d	Solo+FG	14,70	-0,20	-	0,78	5,4
	Solo+FG+Cal	117,73	0,15	-	0,45	9,5
$MR=k_1 \sigma_d^{k_2}$	Solo+Cal	206,78	0,39	-	0,98	3,5
Modelo θ	Solo+FG	17,98	-0,21	-	0,56	6,7
	Solo+FG+Cal	87,75	0,07	-	0,08	13,1
$MR=k_1 \theta^{k_2}$	Solo+Cal	123,75	0,36	-	0,74	12,1
Modelo composto	Solo+FG	14,87	0,007	-0,21	0,78	5,4
	Solo+FG+Cal	98,01	-0,19	0,30	0,80	5,7
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Solo+Cal	207,87	0,006	0,39	0,98	3,5

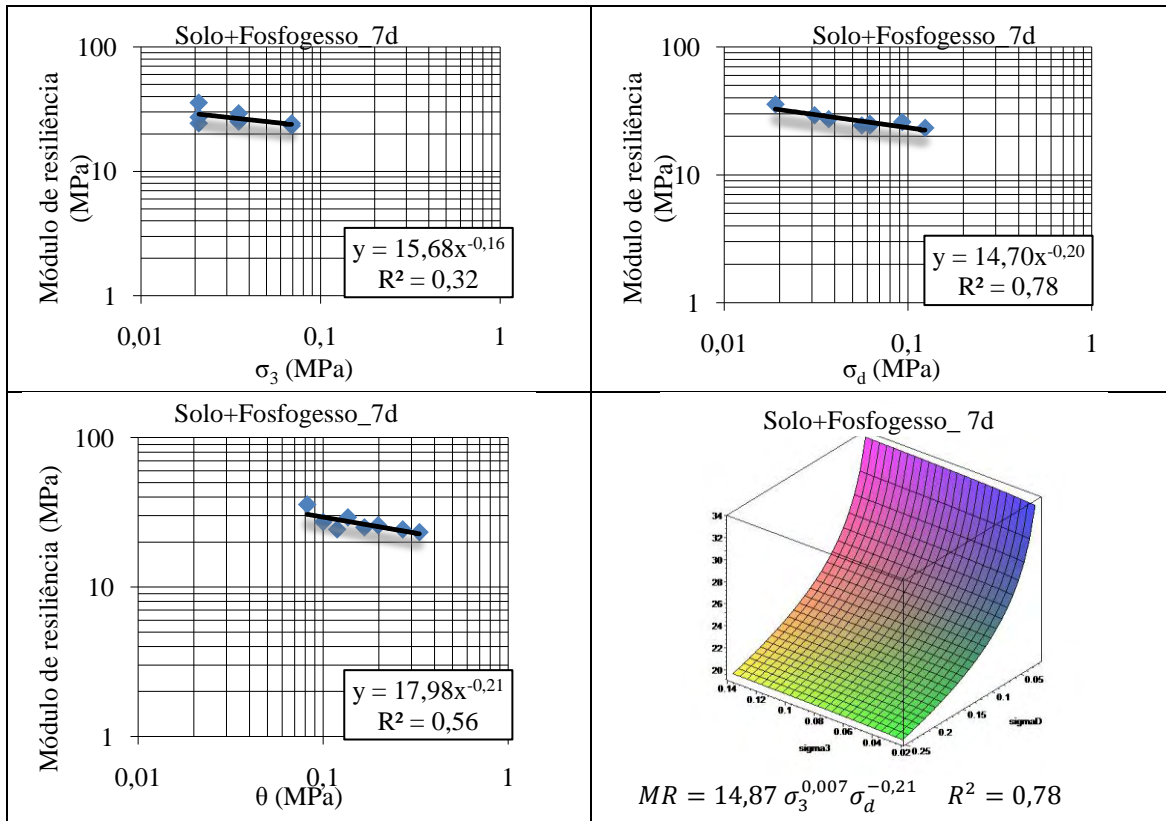


Figura 5.26 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

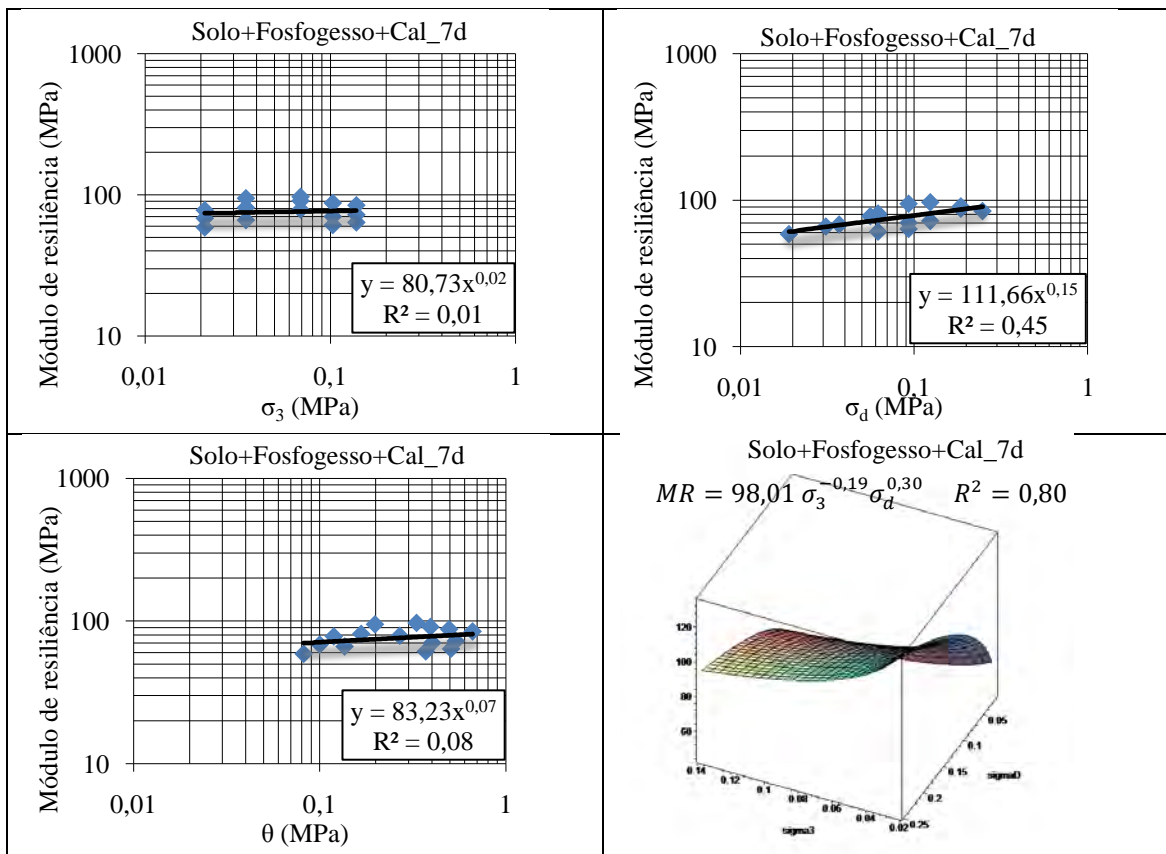


Figura 5.27 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

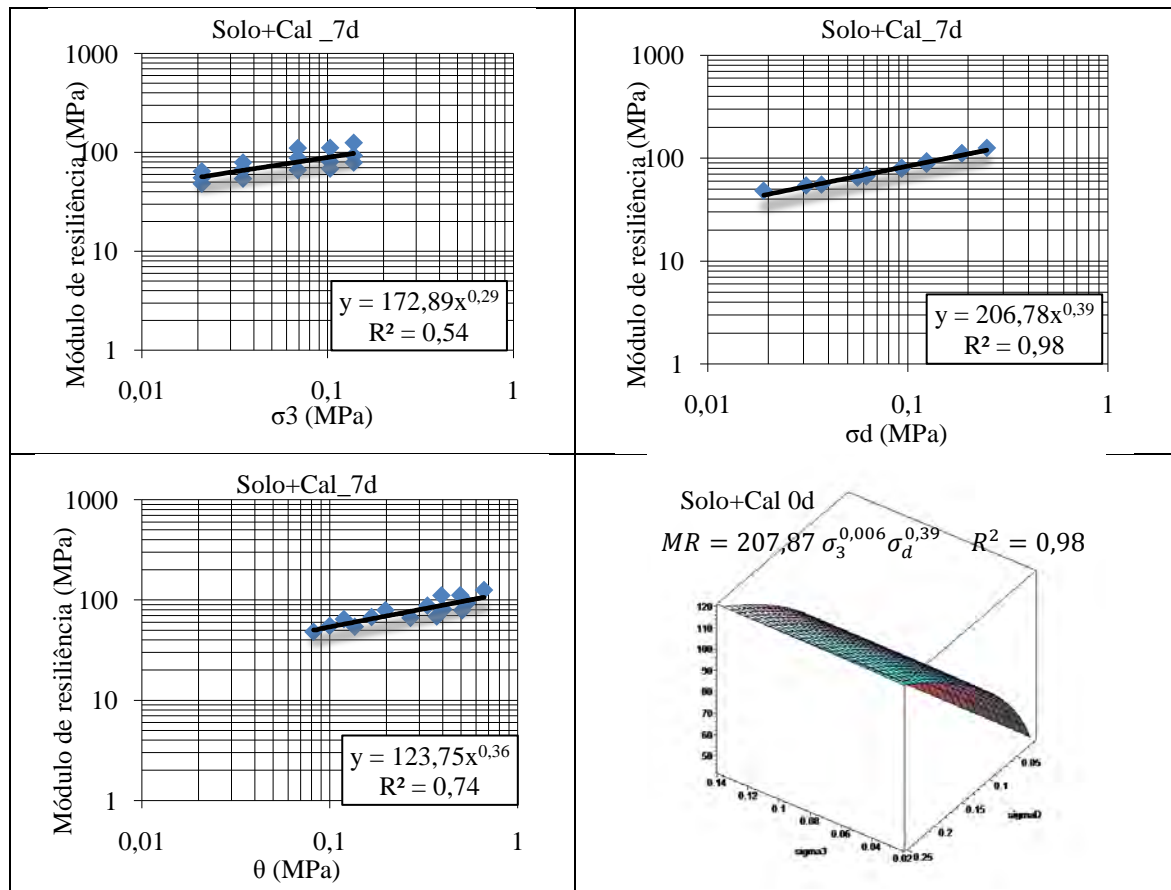


Figura 5.28 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal com 7 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

Tabela 5. 15 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 14 dias de cura.

Modelos	Materiais	Parâmetros dos modelos				
		k_1	k_2	k_3	R^2	Erro Médio (%)
Modelo σ_3	Solo+FG	462,73	0,58	-	0,92	10,3
	Solo+FG+Cal	134,63	0,21	-	0,30	19,6
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2}$	Solo+Cal	8548,39	1,18	-	0,97	12,1
Modelo σ_d	Solo+FG	202,80	0,32	-	0,28	30,3
	Solo+FG+Cal	189,12	0,36	-	0,91	6,7
$MR=k_1 \sigma_d^{k_2}$	Solo+Cal	3510,63	0,97	-	0,64	42,8
Modelo θ	Solo+FG	189,87	0,56	-	0,77	18,3
	Solo+FG+Cal	110,00	0,29	-	0,50	16,6
$MR=k_1 \theta^{k_2}$	Solo+Cal	1614,46	1,26	-	0,97	11,1
Modelo	Solo+FG	413,24	0,75	-0,24	0,99	3,4
composto	Solo+FG+Cal	167,50	-0,13	0,46	0,96	3,9
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Solo+Cal	9380,30	1,04	0,20	0,98	9,3

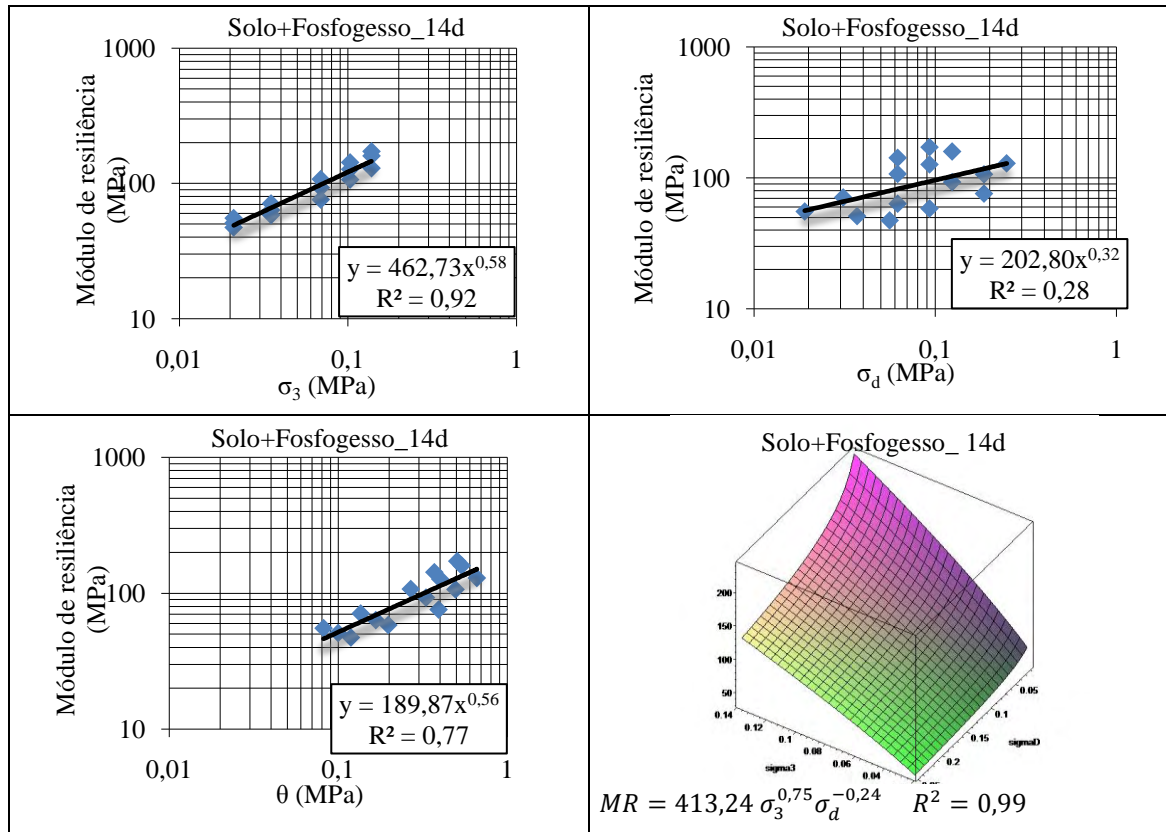


Figura 5.29 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

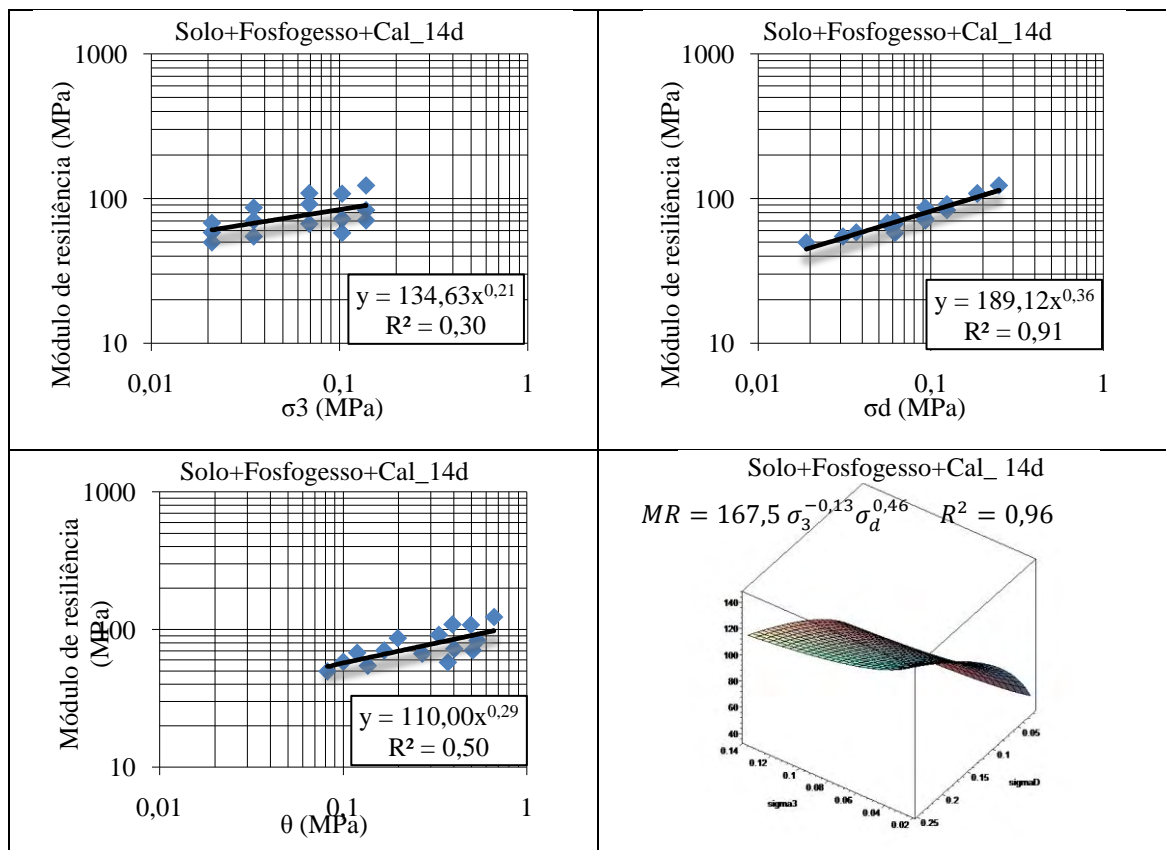


Figura 5.30 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

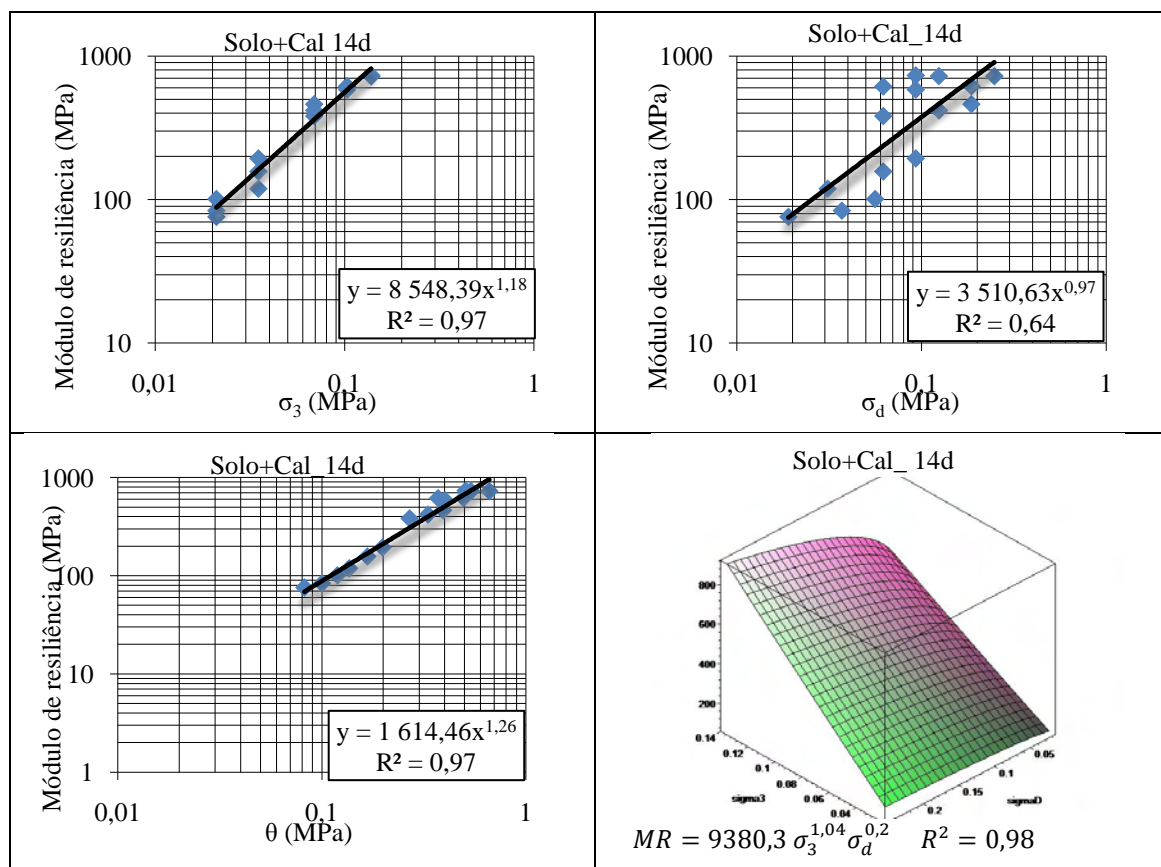


Figura 5.31 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+cal com 14 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

Tabela 5.16 Resultados obtidos a partir de quatro modelos de módulos de resiliência para as amostras com 21 dias de cura.

Modelos	Materiais	Parâmetros dos modelos				Erro Médio (%)
		k_1	k_2	k_3	R^2	
Modelo σ_3	Solo+FG	35,46	-0,07	-	0,24	6,8
	Solo+FG+Cal	168,10	0,25	-	0,37	20,2
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2}$	Solo+Cal	175,11	0,17	-	0,28	16,7
Modelo σ_d	Solo+FG	38,67	-0,04	-	0,07	7,3
	Solo+FG+Cal	230,28	0,41	-	0,93	6,2
$MR=k_1 \sigma_d^{k_2}$	Solo+Cal	234,81	0,31	-	0,88	6,3
Modelo θ	Solo+FG	39,01	-0,07	-	0,21	6,7
	Solo+FG+Cal	128,90	0,34	-	0,57	16,6
$MR=k_1 \theta^{k_2}$	Solo+Cal	147,82	0,24	-	0,48	14,1
Modelo composto	Solo+FG	36,00	-0,08	0,02	0,24	6,9
	Solo+FG+Cal	210,73	-0,09	0,48	0,95	5,0
$MR=k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Solo+Cal	211,13	-0,11	0,40	0,94	4,6

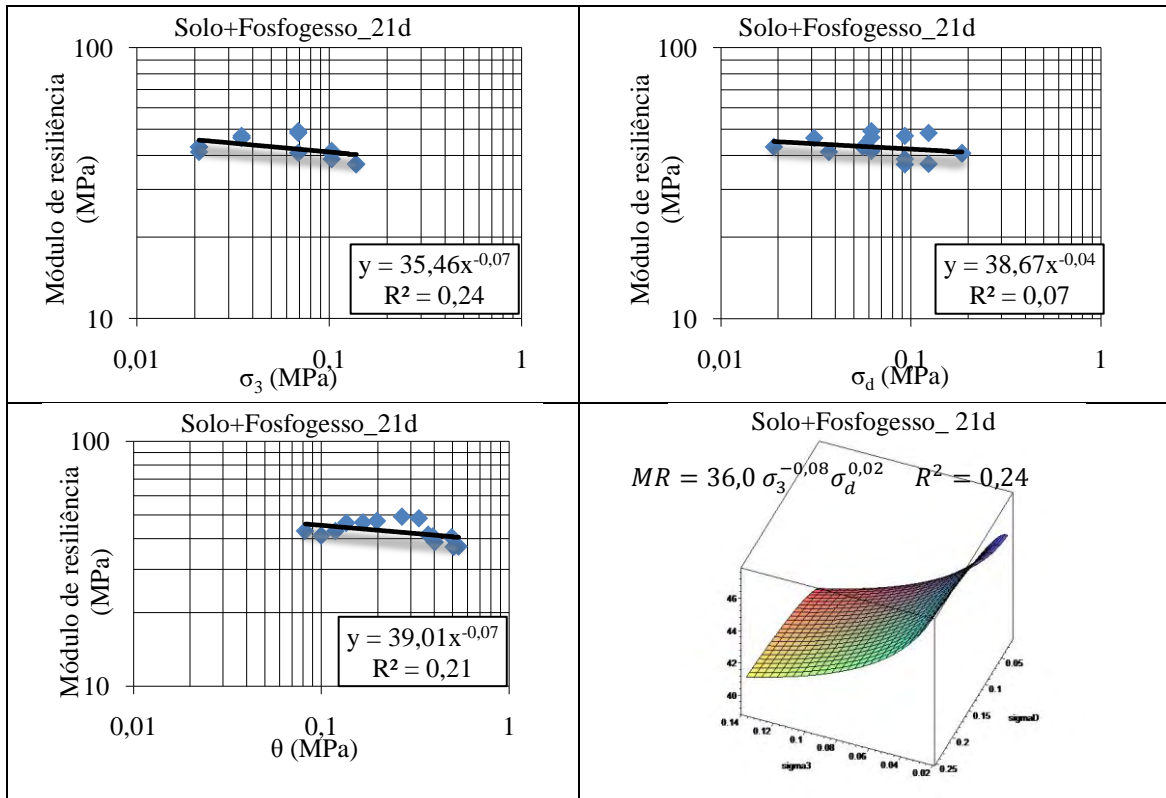


Figura 5.32 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

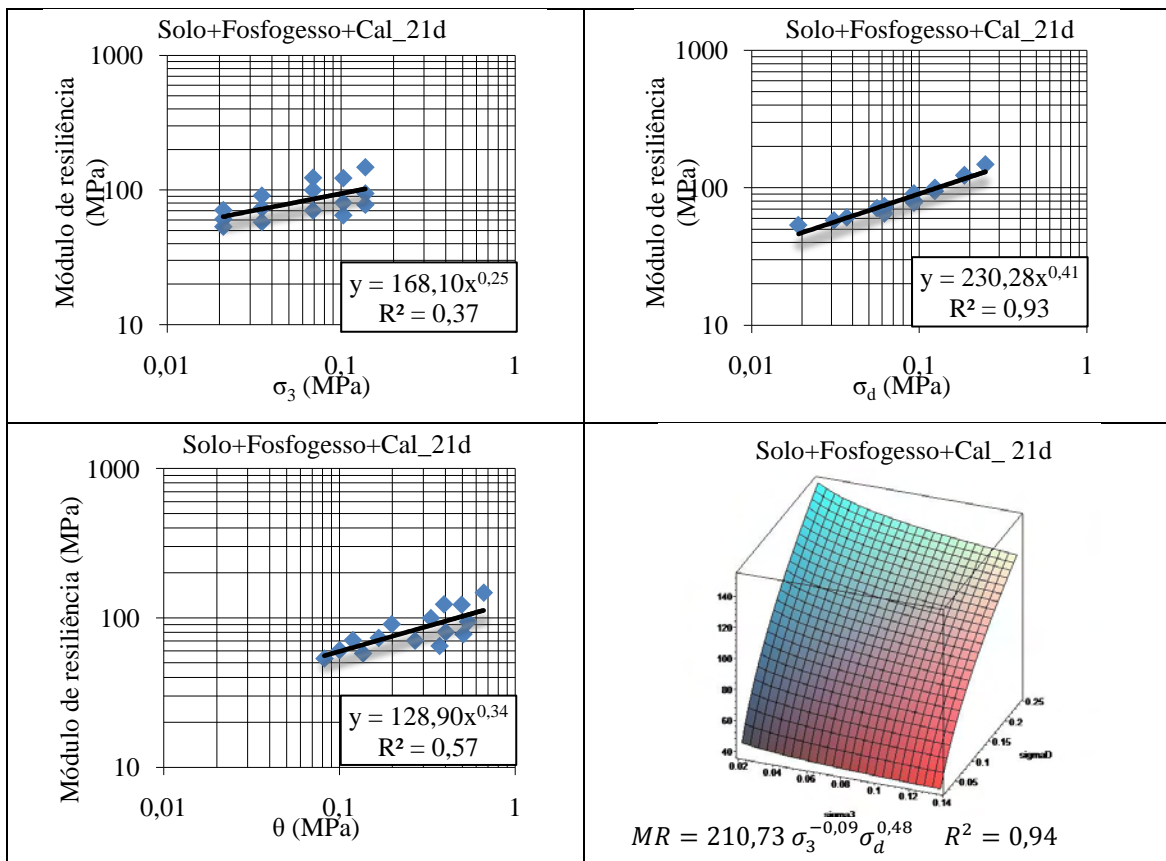


Figura 5.33 - Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fosfogesso+cal com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

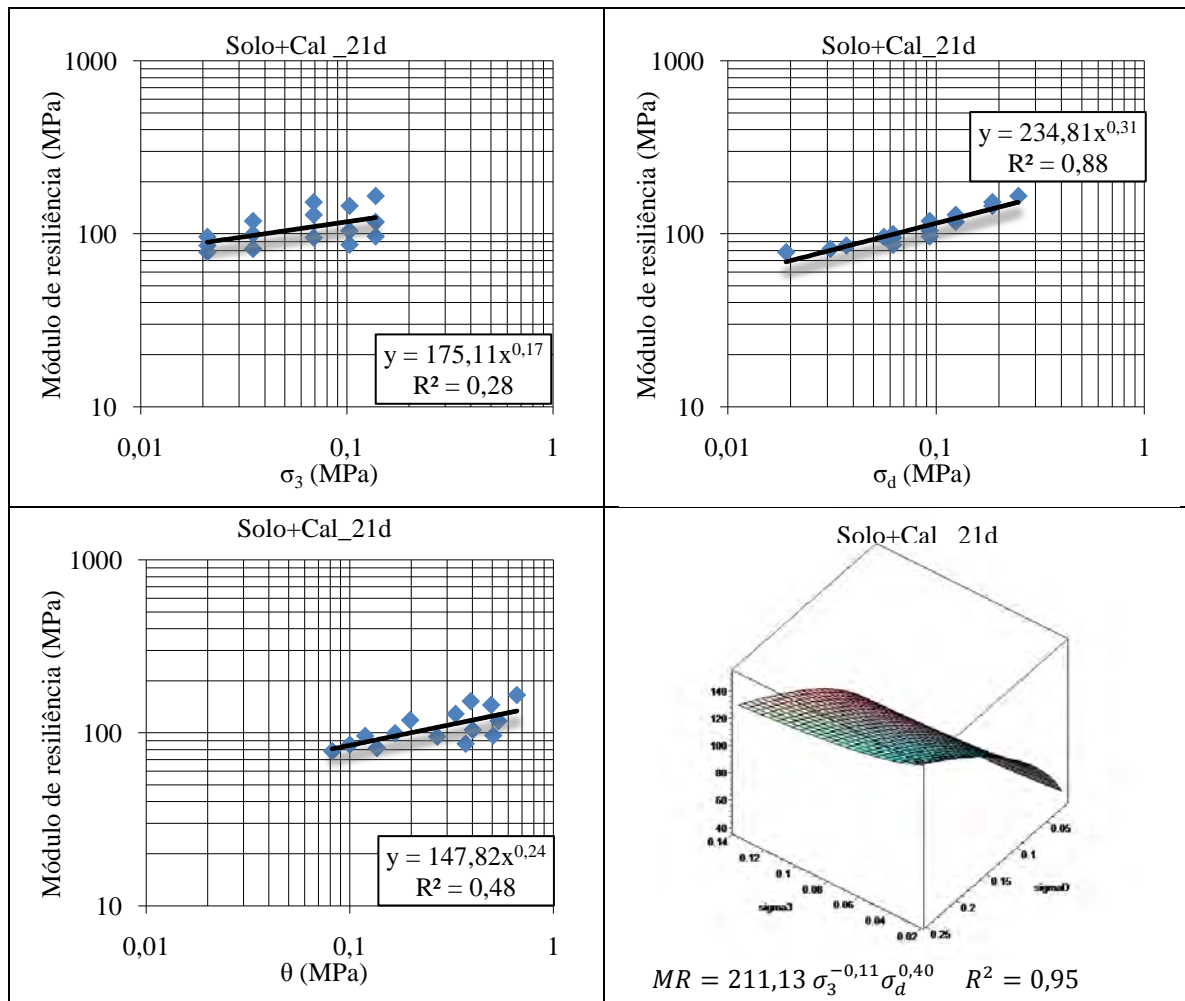


Figura 5.34 Gráficos obtidos a partir dos modelos para o solo+fossogesso+cal com 21 dias de cura (a) Modelo σ_3 (b) Modelo σ_d (c) Modelo θ (d) Modelo Composto.

Dessa análise, observou-se que o modelo composto foi aquele que melhor representou o comportamento resiliente dos materiais, independentemente dos tempos de cura. Por este motivo, esse modelo será utilizado nas próximas discussões. A Tabela 5.17 mostra as equações obtidas por esse modelo para as diferentes misturas e tempos de cura.

Tabela 5.17 – Modelos compostos das misturas estudadas em função dos tempos de cura.

Tempos de cura	Materiais		
	Solo + FG	Solo + FG+ Cal	Solo+Cal
0dia	$MR=352,62 \sigma_3^{0,81} \sigma_d^{-0,33}$	$MR=507,45 \sigma_3^{0,58} \sigma_d^{-0,11}$	$MR=613,8 \sigma_3^{0,68} \sigma_d^{-0,11}$
7dias	$MR=14,87 \sigma_3^{0,007} \sigma_d^{-0,21}$	$MR=98,01 \sigma_3^{-0,19} \sigma_d^{0,30}$	$MR=207,87 \sigma_3^{0,006} \sigma_d^{0,39}$
14dias	$MR=413,24 \sigma_3^{0,75} \sigma_d^{-0,24}$	$MR=167,5 \sigma_3^{-0,13} \sigma_d^{0,46}$	$MR=9380,3 \sigma_3^{1,04} \sigma_d^{0,20}$
21dias	$MR=36,0 \sigma_3^{-0,08} \sigma_d^{0,02}$	$MR=210,73 \sigma_3^{-0,09} \sigma_d^{0,48}$	$MR=211,13 \sigma_3^{-0,11} \sigma_d^{0,40}$

Por outro lado, observou-se grande diferença entre os parâmetros obtidos pelos vários modelos em função do tempo de cura. Isso pode ter ocorrido devido a problemas de homogeneização observados durante a mistura dos materiais. Como pode ser verificado na Figura 4.11 (b), são facilmente visualizados pontos com maior concentração de cal. Sendo assim, não houve possibilidade de avaliar a evolução dos módulos de resiliência com os tempos de cura. Esse resultado indica que ao trabalhar com essas misturas em campo, é preciso tentar utilizar usinas de misturas de solos para evitar que esse tipo de problema aconteça.

Para ter uma idéia dos valores de módulos de resiliente das camadas de base da pista experimental, foram estimadas as tensões confinante e desvio atuante no topo dessa camada e abaixo de um pneu de 10,8cm de diâmetro aplicando ao pavimento uma pressão de contato de 0,55 MPa, conforme recomendado por Medina (1997). Sabe-se que para melhor avaliar essas tensões, deve-se recorrer a programas computacionais apropriados, tais como ELSYM5, KENLAYER, EVERSTRESS ou então, utilizar métodos de elementos finitos, considerando o comportamento não linear dos materiais empregados. Porém, por medidas simplificadoras, neste trabalho foram utilizados métodos analíticos da teoria da elasticidade apresentadas por Poulos e Davis (1974) para a determinação das referidas tensões. Para tanto, as dimensões das camadas do pavimento foram adotadas igual à da pista experimental e essa estrutura foi considerada como um sistema de três camadas homogêneas, isotrópicas e elásticas com as seguintes características:

- revestimento asfáltico de 3 cm de espessura, com coeficiente de Poisson de 0,5 e módulo de resiliência de 2.000 MPa;
- camadas de base 15 cm de espessura, com coeficiente de Poisson de 0,5 e módulos de resiliência de 300 MPa;
- subleito com coeficiente de Poisson de 0,5 e módulo de resiliência de 50 MPa.

Sabe-se também que o coeficiente de Poisson irá variar em função do material utilizado na camada. No entanto, pelo fato das soluções analíticas só apresentarem resultados para coeficientes iguais a 0,5, os valores reais não foram considerados. Essa simplificação não prejudica a análise apresentada, pois a alteração dos valores nesse coeficiente não irá afetar significativamente os resultados obtidos.

A partir dessa análise, obteve-se que a tensão confinante atuando no topo da camada de base é igual a 0,371 MPa e a tensão desvio igual a 0,126 MPa. Com esse par de tensões, foi possível estimar os módulos resilientes dos materiais empregados na base sem tempo de cura utilizando o modelo composto. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.18. Dessa tabela, observa-se que a mistura solo+cal foi aquela que apresentou o maior módulo resiliente logo após a aplicação dos materiais em campo. O menor valor foi obtido pela mistura solo+fosfogesso.

Tabela 5.18 - Valores estimados dos módulos de resiliência para os materiais de base com $\sigma_d=0,126$ MPa e $\sigma_3=0,371$ MPa.

Materiais	Solo+Fosfogesso	Solo+Fosfogesso+Cal	Solo+Cal
MR (MPa)	313	359	393

Já na Figura 5.35, fixando o valor de $\sigma_d = 0,126$ MPa e variando σ_3 entre os valores aplicados nos ensaios de laboratório realizados, ao aplicar as equações do modelo, é possível observar as tendências de comportamento de variação de módulos para os diferentes materiais. Verifica-se que as misturas com cal apresentaram os melhores comportamentos.

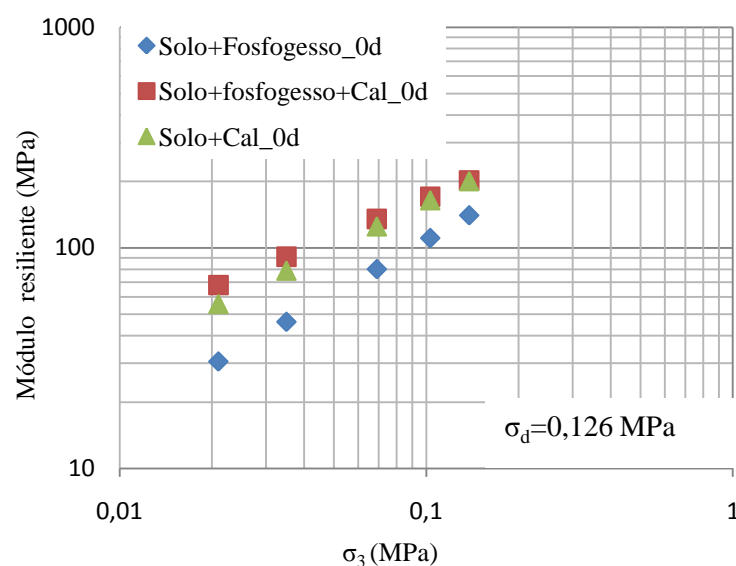


Figura 5.35 – Valores obtidos para os de módulos resilientes para as misturas solo+fosfogesso, solo+fosfogesso+cal e solo+cal com $\sigma_d=0,126$ MPa e σ_3 variando entre os valores do ensaio de laboratório.

Tentou-se realizar as mesmas análises para avaliar o comportamento resiliente de cada material em função do tempo de cura. Infelizmente, foram obtidos valores inconsistentes o que impossibilitou esse tipo de análise. Para tanto, acredita-se que devem ser ensaiados

corpos de prova com tempos de cura maiores e mais espaçados, permitindo melhor avaliação do processo de estabilização.

5.3 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Como explicado no Capítulo 4, conseguiu-se executar a pista experimental somente a durante os últimos meses de 2009, período correspondente à estação chuvosa no município de Aparecida de Goiânia. Quanto à segunda etapa dos ensaios de campo, ela foi realizada durante o mês de maio de 2010. Sendo assim, para analisar melhor os resultados obtidos em campo, são apresentados os dados de precipitação obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 10º Distrito de Meteorologia de Goiânia. Os dados pluviométricos diários obtidos a partir da estação mais próxima da pista experimental (cerca de 8,8 km), localizada na latitude 16°40'00" S longitude 049°15'00" W a 741,48 m de altura, durante a execução do trecho experimental e a realização dos ensaios de campo, são apresentados na Tabela 5.19. Para os demais meses, são apresentados apenas os dados finais mensais (Tabela 5.20).

Tabela 5.19 - Dados pluviométricos diários da região metropolitana de Goiânia para os meses de outubro – dezembro 2009 e maio 2010.

Outubro 2009		Novembro 2009		Dezembro 2009		Maio 2010	
Dia	Valor	Dia	Valor	Dia	Valor	Dia	Valor
1	29,6	1	3,5	1	0,0	1	0,0
2	2,0	2	0,0	2	12,6	2	0,0
3	8,8	3	0,0	3	16,3	3	0,0
4	0,0	4	0,0	4	1,6	4	0,0
5	8,2	5	1,6	5	43,7	5	0,0
6	13,1	6	2,7	6	4,2	6	0,0
7	0,0	7	0,4	7	107,6	7	0,0
8	0,0	8	12,8	8	8,0	8	0,0
9	0,0	9	0,0	9	8,6	9	0,0
10	0,0	10	23,8	10	34,0	10	0,0
11	0,0	11	12,4	11	18,2	11	0,0
12	0,0	12	1,2	12	1,3	12	0,0
13	0,0	13	1,2	13	9,2	13	0,0
14	0,0	14	3,8	14	7,9	14	0,0
15	0,0	15	1,8	15	0,5	15	0,0
16	1,6	16	0,0	16	17,8	16	0,0
17	0,8	17	0,0	17	0,0	17	0,0
18	0,0	18	0,0	18	0,0	18	0,0
19	2,3	19	0,0	19	4,6	19	0,0

Continuação:

20	38,8	20	17,6	20	0,0	20	0,0
21	1,6	21	4,7	21	13,8	21	0,0
22	2,4	22	2,8	22	6,0	22	0,0
23	3,0	23	29,1	23	0,0	23	0,0
24	0,0	24	1,5	24	28,0	24	0,0
25	0,0	25	48,1	25	0,2	25	0,0
26	0,0	26	8,6	26	10,5	26	0,0
27	9,0	27	3,0	27	44,5	27	0,0
28	41,8	28	0,0	28	0,2	28	0,0
29	21,4	29	0,0	29	4,9	29	0,0
30	12,0	30	15,5	30	20,9	30	0,0
31	0,0			31	18,8	31	0,0
Total (mm/m²)	196,4	Total (mm/m²)	196,1	Total (mm/m²)	443,9	Total (mm/m²)	0,0

Tabela. 5.20 - Dados pluviométricos mensais da região metropolitana de Goiânia para os meses de setembro 2009 e janeiro – abril 2010.

setembro 09	janeiro-10	fevereiro-10	março-10	abril-10
71,9 mm/m ²	98,3 mm/m ²	208,0 mm/m ²	190,4 mm/m ²	188,4 mm/m ²

5.4 ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo foram realizados durante a construção da pista experimental para checar as condições de compactação em campo e avaliar o comportamento estrutural inicial da pista. Após 6 meses de abertura ao tráfego, foi realizada uma segunda etapa de ensaios de campo para avaliação estrutural do pavimento. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

5.4.1 Controle de compactação

Esse controle foi realizado tanto no subleito como nas bases. Os teores de umidade, as densidades e os graus de compactação obtidos em campo para o subleito estão apresentados na Tabela 5.21. Observa-se que a umidade de campo do subleito variou abaixo da ótima em até 3,5% a menos, sendo inferior ao limite definido a partir da curva de compactação ($\pm 2\%$ da umidade ótima). Em termos de grau de compactação, todos os valores obtidos foram superiores a 100%. Na Tabela 5.22 estão apresentados os mesmos parâmetros obtidos para os materiais constituintes da camada de base. Nas bases de solo-fosfogesso-cal e solo-cal a variação de umidade foi de até -2,3% em relação à umidade ótima, ficando um pouco abaixo do que seria ideal. Para a mistura solo-fosfogesso, a variação de umidade atingiu o valor -3,2%, não atendendo a faixa de variação permitida. Isso mostra que ao serem realizadas

misturas entre materiais muito finos devem ser adotados maiores cuidados durante o processo de umedecimento e homogeneização. Na base de cascalho, obteve-se teores de umidades próximos da ótima.

Tabela 5.21 Resultados dos ensaios de *Speedy* e frasco de areia realizados no subleito.

Estaca	Posição	w _{ót.} (%)	w (%)	Δw (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	GC (%)
0+10	BE	22,0	20,7	-1,3	14,7	15,7	107
1+10	EIXO	22,0	21,4	-0,6	14,7	16,6	113
2+10	BD	22,0	20,7	-1,3	14,7	16,4	112
3+10	BE	22,0	18,5	-3,5	14,7	14,9	101
4+10	EIXO	22,0	19,3	-2,7	14,7	15,6	106
5+10	BD	22,0	18,5	-3,5	14,7	15,9	108
6+10	BE	22,0	19,3	-2,7	14,7	15,2	104
7+10	EIXO	22,0	19,3	-2,7	14,7	16,8	114
8+10	BD	22,0	22,1	0,1	14,7	15,8	107
15+10	BE	22,0	20,7	-1,3	14,7	16,5	112
16+10	EIXO	22,0	20,0	-2,0	14,7	15,5	106
17+10	BD	22,0	20,0	-2,0	14,7	17,2	117

Obs.: γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo; w_{ót} = umidade ótima; Δw = variação de umidade; GC = grau de compactação; BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito

Tabela 5.22 Resultados dos ensaios de *Speedy* e frasco de areia realizados nas bases.

Material	Estaca	Posição	w _{ót.} (%)	w (%)	Δw (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	GC (%)
	0+10	BE	25,3	22,1	-3,2	14,90	17,4	117
Solo+ FG	1+10	EIXO	25,3	22,1	-3,2	14,90	16,7	112
	2+10	BD	25,3	22,1	-3,2	14,90	16,1	108
	3+10	BE	24,3	22,8	-1,5	14,80	15,3	104
Solo+ FG + Cal	4+10	EIXO	24,3	22,8	-1,5	14,80	14,2	96
	5+10	BD	24,3	22,1	-2,2	14,80	14,6	99
	6+10	BE	25,8	23,5	-2,3	14,30	13,8	97
Solo+ Cal	7+10	EIXO	25,8	23,5	-2,3	14,30	14,5	101
	8+10	BD	25,8	24,2	-1,6	14,30	14,4	100
	15+10	BE	11,1	10,7	-0,4	19,00	19,7	104
Cascalho	16+10	EIXO	11,1	11,4	0,3	19,00	18,4	97
	17+10	BD	11,1	12,1	1,0	19,00	18,7	97

Obs.: γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo; w_{ót} = umidade ótima; GC = grau de compactação; BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito

Com relação ao grau de compactação, todas as bases apresentaram valores satisfatórios, mostrando que a execução do trecho experimental foi realizada conforme especificações de projeto.

5.4.2 Viga Benkelman

Dentre os resultados obtidos com a viga Benkelman, tem-se a deformação real (D_0) do pavimento no ponto de prova, a deformação obtida quando a carga está localizada a 25 cm do ponto de prova (D_{25}) e a bacia de deslocamentos. Além disto, determinou-se o raio de curvatura (R_0), o indicador estrutural $D_0 \times R_0$ assim como o módulo de reação vertical da viga (k_{viga}), sendo este definido como a razão entre a pressão aplicada em qualquer ponto da superfície de contato da carga e o recalque produzido pela aplicação dessa carga naquele ponto. O módulo k_{viga} é definido pela Equação (5.3).

$$k_{viga} = \frac{P}{D_0} \quad (5.3)$$

Onde:

k_{viga} = Módulo de reação,

P = Pressão aplicada (nesse caso P= 560kPa);

D_0 = Deslocamentos

Para os valores de D_0 e D_{25} ainda calculou-se os deslocamentos médios por seção ($D_{médio}$), os desvios padrões (σ) e os limites inferior e superior de aceitação dos deslocamentos (respectivamente D_{mim} e D_{max}), conforme à norma DNER-PRO 11/79 (1979). Os valores negativos de D_{min} foram considerados nulos.

a) Resultados obtidos para o subleito

Nas Tabelas 5.23 e 5.24 e nas Figuras 5.36 e 5.37 estão apresentados os valores obtidos no ensaio de viga Benkelman realizado nos bordos esquerdo e direito do subleito. Na Figura 5.38 estão apresentadas as bacias de deslocamentos médias obtidas nos bordos esquerdo e direito, assim como a bacia de deslocamento média do subleito.

Ressalta-se que foram desconsiderados os dados dos ensaios realizados das estacas 6+00 a 9+00 e 15+00 a 18+00, tanto no bordo esquerdo quanto no bordo direito, devido a problemas de execução do ensaio. Quando esse problema foi detectado, não havia mais como repetir os ensaios. No entanto, observa-se que os dados obtidos mostram que o subleito do trecho experimental é homogêneo, apresentando valores de deflexão máxima média igual a 62×10^{-2} mm, o que reflete um subleito de boa qualidade.

Tabela 5.23- Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do subleito a partir do ensaio de viga Benkelman

SUBLEITO BORDO ESQUERDO						
Estaca	Data	D₀ (x0,01mm)	D₂₅ (x0,01mm)	R₀ (m)	R₀ x D₀ (x0,01mm.m)	k_{viga} (MPa/m)
0+00	20/10/09	<i>0</i>	<i>0</i>	-	-	-
0+10	20/10/09	<i>46</i>	<i>26</i>	156	<i>7 188</i>	1 217
1+00	20/10/09	<i>72</i>	<i>60</i>	260	<i>18 750</i>	778
1+10	20/10/09	<i>38</i>	<i>26</i>	260	<i>9 896</i>	1 474
2+00	20/10/09	<i>44</i>	<i>34</i>	313	<i>13 750</i>	1 273
2+10	20/10/09	<i>46</i>	<i>28</i>	174	<i>7 986</i>	1 217
3+00	20/10/09	<i>76</i>	<i>40</i>	87	<i>6 597</i>	737
3+10	20/10/09	<i>42</i>	<i>34</i>	391	<i>16 406</i>	1 333
4+00	20/10/09	<i>56</i>	<i>52</i>	781	<i>43 750</i>	1 000
4+10	20/10/09	<i>96</i>	<i>84</i>	260	<i>25 000</i>	583
5+00	20/10/09	<i>108</i>	<i>84</i>	130	<i>14 063</i>	519
5+10	20/10/09	<i>96</i>	<i>86</i>	313	<i>30 000</i>	583
<i>D_{médio}</i>		<i>65</i>	<i>63</i>	<i>1 473</i>	<i>96 429</i>	<i>856</i>
<i>σ</i>		<i>24</i>	<i>22</i>	-	-	-
<i>D_{min}</i>		<i>5</i>	<i>8</i>	-	-	-
<i>D_{max}</i>		<i>126</i>	<i>118</i>	-	-	-

Tabela 5.24 - Parâmetros obtidos no bordo direito do subleito a partir do ensaio de viga Benkelman

SUBLEITO BORDO DIREITO						
Estaca	Data	D₀ (x0,01mm)	D₂₅ (x0,01mm)	R₀ (m)	R₀ x D₀ (x0,01mm.m)	k_{viga} (MPa/m)
0+05	14/10/09	<i>88</i>	<i>52</i>	87	<i>7 639</i>	636
0+15	14/10/09	<i>40</i>	<i>32</i>	391	<i>15 625</i>	1 400
1+05	14/10/09	<i>44</i>	<i>26</i>	174	<i>7 639</i>	1 273
1+15	14/10/09	<i>32</i>	<i>22</i>	313	<i>10 000</i>	1 750
2+05	14/10/09	<i>46</i>	<i>28</i>	174	<i>7 986</i>	1 217
2+15	14/10/09	<i>44</i>	<i>32</i>	260	<i>11 458</i>	1 273
3+05	14/10/09	<i>68</i>	<i>44</i>	130	<i>8 854</i>	824
3+15	14/10/09	<i>124</i>	<i>76</i>	65	<i>8 073</i>	452
4+05	14/10/09	<i>78</i>	<i>52</i>	120	<i>9 375</i>	718
4+15	14/10/09	<i>14</i>	<i>8</i>	521	<i>7 292</i>	4 000

Continuação

5+05	14/10/09	62	40	142	8 807	903
5+15	14/10/09	62	38	130	8 073	903
<i>D</i> médio		68	43	125	8 500	824
<i>σ</i>		32	20	-	-	-
<i>D</i> min		0	0	-	-	-
<i>D</i> max		149	93	-	-	-

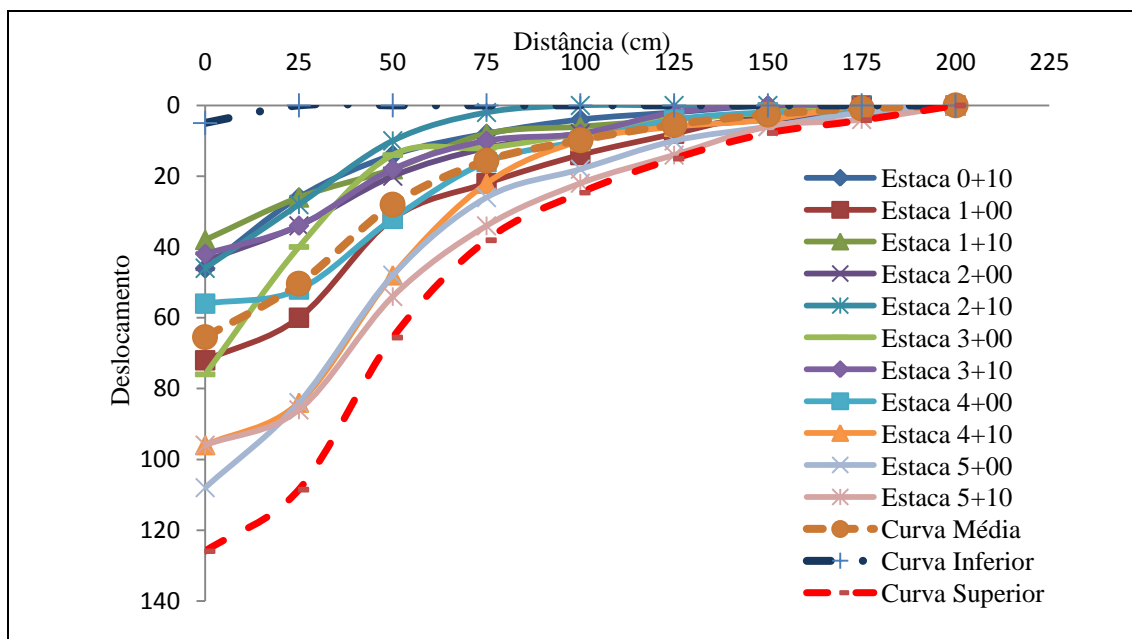


Figura 5.36 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o bordo esquerdo do subleito.

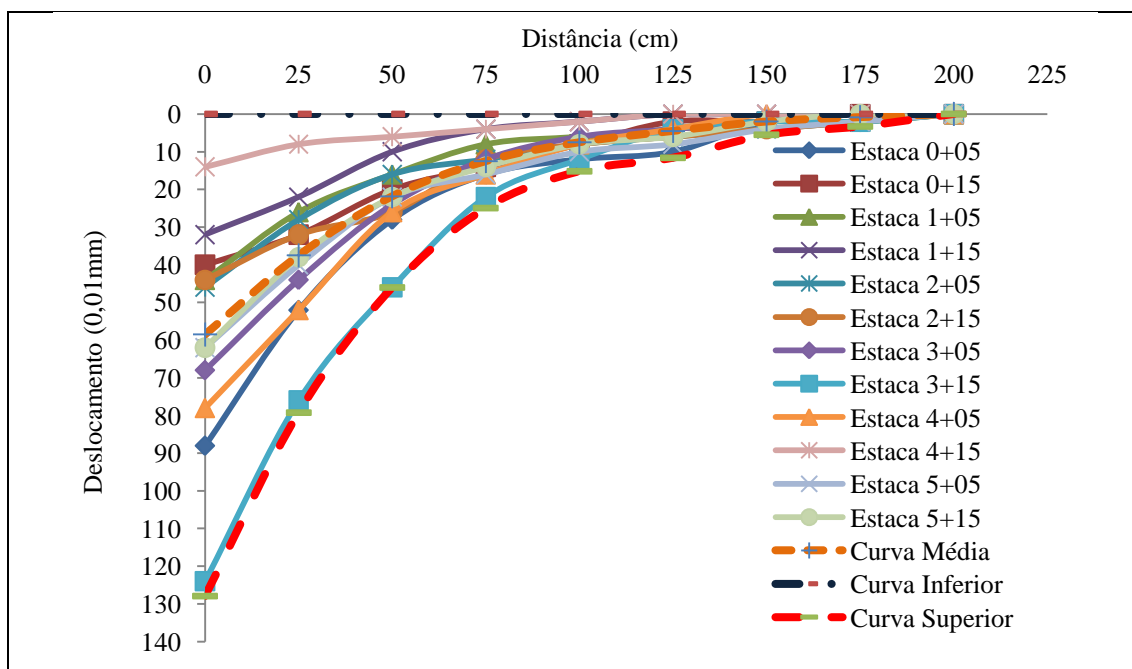


Figura 5.37 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o bordo direito do subleito.

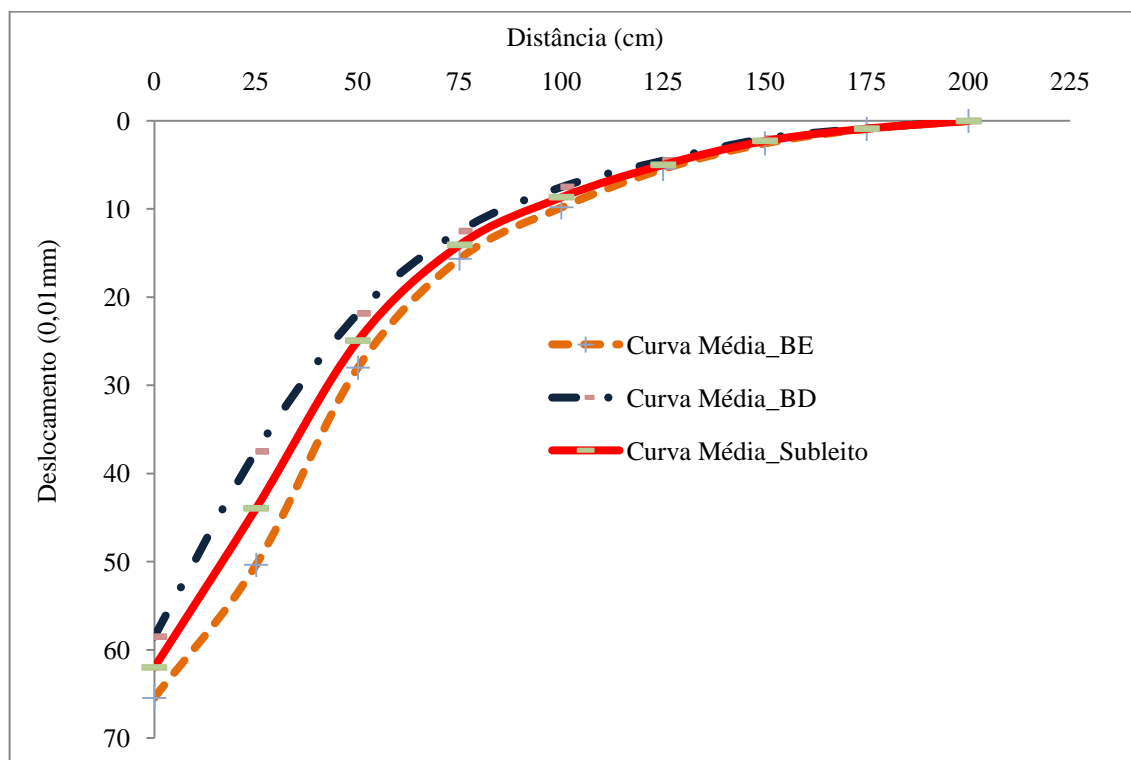


Figura 5.38- Bacias de deslocamentos médias obtidas para os bordos esquerdo e direito e bacia de deslocamento média do subleito.

b) Resultados obtidos para as bases

Os valores obtidos para os parâmetros estudados, tanto no bordo esquerdo como no bordo direito da base, estão apresentados nas Tabelas 5.25 e 5.26.

Para o subtrecho solo+fosfogesso foi obtido um valor de deslocamento médio muito elevado. Esse resultado é devido às fortes chuvas ocorridas antes e no dia da execução dos ensaios, conforme mostrada na Tabela 5.19. Ainda nesse subtrecho, foi observado maior deslocamento no bordo esquerdo. Isto se deve ao fato desse bordo ser o mais exposto às escoamentos superficiais das águas de chuva provenientes das ruas que interceptam a pista experimental. No caso específico da estaca considerada (0+10), esta se localiza no início da pista e recebe diretamente todas as águas provenientes dos trechos anteriores (trecho já existente da Avenida Brasília).

No subtrecho solo+fosfogesso+cal, também foram observados deslocamentos elevados; porém, verifica-se que a cal contribuiu para a homogeneidade dos resultados e reduz o efeito prejudicial da água. Quanto ao trecho solo+cal os deslocamentos obtidos foram acima dos

esperados. Entretanto, observou-se grande diferença entre as medidas realizadas nos bordos direito e esquerdo. Isto é explicado pelo fato que os ensaios nesses bordos foram realizados em dias distintos, sendo que para o bordo esquerdo, as medições foram realizadas depois uma noite de chuva, como confirmado pelos dados pluviométricos da Tabela 5.19, enquanto no bordo direito não teve essa influência climática. Observações semelhantes foram feitas na base com cascalho onde os ensaios no bordo direito foram executados sem chuva prévia (05/11/09), ao contrário dos ensaios no bordo esquerdo (11/11/09).

Os resultados obtidos para cada subtrecho e por estaca estão apresentados nas Figuras 5.39 a 5.42. Nas Figuras 5.43 e 5.44 tem-se as bacias médias obtidas para o bordo esquerdo e o bordo direito de cada subtrecho, assim como as bacias médias correspondentes. Na Figura 5.45 estão comparadas as bacias médias dos diferentes subtrechos.

Tabela 5.25- Parâmetros obtidos no bordo esquerdo da base a partir do ensaio de viga Benkelman

BASE BORDO ESQUERDO							
Estaca	Data	Subtrecho	D ₀ (x0,01mm)	D ₂₅ (x0,01mm)	R ₀ (m)	R ₀ x D ₀ (x0,01mm.m)	k _{viga} (MPa/m)
0+00	11/11/09		-	-	-	-	
0+10	11/11/09	Solo- Fosfogesso	186	138	65	12109	301
1+00	11/11/09		172	150	142	24432	326
1+10	11/11/09		196	76	26	5104	286
2+00	11/11/09		168	72	33	5469	333
2+10	11/11/09		108	48	52	5625	519
	Dmédio		166	97	45	7496	337
	σ	31	40	-	-	-	
	Dmin	89	0	-	-	-	
	Dmax	243	197	-	-	-	
3+00	11/11/09	Solo- Fosfogesso- Cal	82	48	92	7537	683
3+10	11/11/09		78	70	391	30469	718
4+00	11/11/09		130	106	130	16927	431
4+10	11/11/09		148	110	82	12171	378
5+00	11/11/09		172	118	58	9954	326
5+10	11/11/09		90	86	781	70313	622
	Dmédio	117	90	116	13503	480	
	σ	36	25	-	-	-	
	Dmin	28	28	-	-	-	
	Dmax	206	151	-	-	-	
6+00	06/11/09	Solo-Cal	124	116	391	48438	452
6+10	06/11/09		84	58	120	10096	667
7+00	06/11/09		94	62	98	9180	596

Continuação:

7+10	06/11/09		92	78	223	20536	609	
8+00	06/11/09		56	44	260	14583	1000	
8+10	06/11/09		54	48	521	28125	1037	
			Dmédio	84	68	191	16071	667
			σ	24	24	-	-	-
			Dmin	24	7	-	-	-
			Dmax	144	128	-	-	-
15+00	11/11/09		88	46	74	6548	636	
15+10	11/11/09		70	34	87	6076	800	
16+00	11/11/09	Cascalho	120	98	142	17045	467	
16+10	11/11/09		128	62	47	6061	438	
17+00	11/11/09		120	50	45	5357	467	
17+10	11/11/09		140	58	38	5335	400	
			Dmédio	111	58	59	6545	505
			σ	24	20	-	-	-
			Dmin	51	8	-	-	-
			Dmax	171	108	-	-	-

Tabela 5.26 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo da base a partir do ensaio de viga Benkelman

BASE BORDO DIREITO								
Estaca	Data	Subtrecho	D ₀ (x0,01mm)	D ₂₅ (x0,01mm)	R ₀ (m)	R ₀ x D ₀ (x0,01mm.m)	k _{viga} (MPa/m)	
0+05	11/11/09		144	12	24	3409	389	
0+15	11/11/09		98	34	49	4785	571	
1+05	11/11/09	Solo- Fosfogesso	76	16	52	3958	737	
1+15	11/11/09		162	18	22	3516	346	
2+05	11/11/09		148	26	26	3791	378	
2+15	11/11/09		222	36	17	3730	252	
			Dmédio	142	24	26	3752	395
			σ	47	9	-	-	-
			Dmin	25	1	-	-	-
			Dmax	259	46	-	-	-
3+05	11/11/09		74	56	174	12847	757	
3+15	11/11/09		100	80	156	15625	560	
4+05	11/11/09	Solo- Fosfogesso-Cal	152	82	45	6786	368	
4+15	11/11/09		126	86	78	9844	444	
5+05	11/11/09		146	102	71	10369	384	
5+15	11/11/09		96	78	174	16667	583	
			Dmédio	116	81	89	10327	484
			σ	28	14	-	-	-
			Dmin	46	47	-	-	-
			Dmax	186	115	-	-	-
6+05	05/11/09	Solo-Cal	134	102	98	13086	418	

Continuação:

6+15	05/11/09		90	66	130	11719	622
7+05	05/11/09		84	54	104	8750	667
7+15	05/11/09		152	116	87	13194	368
8+05	05/11/09		92	74	174	15972	609
8+15	05/11/09		104	76	112	11607	538
Dmédio			109	81	112	12202	512
σ			25	21	-	-	-
Dmin			47	28	-	-	-
Dmax			172	134	-	-	-
15+05	05/11/09		94	74	156	14688	596
15+15	05/11/09		88	68	156	13750	636
16+05	05/11/09	Cascalho	96	80	195	18750	583
16+15	05/11/09		88	72	195	17188	636
17+05	05/11/09		66	42	130	8594	848
17+15	05/11/09		106	68	82	8717	528
18+05	05/11/09		82	58	130	10677	683
Dmédio			89	66	138	12263	632
σ			12	12	-	-	-
Dmin			60	37	-	-	-
Dmax			118	95	-	-	-

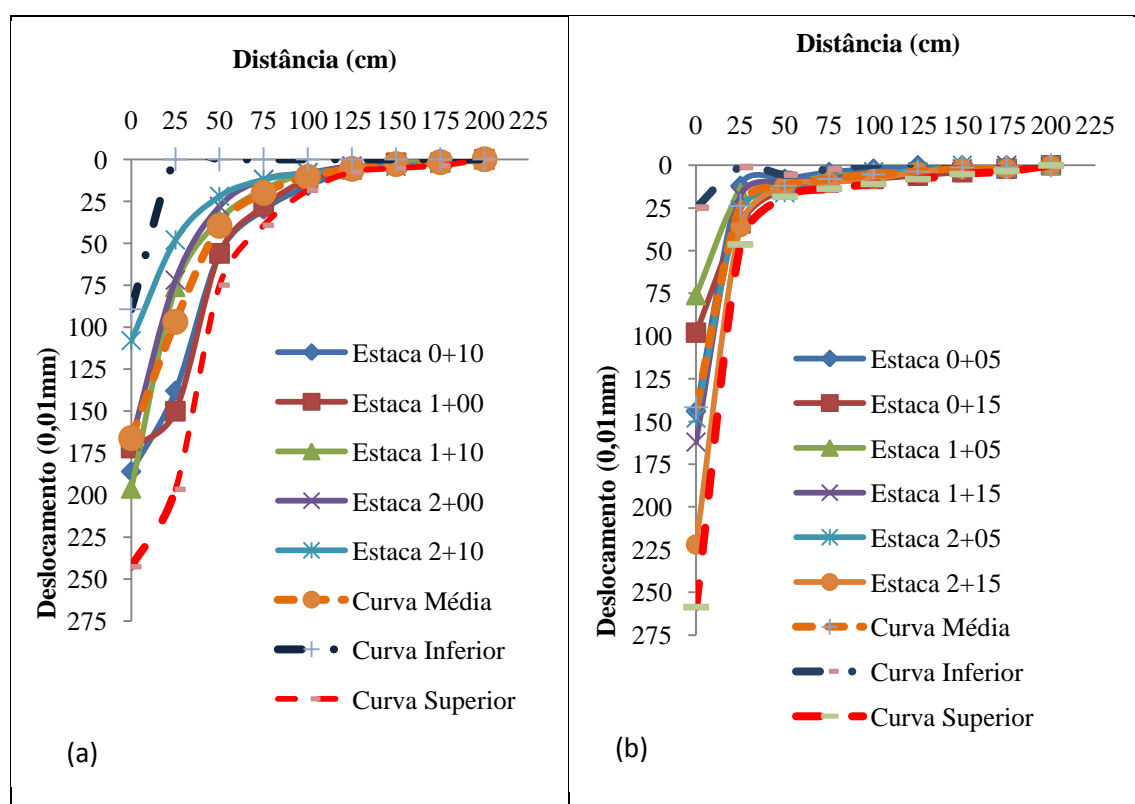


Figura 5.39 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + fosfogesso: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

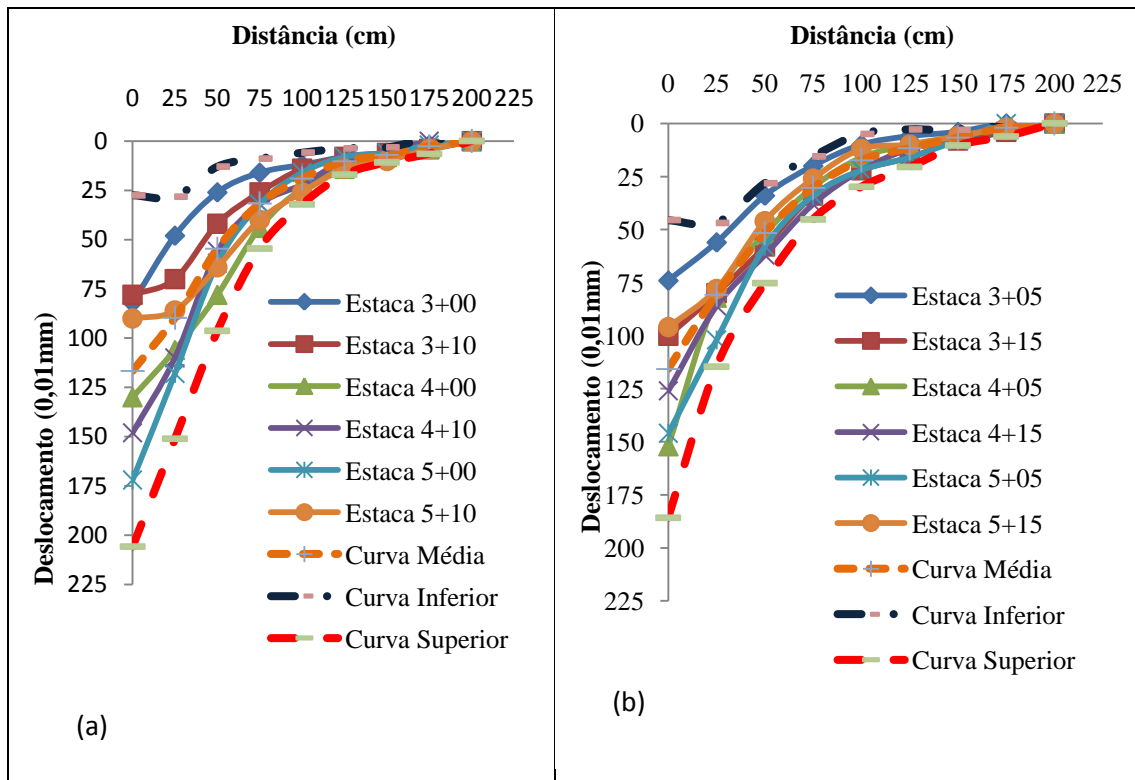


Figura 5.40– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + fosfogesso + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

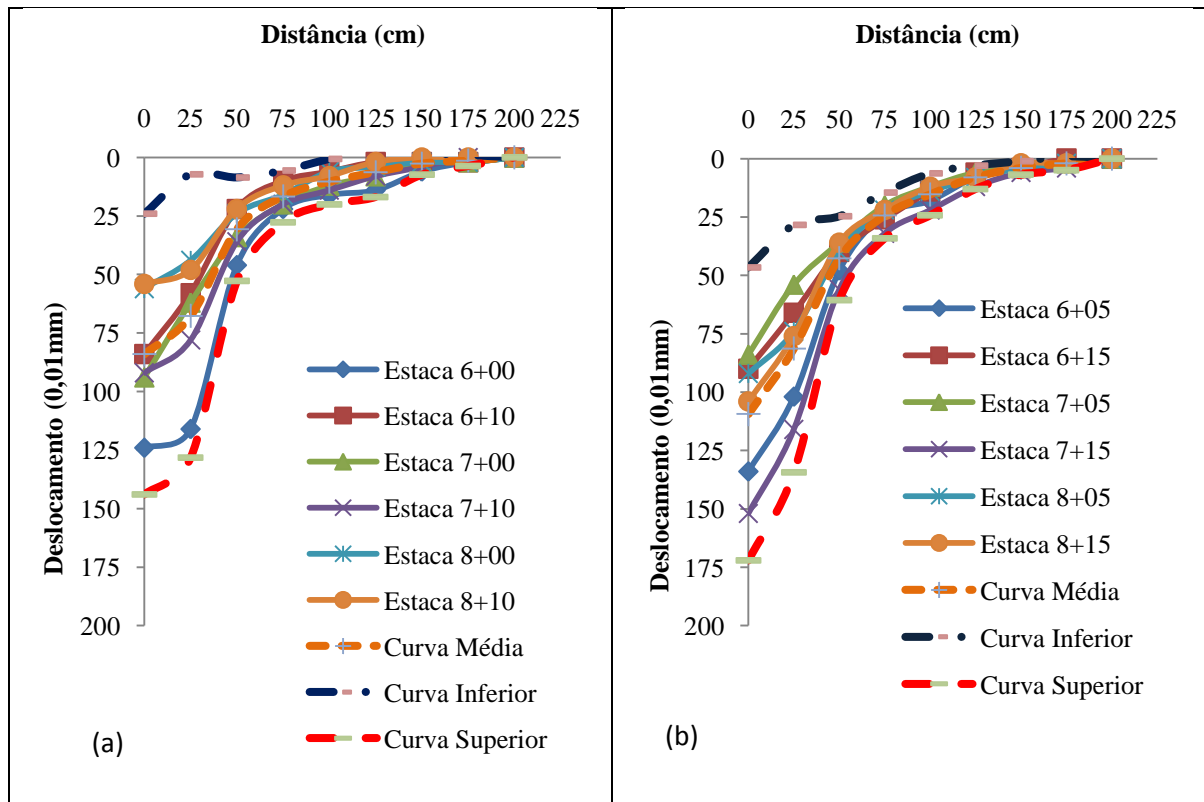


Figura 5.41 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de solo + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

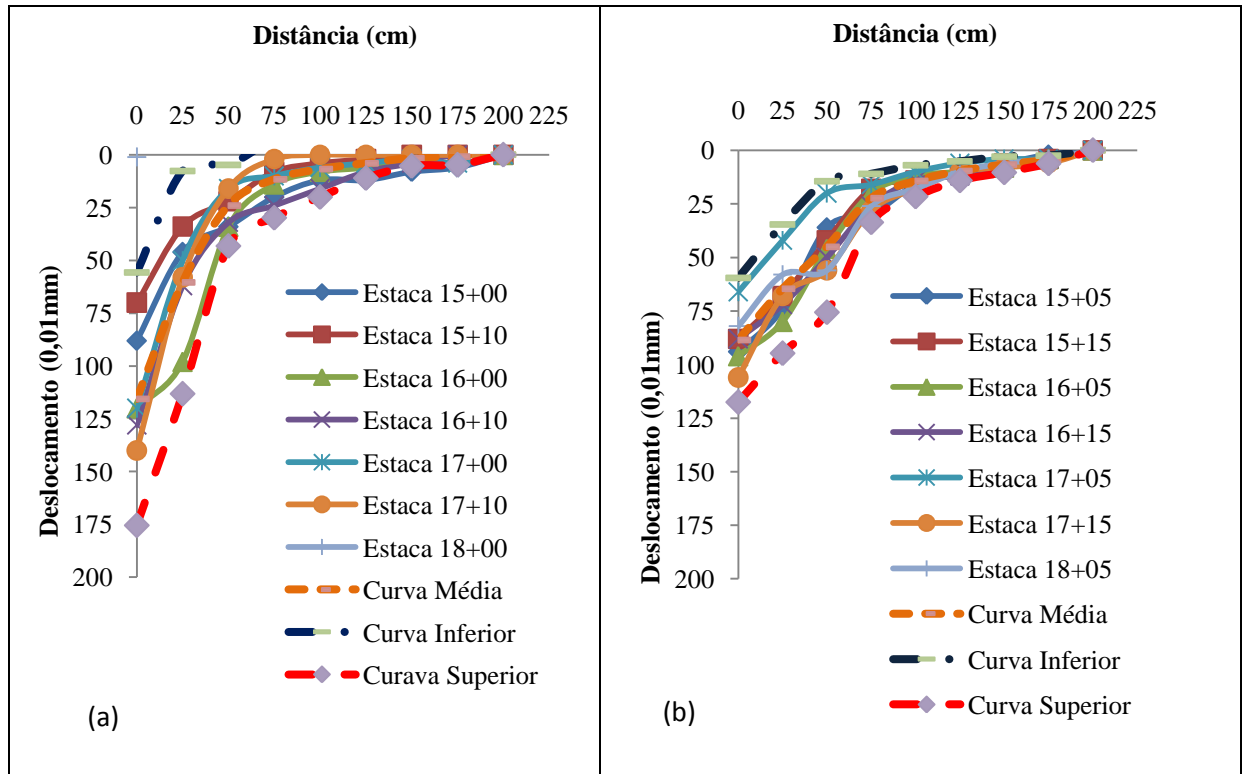


Figura 5.42– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre a base no subtrecho de cascalho: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

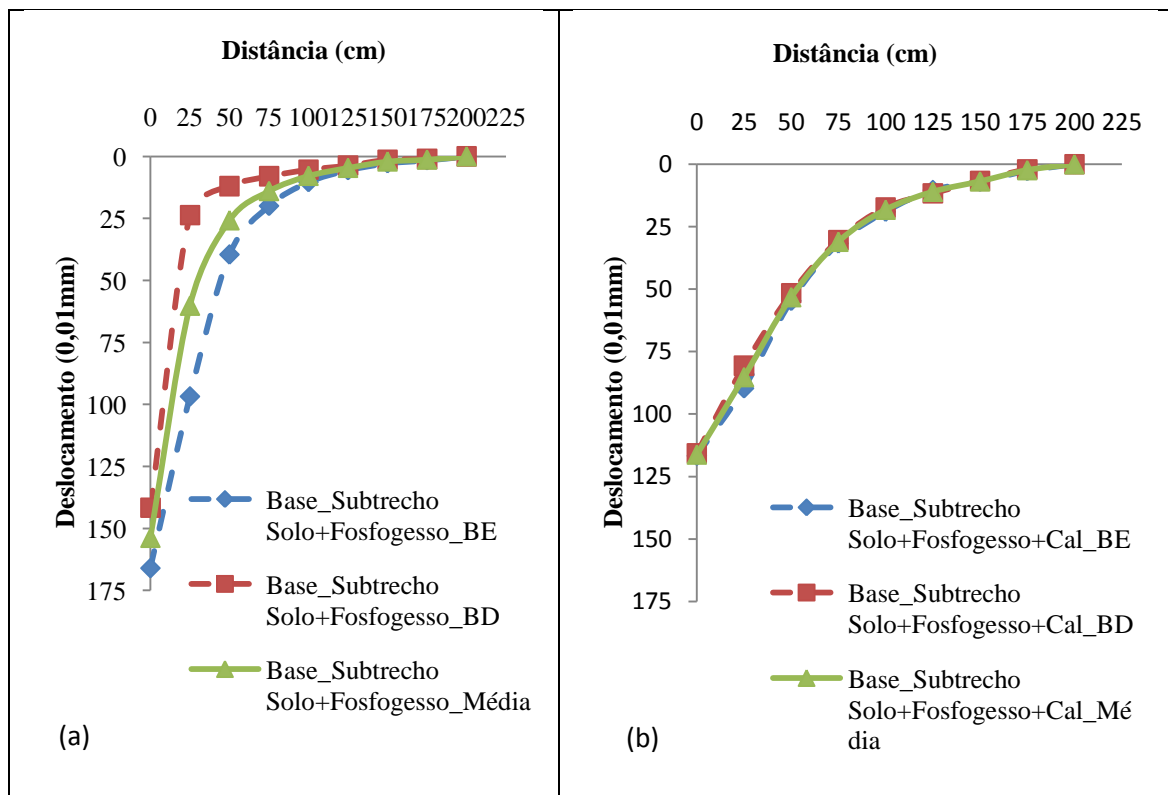


Figura 5.43 – Bacias de deslocamentos médias obtidas para ensaios de viga Benkelman sobre os subtrechos Solo+fosfogesso (a) e Solo+fosfogesso+cal (b)

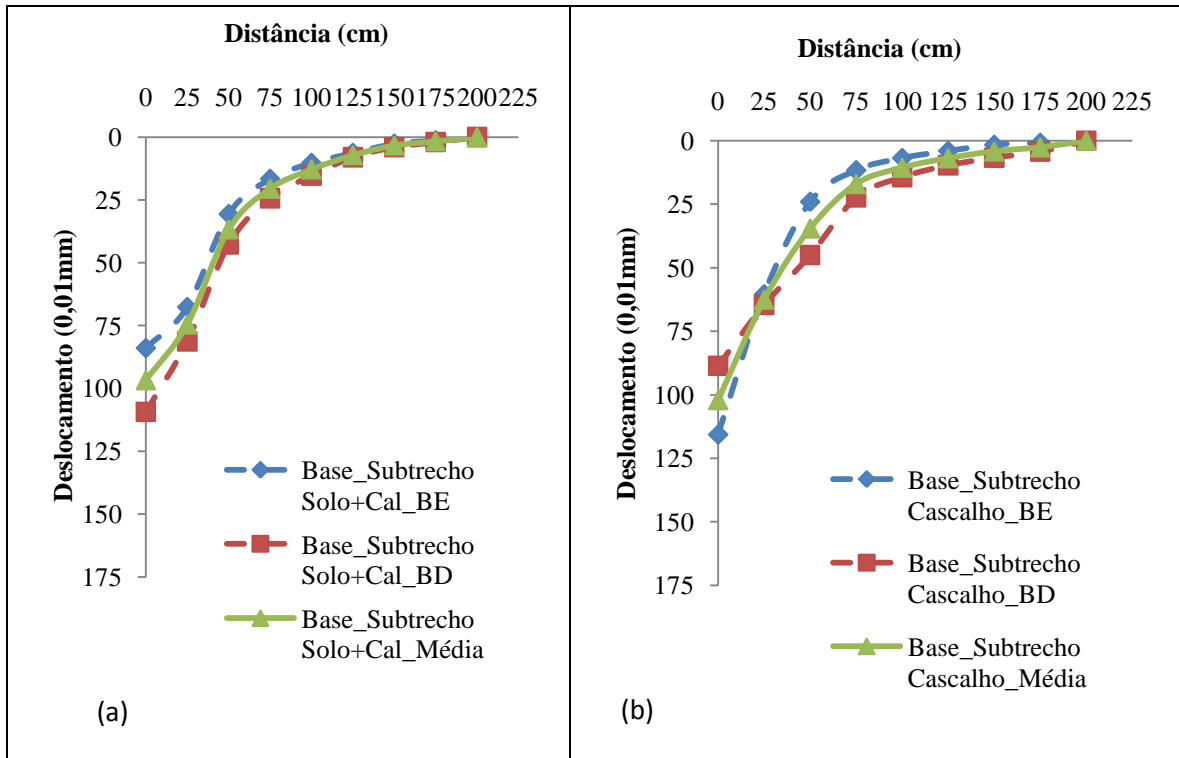


Figura 5.44 – Bacias de deslocamentos médias obtidas para ensaios de viga Benkelman sobre os subtrechos Solo+cal (a) e Cascalho (b).

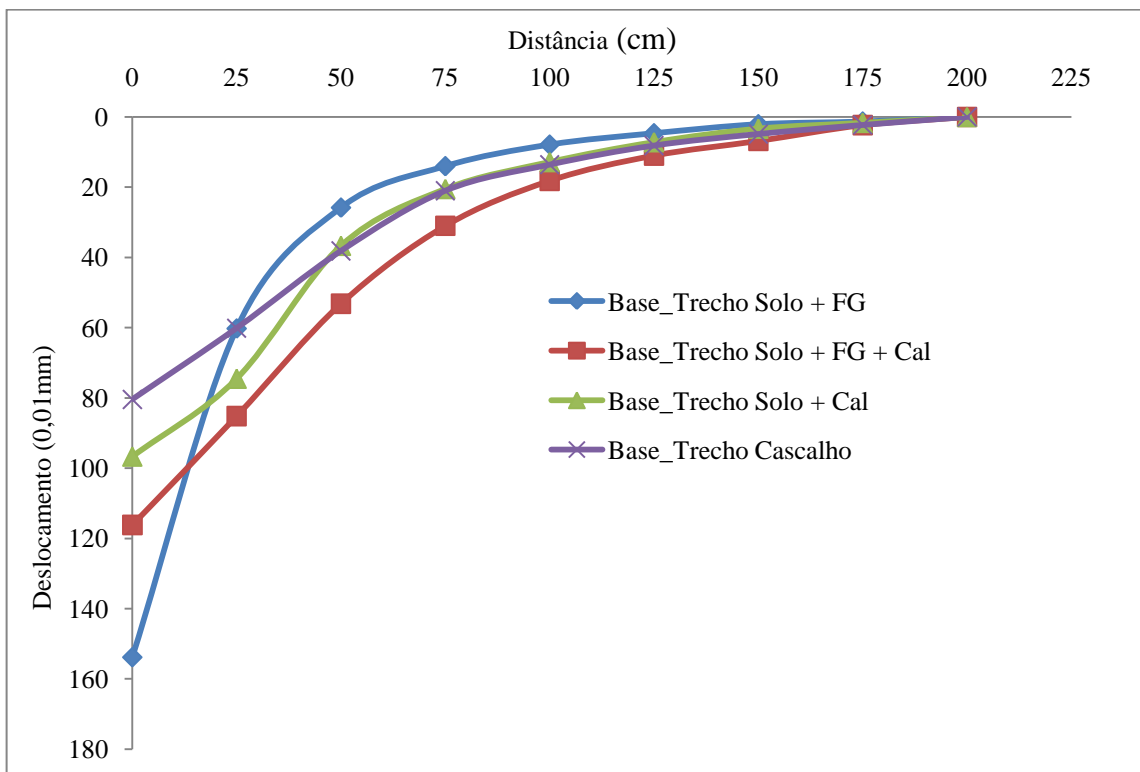


Figura 5.45 Bacias dos deslocamentos médias obtidas sobre as bases.

c) Resultados obtidos para o revestimento

Os valores de deflexão obtidos com o ensaio de viga Benkelman executado sobre o revestimento foram corrigidos em função da temperatura e da espessura do revestimento asfáltico, de acordo com a Figura 5.46 do DER/SP (2006). Nas Tabelas 5.27 e 5.28 e nas Figuras 5.47 a 5.50 estão apresentados esses resultados para os ensaios realizados logo após a execução do revestimento, tanto no bordo esquerdo como no bordo direito. As Figuras 5.51 e 5.52 mostram as bacias médias obtidas para o bordo esquerdo e o bordo direito de cada subtrecho, assim como as bacias médias correspondentes. A Figura 5.53 resume as bacias de deslocamentos médias para cada subtrecho.

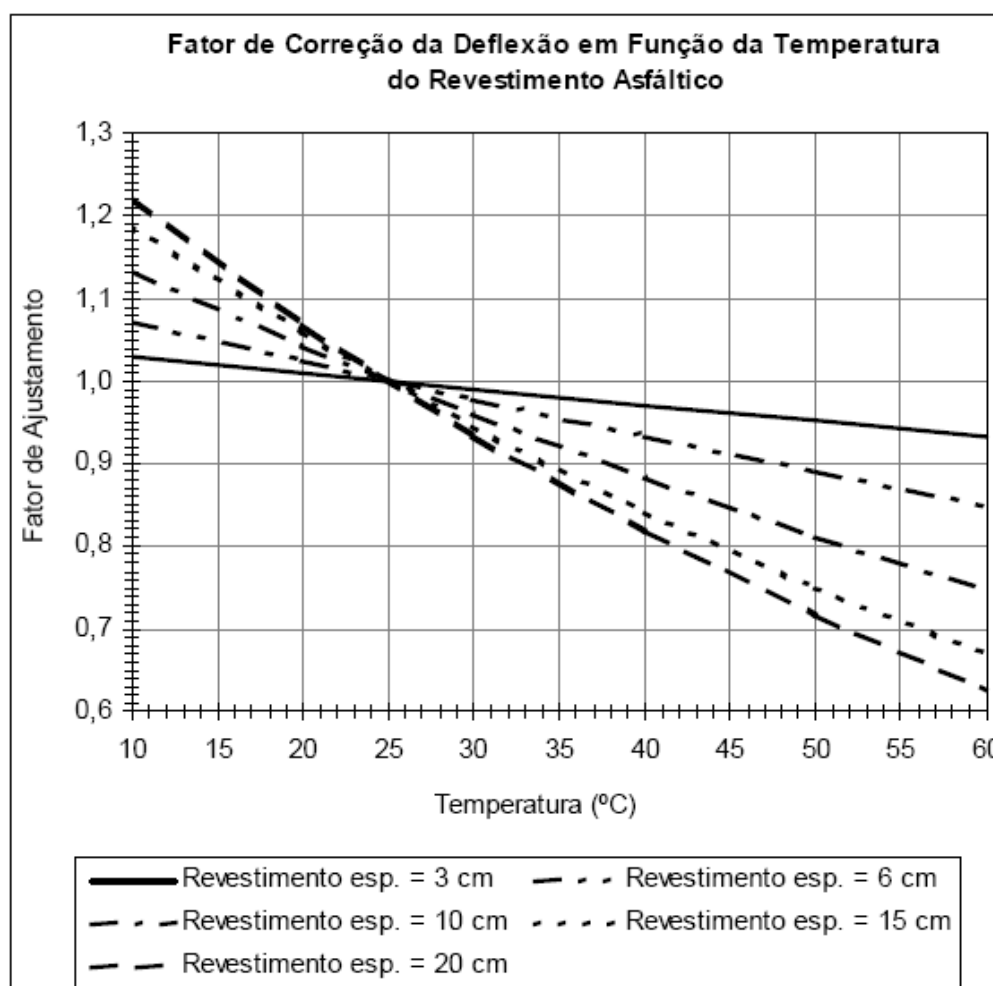


Figura 5.46 – Gráfico de fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico.

Com a execução do revestimento, nota-se uma redução significativa dos deslocamentos em todas as estacas, tanto no bordo esquerdo quanto no bordo direito, mostrando a contribuição estrutural desta camada no comportamento do pavimento. No entanto, observa-se diferença

significativa nos deslocamentos do bordo esquerdo do subtrecho solo+fosfogesso. Isto é consequência dos problemas gerados pela variação climática ocorrida depois da execução da base. Nos subtrechos de solo+fosfogesso+cal e solo+cal observa-se deslocamentos semelhantes e satisfatórios, embora um pouco mais elevados no bordo direito. O subtrecho com cascalho mostrou um comportamento mais estável com pouca diferença entres os deslocamentos medidos na base e os obtidos sobre o revestimento. Dos materiais estudados, a mistura solo+fosfogesso+cal foi a que apresentou os menores deslocamentos máximos.

Tabela 5.27 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman

REVESTIMENTO BORDO ESQUERDO									
Estaca	Data	Temp. Pav(°C)	Temp. ar(°C)	Subtrecho	D ₀ (x0,01 mm)	D ₂₅ (x0,01 mm)	R ₀ (m)	R ₀ x D ₀ (x0,01 mm.m)	k _{viga} (MPa/m)
0+00	19/11/09	47,2	33,2		-	-	-	-	
0+10	19/11/09	47,2	33,2	Solo- Fosfogesso	119	51	46	5446	472
1+00	19/11/09	47,2	33,2		64	49	201	12891	872
1+10	19/11/09	47,2	33,2		64	39	123	7933	872
2+00	19/11/09	47,2	33,2		70	31	80	5625	799
2+10	19/11/09	47,2	33,2		80	41	80	6406	702
		Dmédio				79	42	84	6641
		σ			20	7	-	-	-
		Dmin			28	24	-	-	-
		Dmax			131	60	-	-	-
3+00	19/11/09	46,2	37,7	Solo- Fosfogesso -Cal	27	18	321	8750	2052
3+10	19/11/09	46,2	37,7		57	35	146	8239	991
4+00	19/11/09	46,2	37,7		58	43	200	11719	958
4+10	19/11/09	46,2	37,7		68	37	100	6836	821
5+00	19/11/09	46,2	37,7		62	49	229	14286	898
5+10	19/11/09	46,2	37,7		49	33	200	9766	1149
		Dmédio			54	36	175	9375	1045
		σ			13	10	-	-	-
		Dmin			21	12	-	-	-
		Dmax			86	60	-	-	-
6+00	19/11/09	43,6	29,7	Solo-Cal	117	51	47	5515	477
6+10	19/11/09	43,6	29,7		78	51	114	8929	716
7+00	19/11/09	43,6	29,7		72	47	123	8894	774
7+10	19/11/09	43,6	29,7		66	41	123	8173	842
8+00	19/11/09	43,6	29,7		27	14	228,3	6250	2046
8+10	19/11/09	43,6	29,7		72	27	69	5027	774
		Dmédio			72	38	92	6671	774
		σ			26	14	-	-	-

Continuação:

		<i>Dmin</i>			7	4	-	-	-
		<i>Dmax</i>			138	73	-	-	-
15+00	19/11/09	47,5	35,3	Cascalho	19	16	803	15625	2878
15+10	19/11/09	47,5	35,3		66	45	146	9659	846
16+00	19/11/09	47,5	35,3		66	47	161	10625	846
16+10	19/11/09	47,5	35,3		70	39	100	7031	799
17+00	19/11/09	47,5	35,3		90	68	146	13068	626
17+10	19/11/09	47,5	35,3		103	80	133	13802	543
18+00	19/11/09	47,5	35,3		90	78	268	23958	626
		<i>Dmédio</i>			72	53	165	11903	778
		σ			25	22	-	-	-
		<i>Dmin</i>			9	0	-	-	-
		<i>Dmax</i>			135	107	-	-	-

Tabela 5.28- Parâmetros obtidos para no bordo direito do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman

REVESTIMENTO BORDO DIREITO									
Estaca	Data	Temp. Pav(°C)	Temp. ar(°C)	Subtrecho	D ₀ (x0,01 mm)	D ₂₅ (x0,01 mm)	R ₀ (m)	R ₀ x D ₀ (x0,01 mm.m)	k _{viga} (MPa/m)
0+05	18/11/09	45,6	32,2	Solo- Fosfogesso	94	12	38	3571	598
0+15	18/11/09	45,6	32,2		23	20	801	18750	2392
1+05	18/11/09	45,6	32,2		37	27	320	11875	1511
1+15	18/11/09	45,6	32,2		23	12	267	6250	2392
2+05	18/11/09	45,6	32,2		62	18	70	4348	897
2+15	18/11/09	45,6	32,2		29	20	320	9375	1914
		<i>Dmédio</i>				45	18	116	5196
		σ			26	5	-	-	-
		<i>Dmin</i>			0	5	-	-	-
		<i>Dmax</i>			109	31	-	-	-
3+05	18/11/09	45,6	32,2	Solo- Fosfogesso- Cal	47	37	320	15000	1196
3+15	18/11/09	45,6	32,2		45	41	801	35937	1248
4+05	18/11/09	45,6	32,2		27	25	1602	43750	2051
4+15	18/11/09	45,6	32,2		23	20	801	18750	2392
5+05	18/11/09	45,6	32,2		92	86	534	48958	611
5+15	18/11/09	45,6	32,2		41	31	320	13125	1367
		<i>Dmédio</i>				46	40	534	24479
		σ			22	22	-	-	-
		<i>Dmin</i>			0	0	-	-	-
		<i>Dmax</i>			101	94	-	-	-
6+05	18/11/09	42,3	36,7	Solo-Cal	43	27	199	8594	1300
6+15	18/11/09	42,3	36,7		47	45	1596	75000	1191
7+05	18/11/09	42,3	36,7		22	18	798	17188	2599
7+15	18/11/09	42,3	36,7		92	90	1596	146875	608
8+05	18/11/09	42,3	36,7		27	25	1596	43750	2042

Continuação:

8+15	18/11/09	42,3	36,7	43	41	1596	68750	1300
		Dmédio		46	41	684	31250	1225
		σ		23	24	-	-	-
		Dmin		0	0	-	-	-
		Dmax		102	101	-	-	-
15+05	18/11/09	42,3	36,7	35	20	199	7031	1589
15+15	18/11/09	42,3	36,7	53	29	133	7031	1059
16+05	18/11/09	42,3	36,7	67	51	199	13281	841
16+15	18/11/09	42,3	36,7	49	29	160	7813	1144
17+05	18/11/09	42,3	36,7	74	51	133	9896	752
17+15	18/11/09	42,3	36,7	57	24	94	5331	986
		Dmédio		56	34	143	7976	1003
		σ		13	12	-	-	-
		Dmin		24	3	-	-	-
		Dmax		87	65	-	-	-

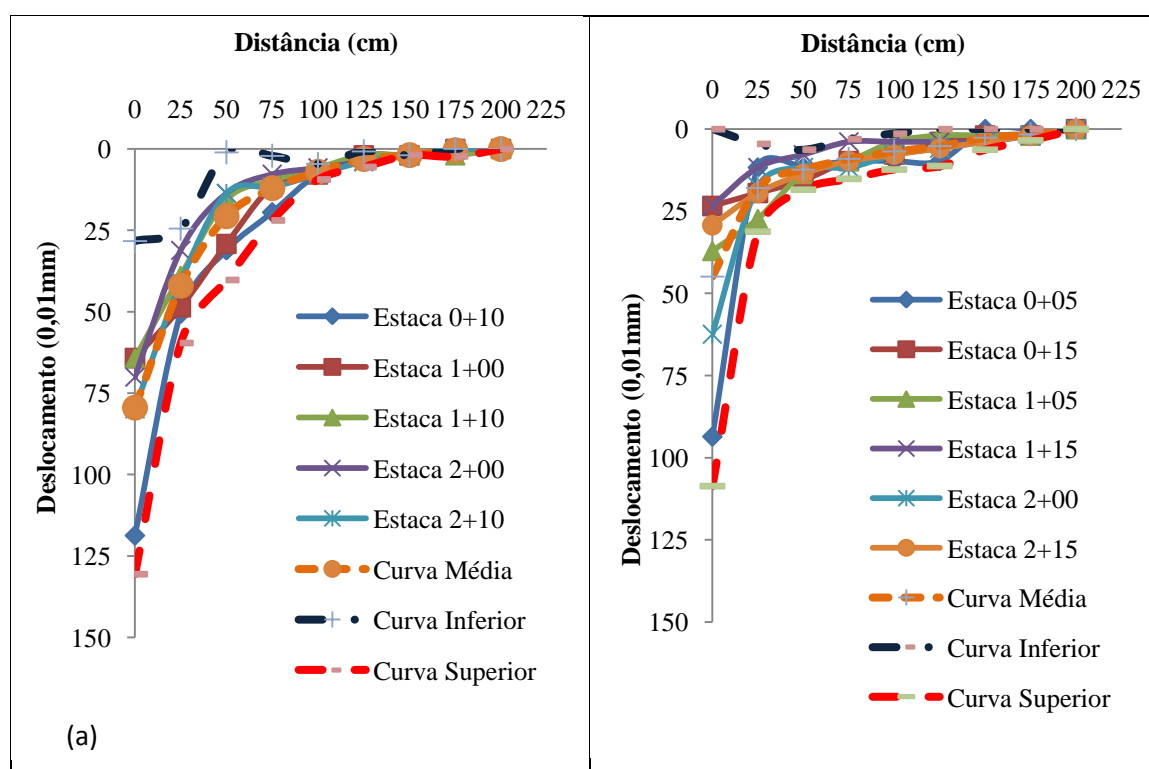


Figura 5.47 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + fosfogesso: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

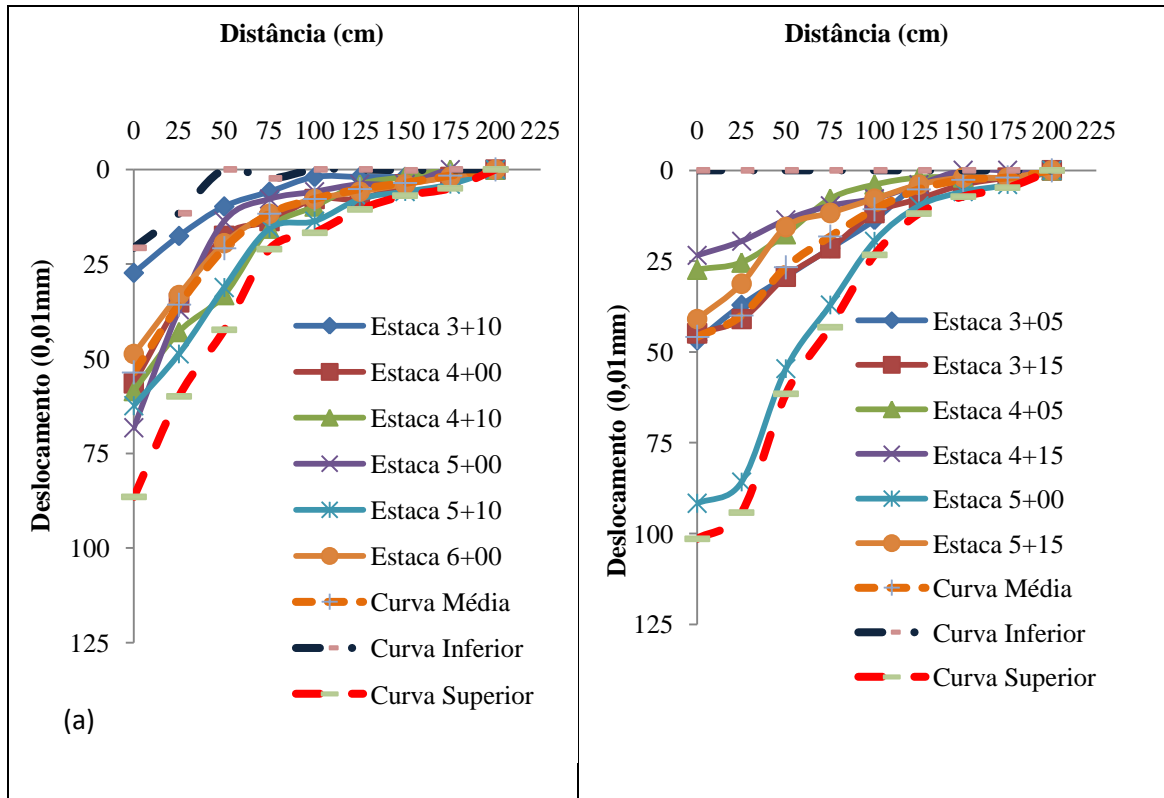


Figura 5.48– Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + fosfogesso + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

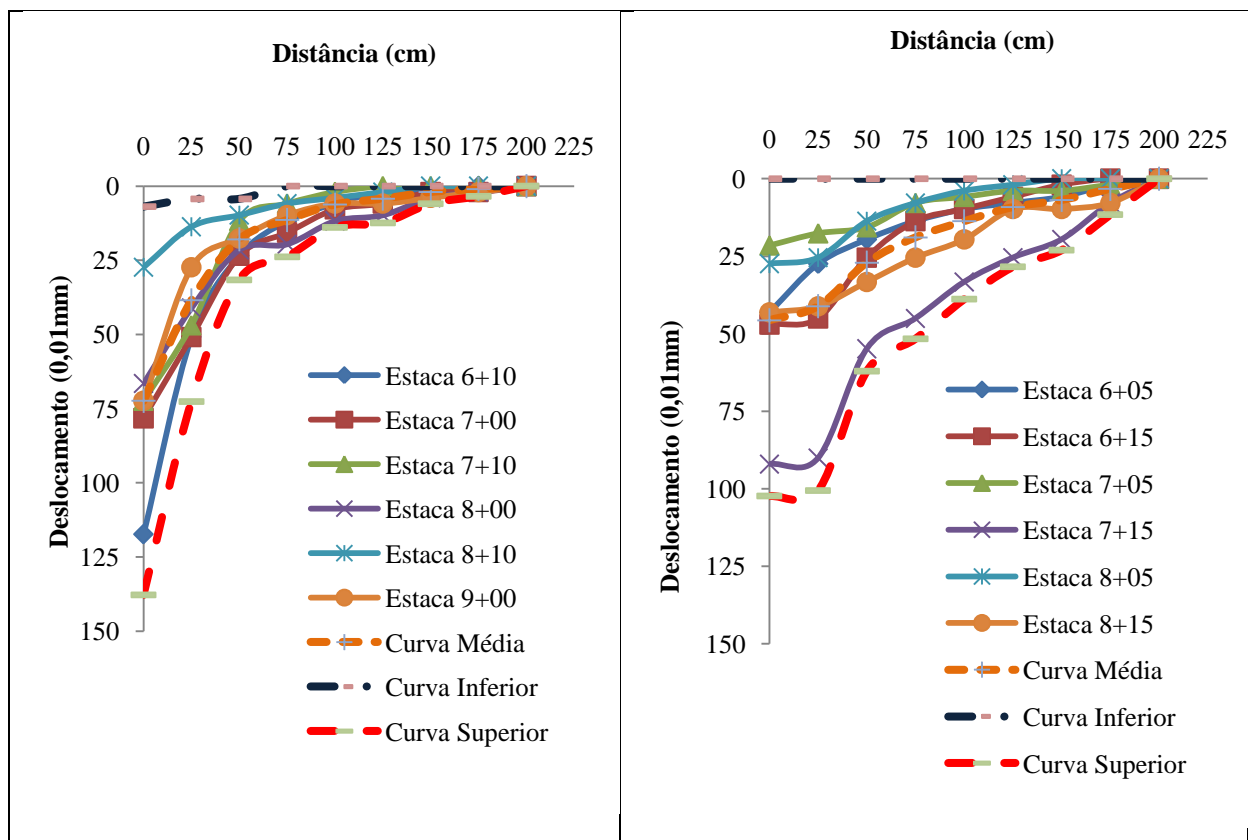


Figura 5.49 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de solo + cal: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

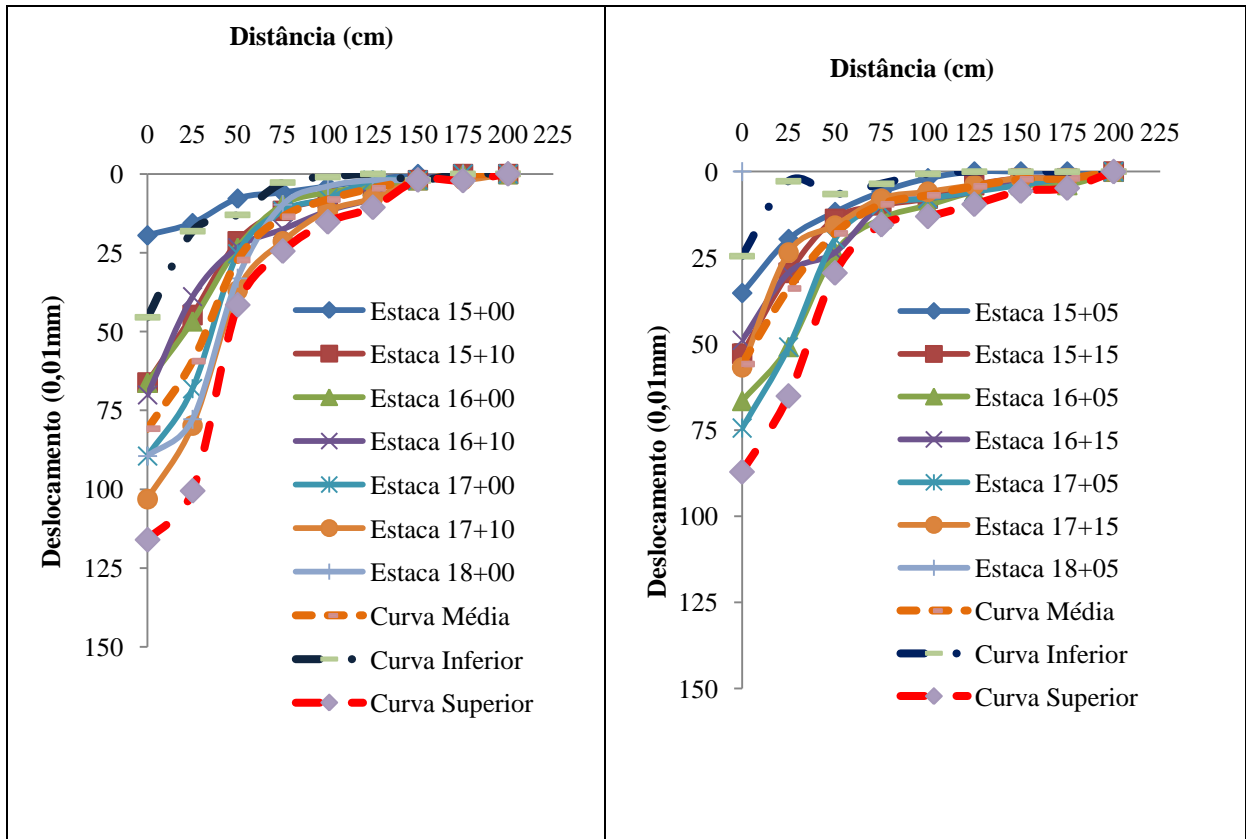


Figura 5.50 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho de cascalho: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

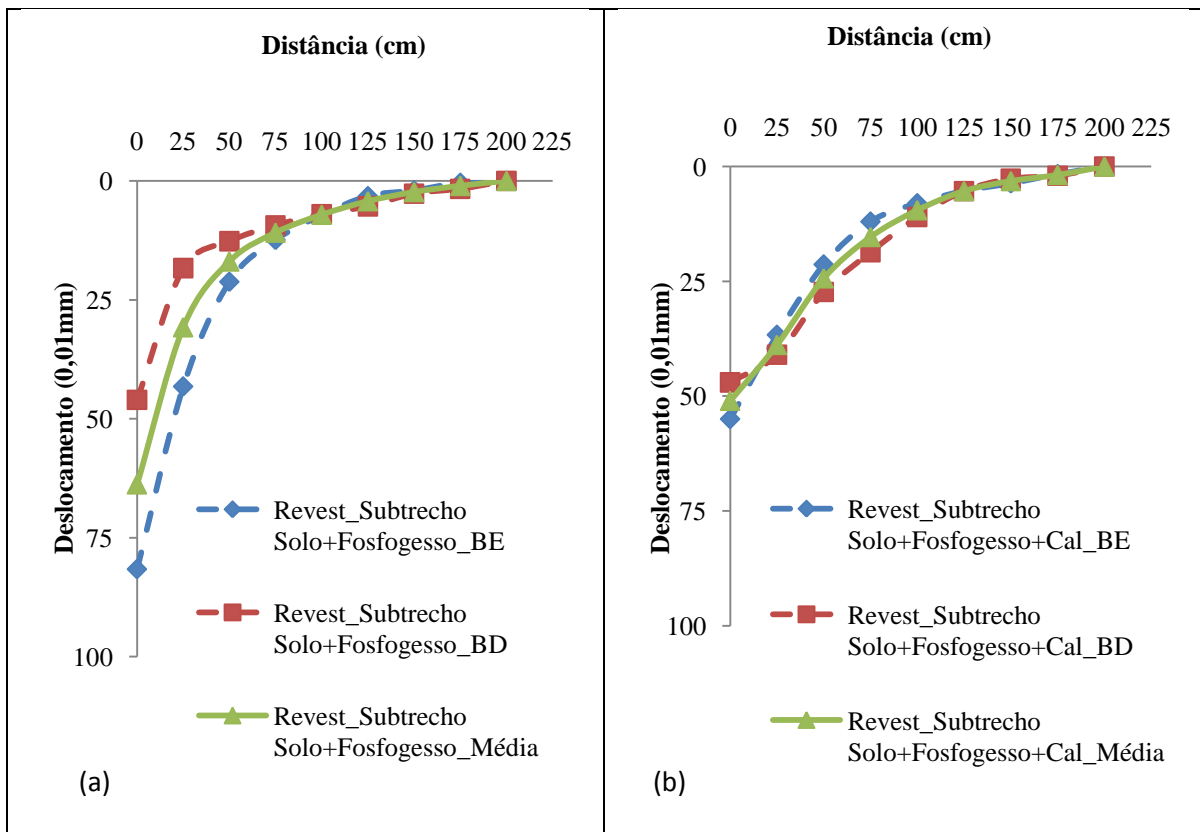


Figura 5.51 - Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+fosfogesso (a) e solo+fosfogesso+cal (b).

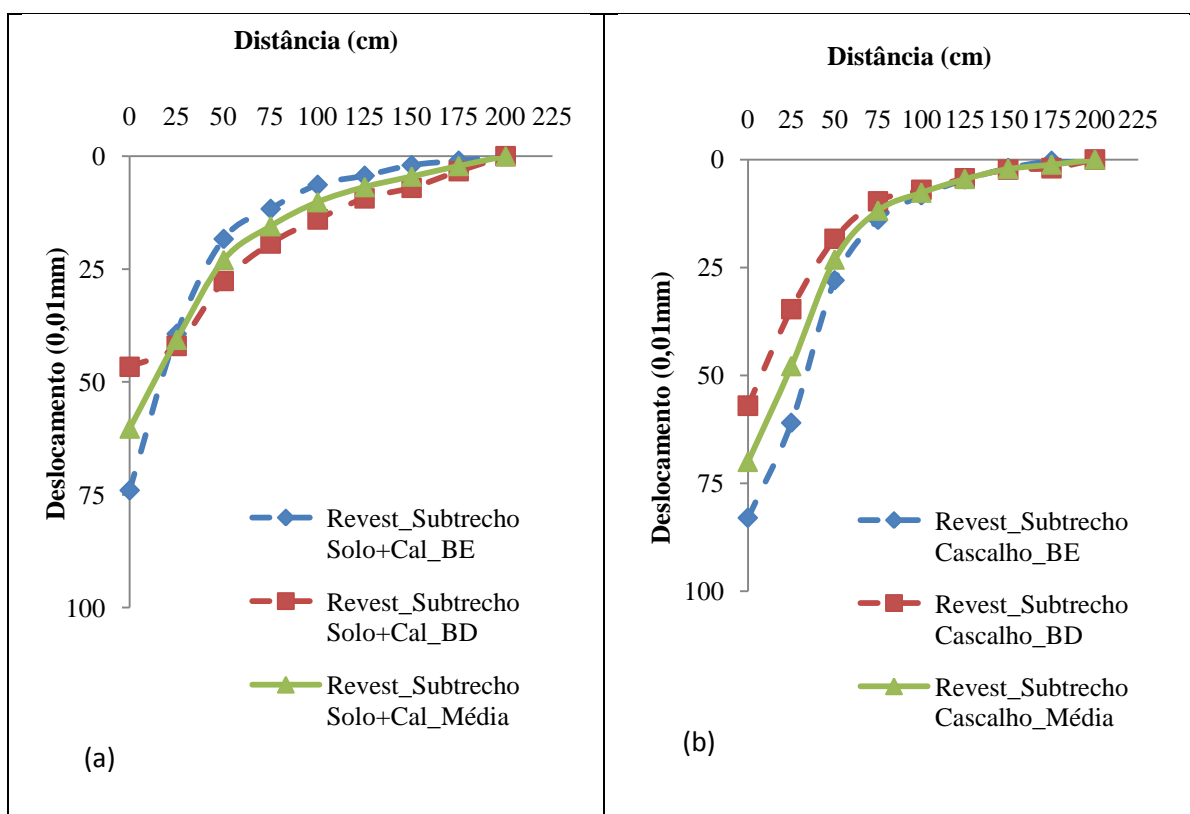


Figura 5.52 – Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b).

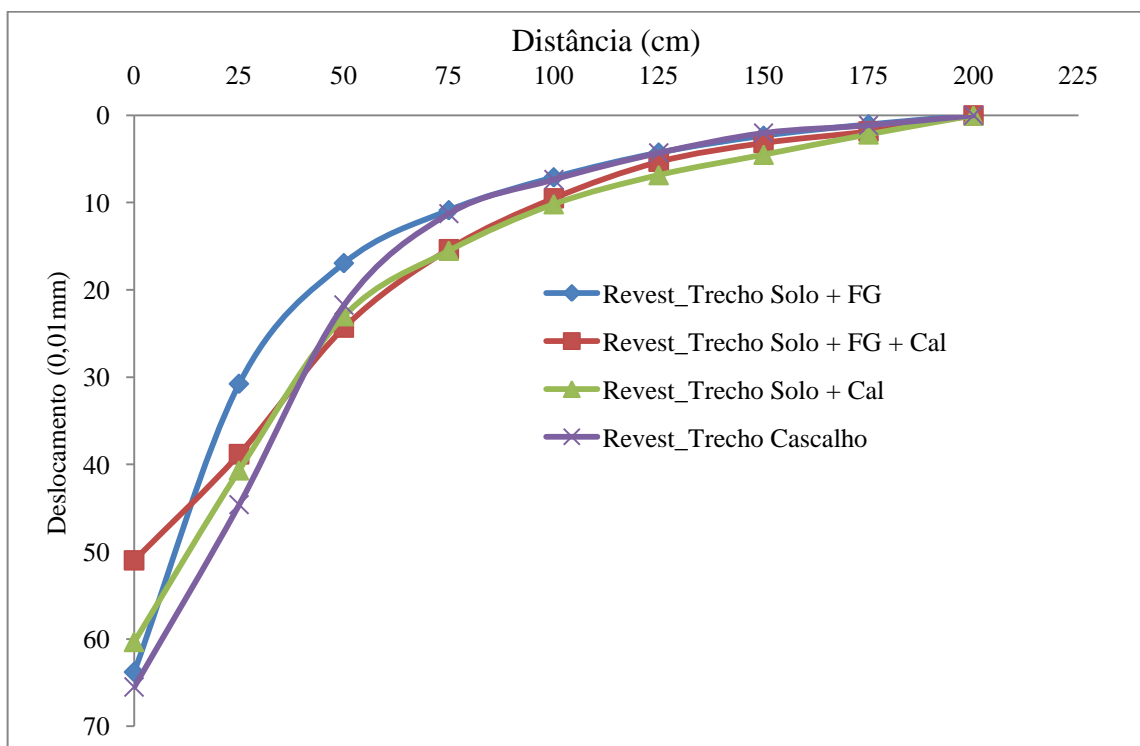


Figura 5.53- Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre os subtrechos do revestimento.

Nas Tabelas 5.29 e 5.30 e nas Figuras 5.54 a 5.57 estão apresentados os resultados dos ensaios de viga Benkelman realizados 6 meses após a abertura ao tráfego, tanto no bordo esquerdo como no bordo direito. As Figuras 5.58 e 5.59 mostram as bacias médias obtidas para o bordo esquerdo e o bordo direito de cada subtrecho, assim como as bacias médias correspondentes. A Figura 5.60 resume as bacias de deslocamentos médias para cada subtrecho.

No bordo esquerdo do subtrecho solo+fosfogesso, ainda foi notado deslocamento maior quando comparado ao bordo direito do mesmo subtrecho. Porém, a diferença é menor que aquela observada na primeira etapa. Provavelmente isto ocorreu, pois a água já não está mais em contato com o solo, já que nesse período já existia a impermeabilização da base com o revestimento asfáltico e a implantação do sistema de drenagem, e já ocorreu a estabilização química. Nos subtrechos de solo+fosfogesso+cal e solo+cal foram obtidos valores de deslocamentos semelhantes e satisfatórios tanto no bordo esquerdo e como no bordo direito. No subtrecho do cascalho, contrariamente ao que foi observado na primeira etapa, foram obtidos maiores deslocamentos no bordo direito em comparação ao bordo esquerdo. Isto pode ser resultante do tráfego atuante nesse subtrecho.

Valores de raios de curvatura inferiores a 100m foram observados apenas em duas estacas localizadas no subtrecho solo+fosfogesso (0+10 e 2+00). No demais subtrechos, os valores obtidos sugerem um bom comportamento estrutural da pista experimental. Observações semelhantes podem ser feitas com o produto $R_0 \times D_0$, uma vez que este deve ser superior a 5500m para que o pavimento possa ser considerado satisfatório do ponto de vista estrutural.

Tabela 5.29 - Parâmetros obtidos no bordo esquerdo do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman na segunda etapa.

REVESTIMENTO BORDO ESQUERDO (2a Etapa)									
Estaca	Data	Temp. Pav(°C)	Temp. ar(°C)	Subtrecho	D₀ (x0,01 mm)	D₂₅ (x0,01 mm)	R₀ (m)	R₀ x D₀ (x0,01 mm.m)	k_{viga} (MPa/m)
0+00	28/05/10	42,1	31,5		-	-	-	-	-
0+10	28/05/10	42,1	31,5	Solo- Fosfogesso	98	49	64	6250	572
1+00	28/05/10	42,1	31,5		53	31	145	7670	1059
1+10	28/05/10	42,1	31,5		65	45	160	10313	866
2+00	28/05/10	42,1	31,5		72	27	69	5027	773
2+10	28/05/10	42,1	31,5		51	45	532	27083	1099

Continuação:

		<i>Dmédio</i>			68	40	111	7509	826	
		<i>σ</i>			17	9	-	-	-	
		<i>Dmin</i>			25	18	-	-	-	
		<i>Dmax</i>			110	61	-	-	-	
3+00	28/05/10	42,1	31,5		55	53	1595	87500	1021	
3+10	28/05/10	42,1	31,5	Solo- Fosfogesso- Cal	47	45	1595	75000	1191	
4+00	28/05/10	42,1	31,5		24	22	1595	37500	2382	
4+10	28/05/10	42,1	31,5		41	39	1595	65625	1361	
5+00	28/05/10	42,1	31,5		31	29	1595	50000	1787	
5+10	28/05/10	42,1	31,5		47	31	199	9375	1191	
		<i>Dmédio</i>			41	37	736	30048	1372	
		<i>σ</i>			11	10	-	-	-	
		<i>Dmin</i>			15	11	-	-	-	
		<i>Dmax</i>			67	63	-	-	-	
6+00	28/05/10	42,1	31,5	Solo-Cal	69	53	199	13672	817	
6+10	28/05/10	42,1	31,5		45	43	1595	71875	1243	
7+00	28/05/10	42,1	31,5		74	51	133	9896	752	
7+10	28/05/10	42,1	31,5		43	41	1595	68750	1299	
8+00	28/05/10	42,1	31,5		22	20	1595	34375	2599	
8+10	28/05/10	42,1	31,5		41	39	1595	65625	1361	
		<i>Dmédio</i>				49	41	399	19531	1143
		<i>σ</i>				18	11	-	-	-
		<i>Dmin</i>			5	14	-	-	-	
		<i>Dmax</i>			93	68	-	-	-	
15+00	28/05/10	42,1	31,5	Cascalho	63	41	145	9091	893	
15+10	28/05/10	42,1	31,5		22	20	1595	34375	2599	
16+00	28/05/10	42,1	31,5		43	41	1595	68750	1299	
16+10	28/05/10	42,1	31,5		51	43	399	20313	1099	
17+00	28/05/10	42,1	31,5		61	59	1595	96875	922	
17+10	28/05/10	42,1	31,5		69	67	1595	109375	817	
18+00	28/05/10	42,1	31,5		69	67	1595	109375	817	
		<i>Dmédio</i>				54	48	558	30000	1042
		<i>σ</i>				16	16	-	-	-
		<i>Dmin</i>			14	9	-	-	-	
		<i>Dmax</i>			93	87	-	-	-	

Tabela 5.30 - Parâmetros obtidos para no bordo direito do revestimento a partir do ensaio de viga Benkelman na segunda etapa.

REVESTIMENTO BORDO DIREITO (2a Etapa)									
Estaca	Data	Temp. Pav(°C)	Temp. ar(°C)	Subtrecho	D₀ (x0,01 mm)	D₂₅ (x0,01 mm)	R₀ (m)	R₀ x D₀ (x0,01 mm.m)	k_{viga} (MPa/m)
0+05	27/05/10	40	29,5	Solo- Fosfogesso	65	20	69	4484	864
0+15	27/05/10	40	29,5		61	35	122	7452	920

Continuação:

1+05	27/05/10	40	29,5		35	33	1591	56250	1584
1+15	27/05/10	40	29,5		35	29	530	18750	1584
2+05	27/05/10	40	29,5		49	39	318	15625	1141
2+15	27/05/10	40	29,5		35	22	227	8036	1584
					Dmédio	30	184	8594	1196
					σ	7	-	-	-
					Dmin	12	-	-	-
					Dmax	16	-	-	-
					Dmax	78	48	-	-
3+05	27/05/10	39,5	28		47	37	318	15000	1188
3+15	27/05/10	39,5	28		75	59	199	14844	750
4+05	27/05/10	39,5	28	Solo-	51	33	177	9028	1097
4+15	27/05/10	39,5	28	Fosfogesso-	57	49	398	22656	983
5+05	27/05/10	39,5	28	Cal	69	47	145	9943	815
5+15	27/05/10	39,5	28		37	29	398	14844	1501
					Dmédio	43	233	13034	1000
					σ	10	-	-	-
					Dmin	13	-	-	-
					Dmax	24	-	-	-
					Dmax	88	68	-	-
6+05	27/05/10	42	31,5		33	18	199	6641	1677
6+15	27/05/10	42	31,5		59	41	177	10417	950
7+05	27/05/10	42	31,5	Solo-Cal	22	14	398	8594	2592
7+15	27/05/10	42	31,5		49	33	199	9766	1141
8+05	27/05/10	42	31,5		33	31	1591	53125	1677
8+15	27/05/10	42	31,5		37	27	318	11875	1501
					Dmédio	27	273	10625	1438
					σ	9	-	-	-
					Dmin	12	-	-	-
					Dmax	9	-	-	-
					Dmax	69	51	-	-
15+05	27/05/10	37,1	30,0		65	39	122	7933	864
15+15	27/05/10	37,1	30,0		77	37	80	6094	731
16+05	27/05/10	37,1	30,0	Cascalho	82	47	88	7292	679
16+15	27/05/10	37,1	30,0		63	35	114	7143	891
17+05	27/05/10	37,1	30,0		86	51	88	7639	648
17+15	27/05/10	37,1	30,0		65	31	94	6066	864
					Dmédio	40	95	6969	767
					σ	7	-	-	-
					Dmin	9	-	-	-
					Dmax	50	23	-	-
					Dmax	96	57	-	-

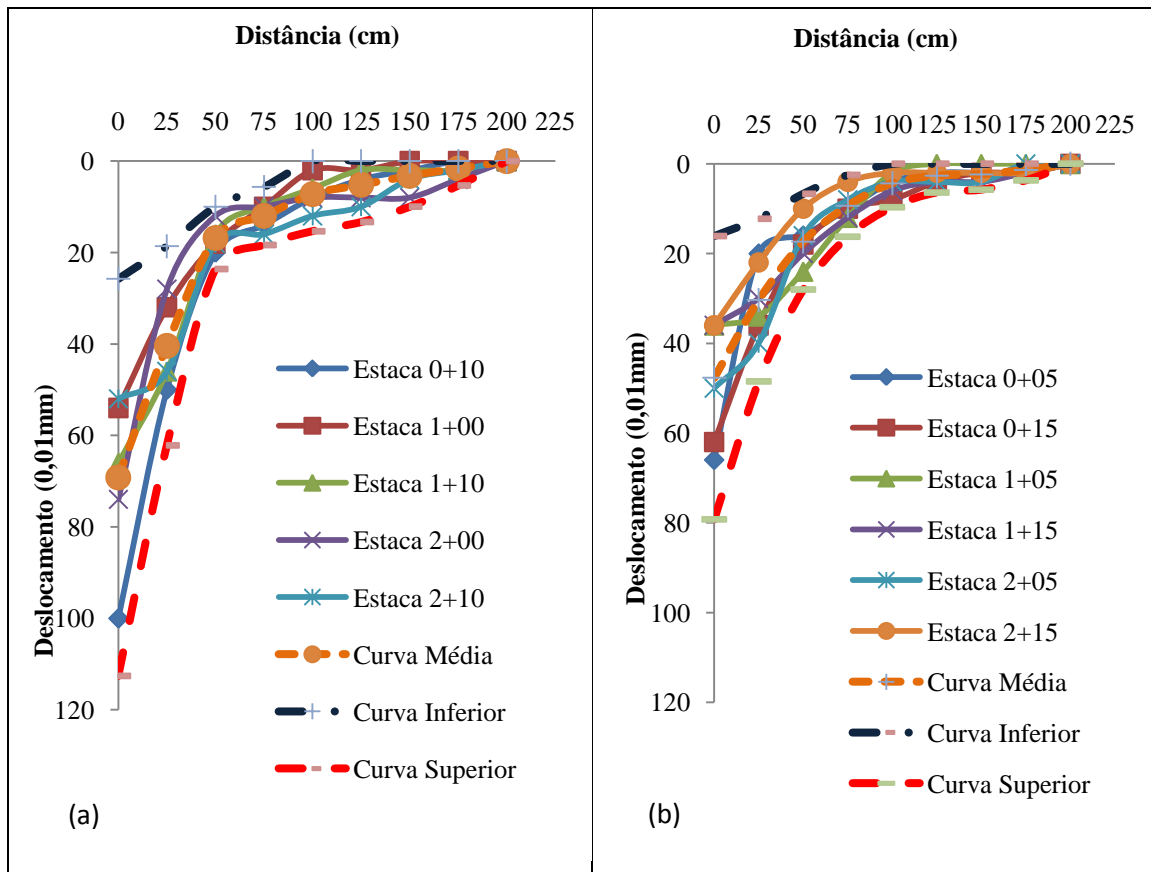


Figura 5.54 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento do subtrecho solo + fosfogesso na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

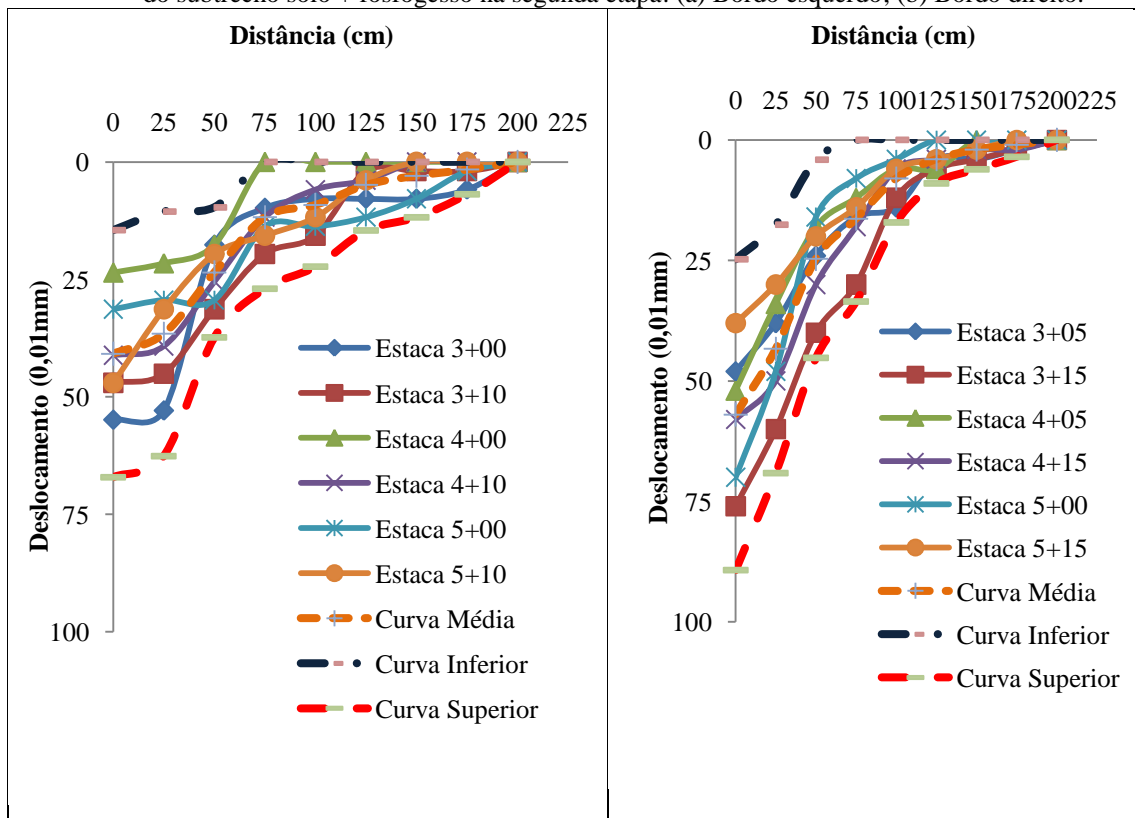


Figura 5.55 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho solo + fosfogesso+cal na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

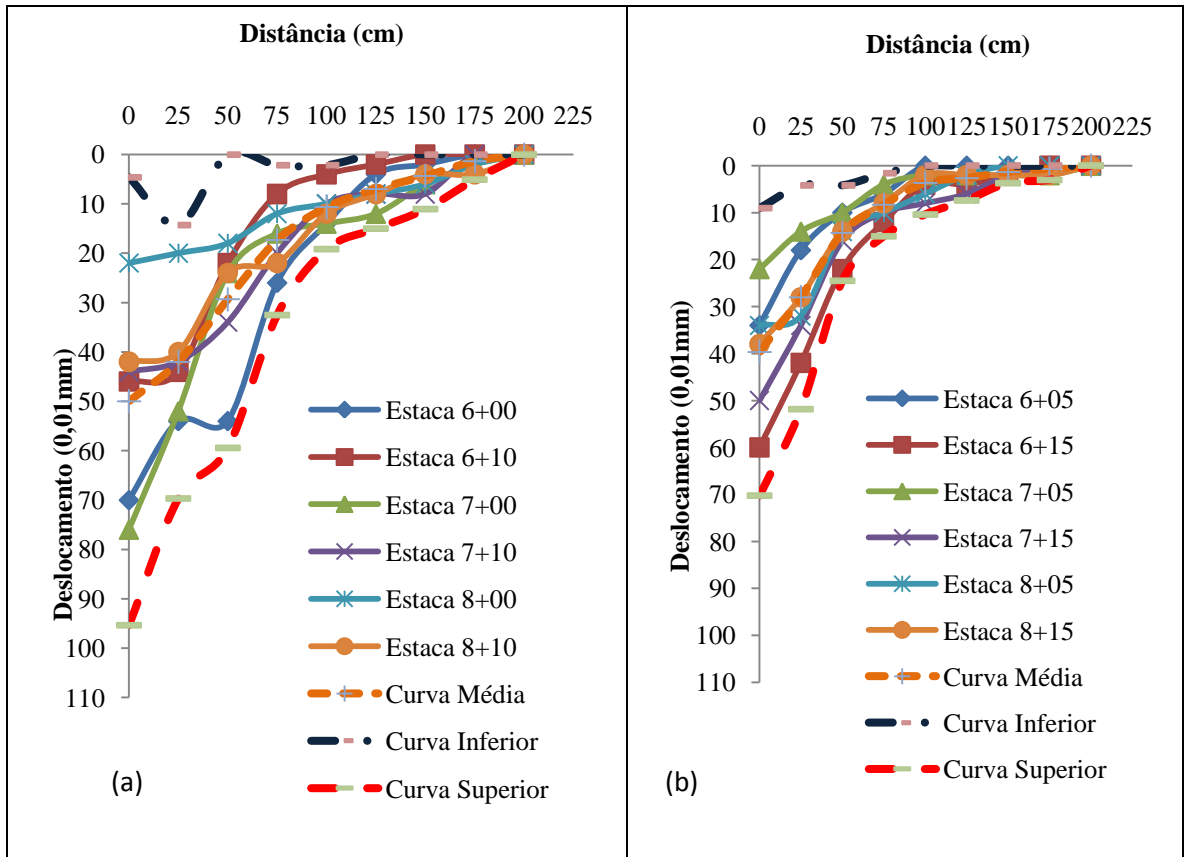


Figura 5.56 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho solo +cal na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito.

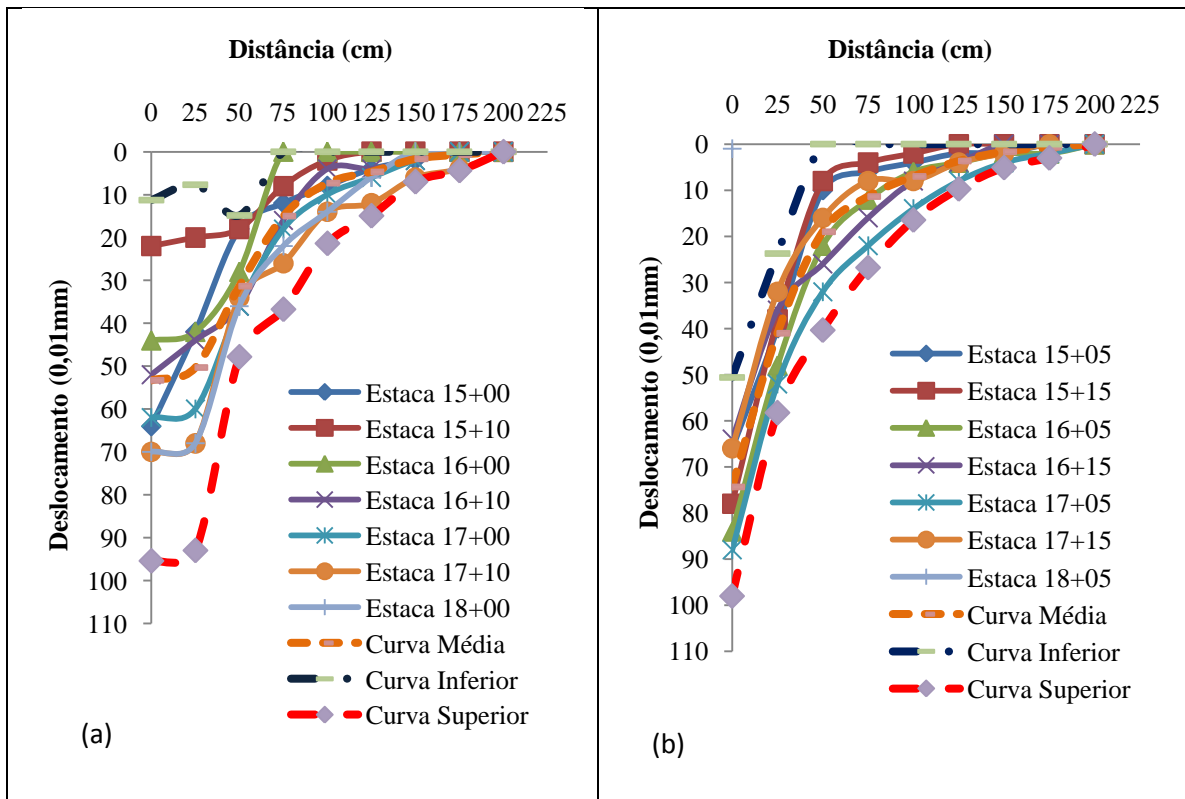


Figura 5.57 – Bacias de deslocamentos obtidas para ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento no subtrecho do cascalho na segunda etapa: (a) Bordo esquerdo; (b) Bordo direito

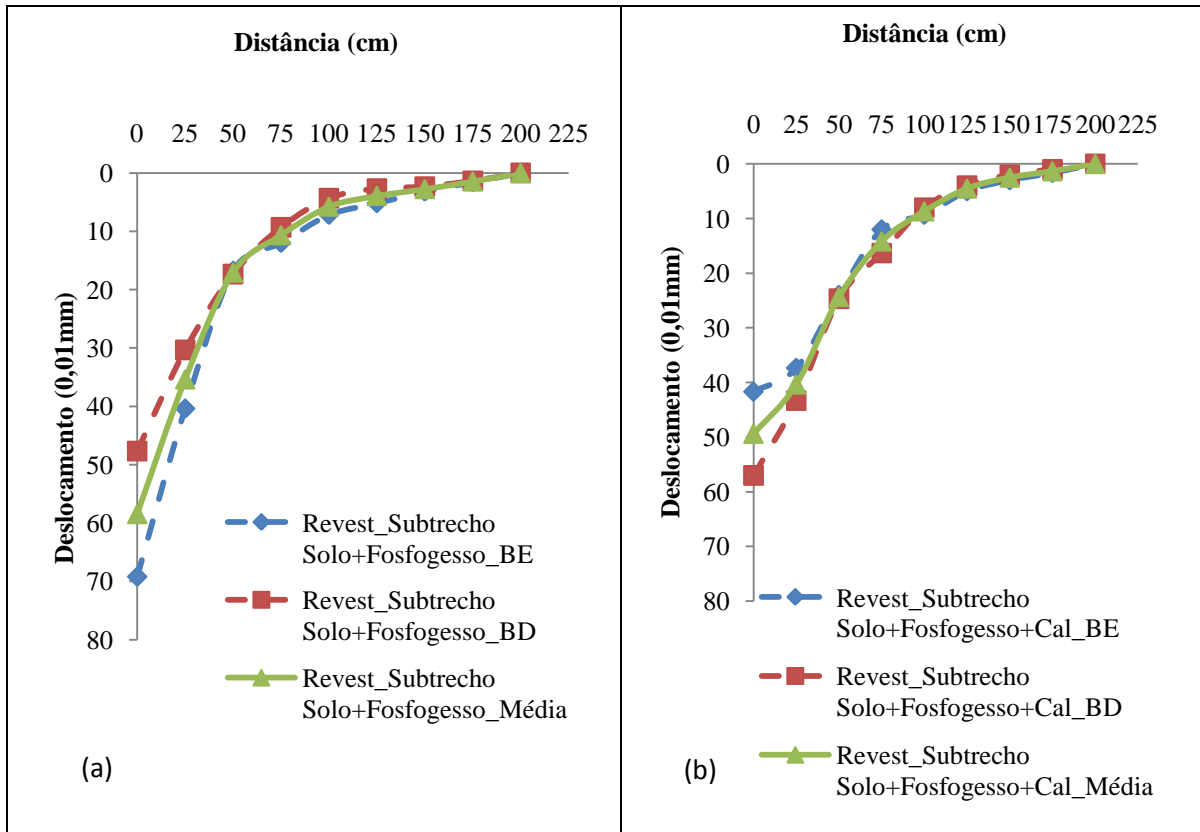


Figura 5.58 - Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento (segunda etapa) dos subtrechos solo+fosfogesso (a) e solo+fosfogesso+cal (b).

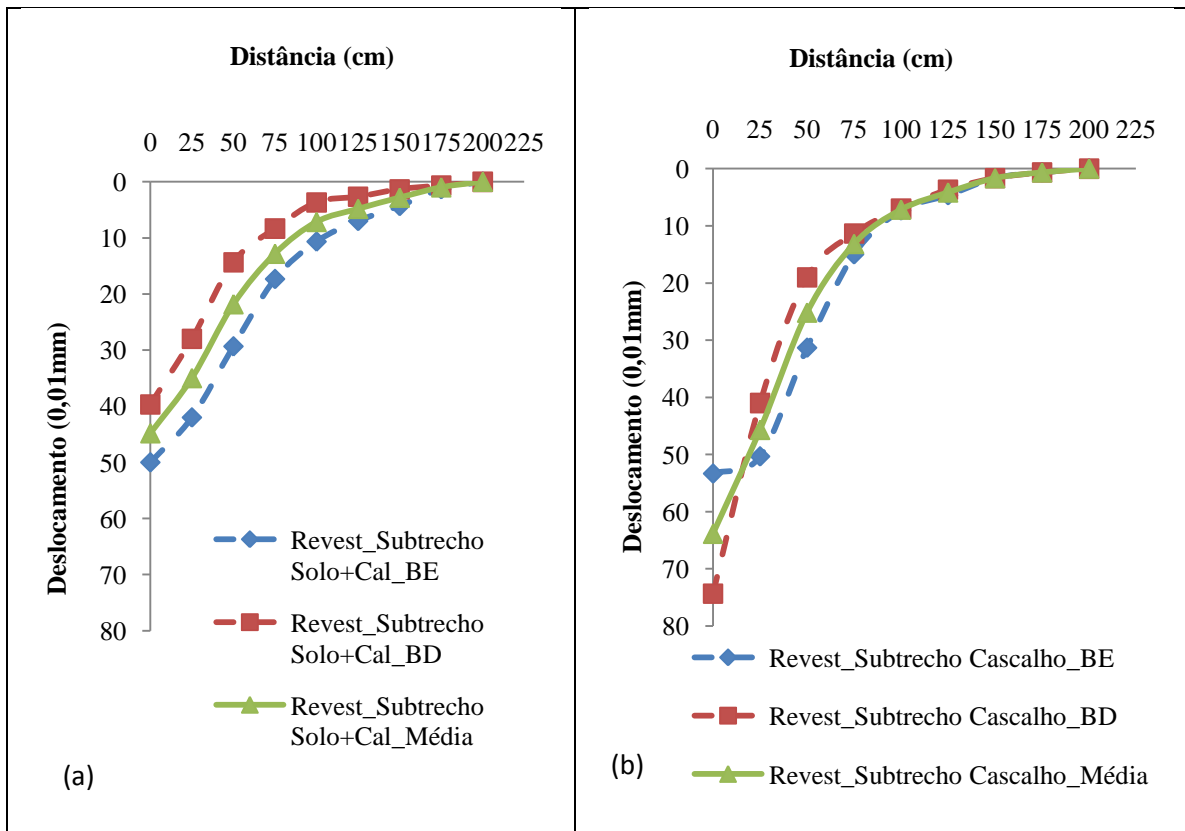


Figura 5.59 - Bacias de deslocamentos médias obtidas sobre o revestimento dos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b).

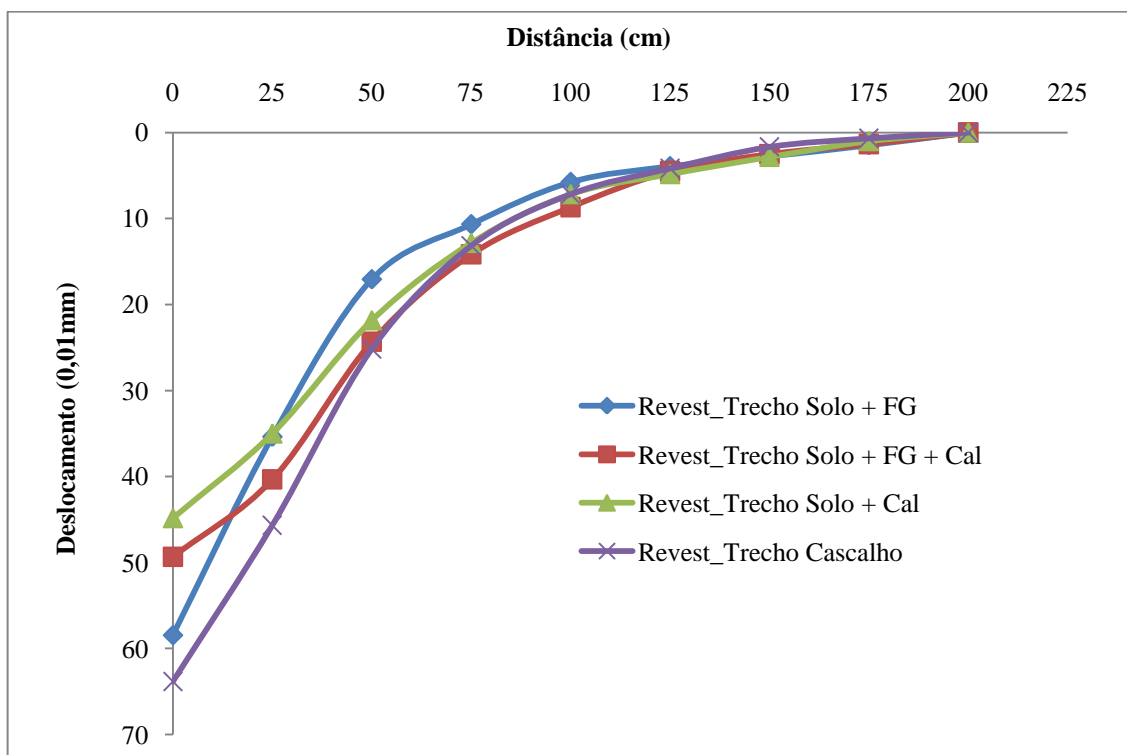


Figura 5.60- Bacias dos deslocamentos médios obtidas sobre os subtrechos do revestimento na segunda etapa.

5.4.3 Prova de carga sobre placa

A partir dos ensaios de provas de carga determinou-se para cada estaca a média dos deslocamentos com bases nas leituras feitas nos três extensômetros utilizados nesse trabalho e em seguida foram obtidas as curvas tensões x deformações para cada estaca. Depois, determinou-se parâmetros tais como os deslocamentos máximos (D_{max}), deslocamentos correspondentes a uma pressão de 560 kPa (D_{560kPa}), sendo que esta corresponde à pressão dos pneus tradicionalmente utilizada nos outros ensaios. Além disso, foram avaliados os deslocamentos recuperados (elásticos) e os não recuperados (plásticos) em cada estaca. Finalmente, calculou-se os coeficientes de reação da placa (k_{placa}). Esse parâmetro é definido pela Equação 5.4:

$$k_{placa} = \frac{P}{D} \quad (5.4)$$

Onde

P= pressão necessária aplicada na placa para produzir um determinado recalque (nesse caso P=560 kPa);

D = deslocamento produzido pela aplicação da carga P (nesse caso D_{560}).

a) Resultados obtidos para o subleito

A Tabela 5.31 apresenta os valores obtidos para esses parâmetros em cada estaca, assim como os valores médios e desvios padrões por trechos para o subleito. As Figura 5.61 e 5.62 mostram as curvas tensão x deslocamento obtidas para cada subtrecho. Na Figura 5.63 estão apresentadas as curvas médias por subtrecho.

No subtrecho solo+fosfogesso observa-se pouca diferenças entre os valores de deslocamentos para cada estaca, o que reflete um subleito homogêneo. No subtrecho solo+fosfogesso+cal nota-se diferença entre o deslocamento no bordo direito e os demais porém, o nível desses deslocamentos pode ser considerado baixo. No subtrecho solo+cal, observa-se menor deslocamento no eixo em comparação aos bordos. Isto pode ser explicado devido a um problema de execução como mostrado pelos resultados obtidos nos ensaios de frasco de areia e *speedy*: umidade de compactação abaixo da ótima. O subleito do subtrecho do cascalho apresenta os maiores deslocamentos. Observa-se ainda valor menor de deslocamento no eixo em comparação aos bordos o que pode ser atribuído à questões de execução.

De forma geral, nos pontos ensaiados foram observadas diferenças de comportamento do subleito de um subtrecho para o outro. No entanto, com essa quantidade de dados não se pode afirmar se há heterogeneidade do subleito.

A partir das curvas tensão x deslocamento, é possível observar um comportamento quase linear do subleito nas fases de carregamento até as cargas máximas aplicadas. Já no descarregamento esse comportamento passa a ser completamente não linear com uma acentuação das curvas nas últimas estações de descarregamento.

Tabela 5.31 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa no subleito

SUBLEITO								
Estaca	Data	Posição	Subtrecho	D_{\max} (mm)	D_{560kPa} (mm)	$D_{\text{plástico}}$ (mm)	$D_{\text{elástico}}$ (mm)	k_{placa} (MPa/m)
0+10	26/10/09	BE	Solo- Fosfogesso	1,10	0,85	0,57	0,53	666
1+10	26/10/09	EIXO		1,13	0,79	0,59	0,54	719
2+10	26/10/09	BD		1,12	0,86	0,54	0,58	658
<i>D</i> médio				1,11	0,83	0,56	0,55	680
σ				0,01	0,03	0,02	0,02	-
3+10	24/10/09	BE	Solo-	1,46	1,14	0,69	0,77	498

Continuação

4+10	24/10/09	EIXO	Fosfogesso- Cal	1,50	1,11	0,79	0,72	511
5+10	24/10/09	BD		1,97	1,45	1,22	0,74	391
Dmédio				1,64	1,23	0,90	0,74	460
σ				0,23	0,15	0,23	0,02	-
6+10	21/10/09	BE	Solo-Cal	2,70	2,10	1,30	1,40	269
7+10	21/10/09	EIXO		1,46	1,19	0,81	0,66	474
8+10	21/10/09	BD		2,49	1,82	1,40	1,09	311
Dmédio				2,22	1,70	1,17	1,05	332
σ				0,54	0,38	0,26	0,30	-
15+10	15/10/09	BE	Cascalho	2,64	2,05	1,14	1,50	276
16+10	15/10/09	EIXO		2,30	1,73	0,71	1,59	327
17+10	15/10/09	BD		3,76	2,75	1,67	2,09	206
Dmédio				2,90	2,17	1,17	1,73	260
σ				0,63	0,42	0,39	0,26	-

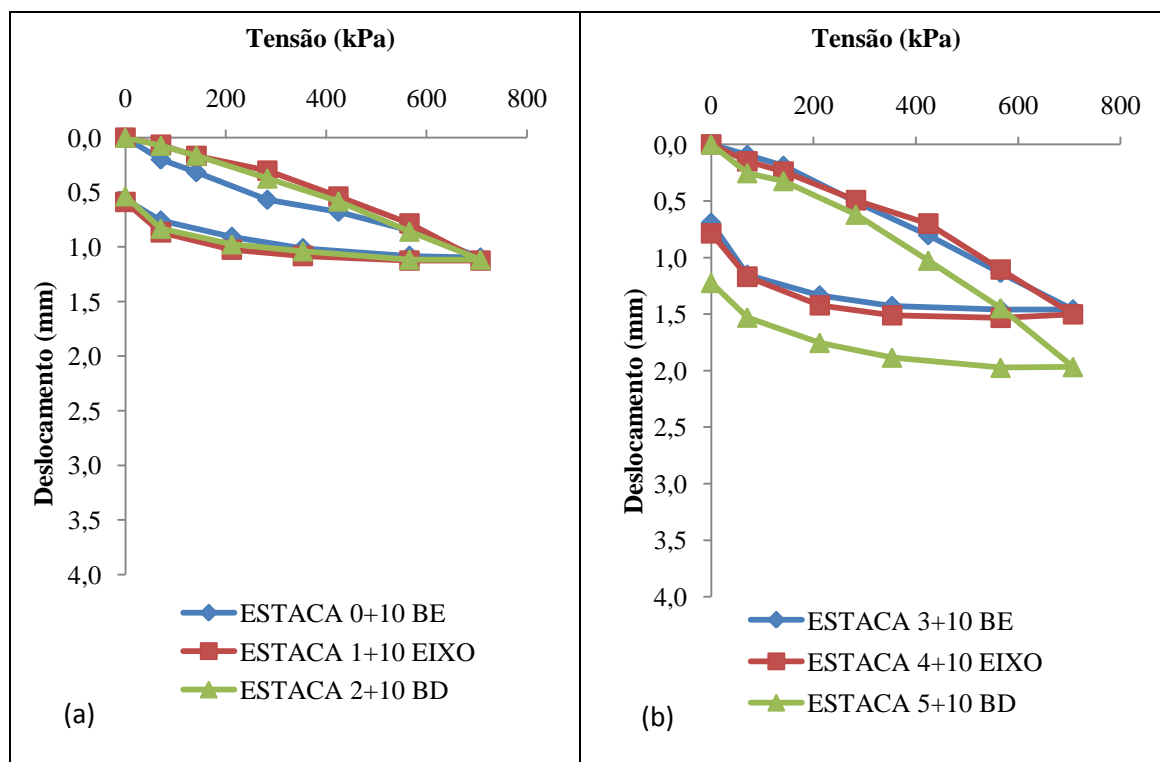


Figura 5.61 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o subleito para os diferentes subtrechos. (a) solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal.

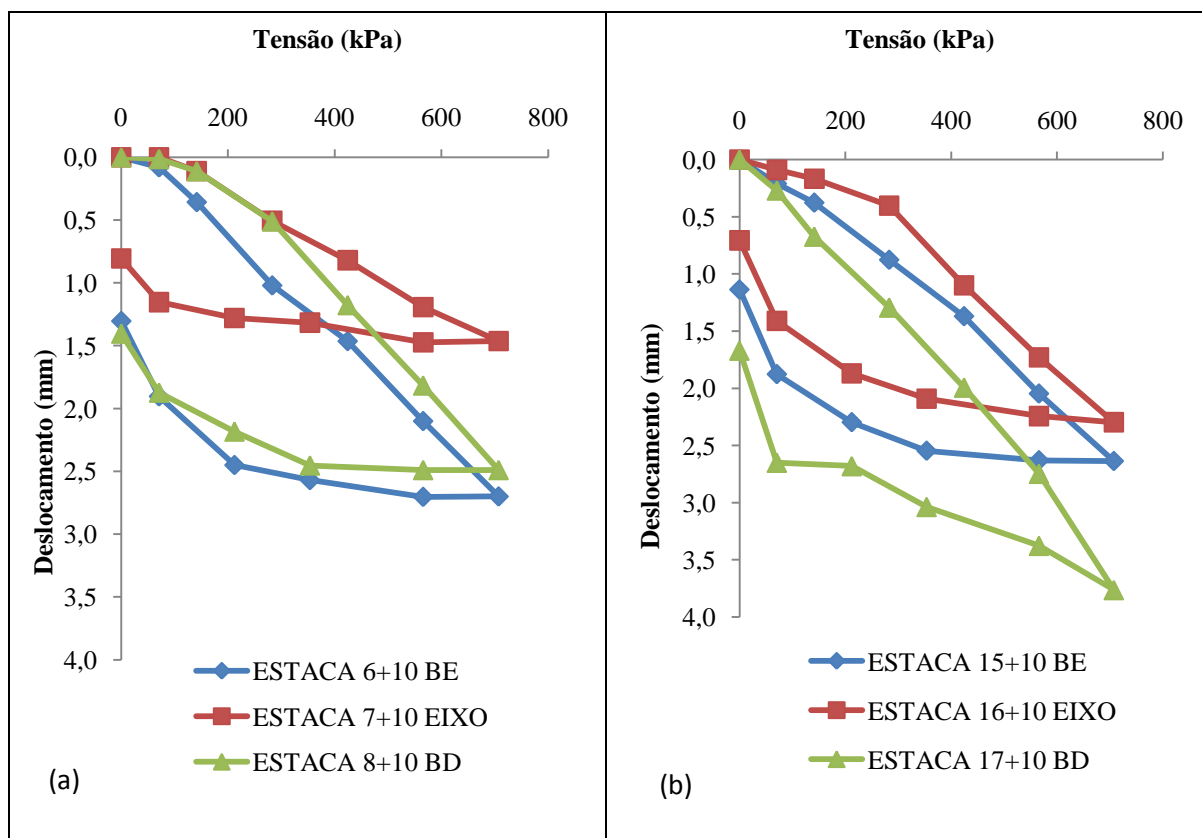


Figura 5.62 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o subleito para os diferentes subtrechos. (a)solo+cal (b) cascalho.

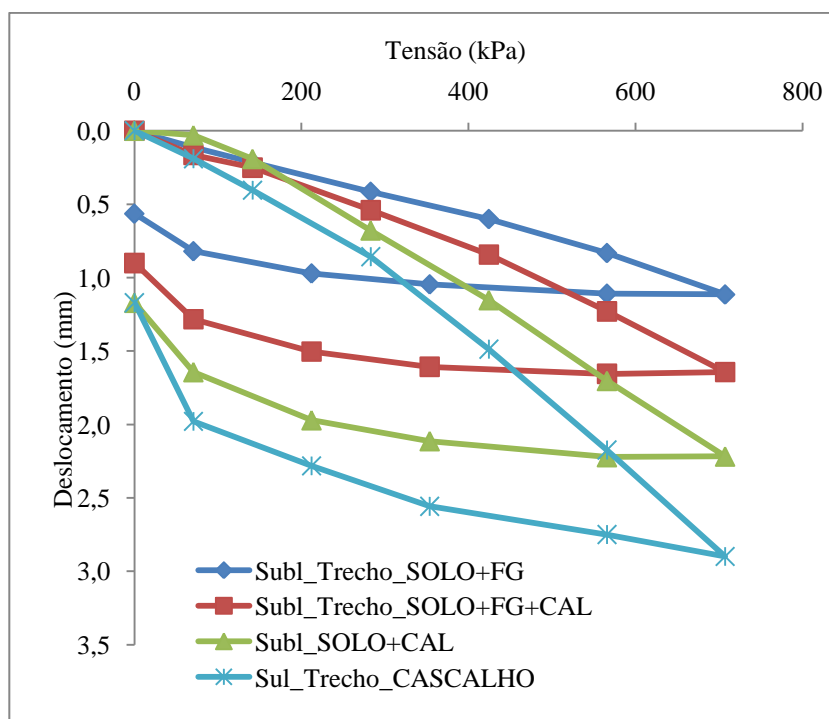


Figura 5.63 - Curvas tensões x deslocamentos médias para cada subtrecho do subleito.

b) Resultados obtidos para as bases

A Tabela 5.32 apresenta os valores obtidos para os parâmetros estudados em cada estaca. No subtrecho solo+fosfogesso nota-se valor de deslocamento elevado no bordo esquerdo. Isto é devido a grande chuva ocorrida na véspera e no dia da execução do ensaio além da tendência dessa mistura de reter muita água. A Figura 5.64 mostra o aspecto visual do subtrecho no dia da realização do ensaio. No eixo e no bordo esquerdo, os ensaios foram realizados no dia seguinte, com menos chuva. Consequentemente, observou-se nesse locais, deslocamentos menores quando comparados ao bordo esquerdo, embora ainda elevados.

A base com a mistura solo+fosfogesso+cal apresentou valores de D_{560kPa} semelhantes em todas estacas. Os deslocamentos obtidos nesses pontos podem ser considerados admissíveis para um pavimento novo. O subtrecho com solo+cal apresentou valores de deslocamentos parecidos no bordo esquerdo e no eixo. Já no bordo direito observou-se deslocamento maior, o que reflete problemas de compactação nesse bordo, uma vez que não houve interferência da chuva durante a realização do ensaio. No subtrecho de cascalho registou-se os menores deslocamentos, apesar da pequena chuva ocorrida no dia do ensaio. Isto confirma a menor sensibilidade dos materiais granulares aos efeitos da água.

Tabela 5.32 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa nas bases

BASE								
Estaca	Data	Posição	Subtrecho	D_{max} (mm)	D_{560kPa} (mm)	$D_{plástico}$ (mm)	$D_{elástico}$ (mm)	k_{placa} (MPa/m)
0+10	11/11/09	BE		8,96	6,44	6,93	2,03	88
1+10	12/11/09	EIXO	Solo-FG	2,89	2,28	2,14	0,75	248
2+10	12/11/09	BD		4,07	3,49	3,31	0,76	162
Dmédio				5,31	4,07	4,13	1,18	139
σ				2,63	1,75	2,04	0,60	-
3+10	05/11/09	BE	Solo-FG-Cal	2,62	2,19	2,30	0,32	258
4+10	04/11/09	EIXO		3,12	2,37	2,74	0,38	238
5+10	04/11/09	BD		3,21	2,52	1,22	1,98	224
Dmédio				2,98	2,36	2,09	0,89	239
σ				0,26	0,13	0,64	0,77	-
6+10	04/11/09	BE	Solo-Cal	2,64	2,06	1,46	1,18	275
7+10	04/11/09	EIXO		2,51	2,07	1,93	0,58	274
8+10	04/11/09	BD		3,68	2,81	2,36	1,32	201
Dmédio				2,95	2,31	1,92	1,03	245
σ				0,52	0,35	0,37	0,32	-

Continuação:

15+10	19/10/09	BE		2,06	1,64	1,35	0,71	345
16+10	19/10/09	EIXO	Cascalho	1,66	1,25	1,01	0,66	453
17+10	19/10/09	BD		2,26	1,76	1,32	0,94	322
		Dmédio		2,00	1,55	1,22	0,77	365
		σ		0,25	0,22	0,15	0,12	-

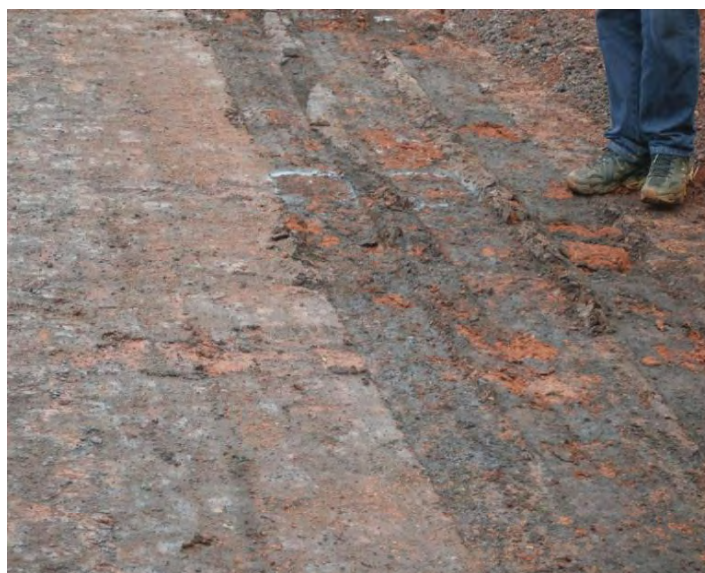


Figura 5.64 - Aspecto visual da base com solo e fosfogesso nos dias dos ensaios de prova de carga.

As Figuras 5.65 e 5.66 mostram as curvas tensão x deslocamento obtidas para cada subtrecho. Na Figura 5.67 estão apresentadas as curvas médias por subtrecho. Dessas curvas, observa-se ainda um comportamento quase linear durante o carregamento enquanto no descarregamento o comportamento apresentado é totalmente não linear. Nota-se também que a grande parte dos deslocamentos não foi recuperada, sugerindo que durante o carregamento houve principalmente consolidação dos materiais, sendo esta caracterizada pela rearranjo das partículas e diminuição do índice de vazios.

De forma geral, observa-se que a mistura solo+fosfogesso apresentou o pior comportamento enquanto o melhor foi registrado com o cascalho. Com base nas semelhanças de comportamento observadas entre as misturas solo+fosfogesso+cal e solo+cal, pode-se deduzir que a presença da cal nas misturas ajuda quanto a influência da água.

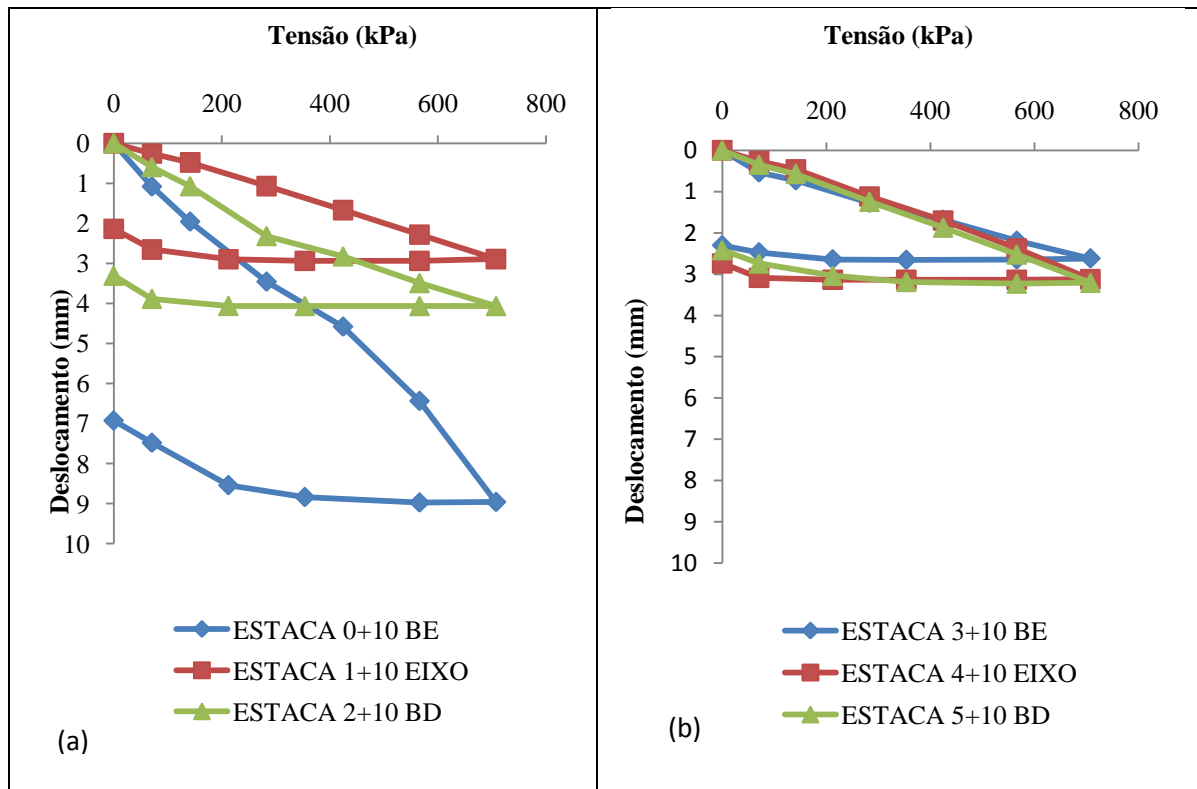


Figura 5.65 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre as bases (a)solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal.

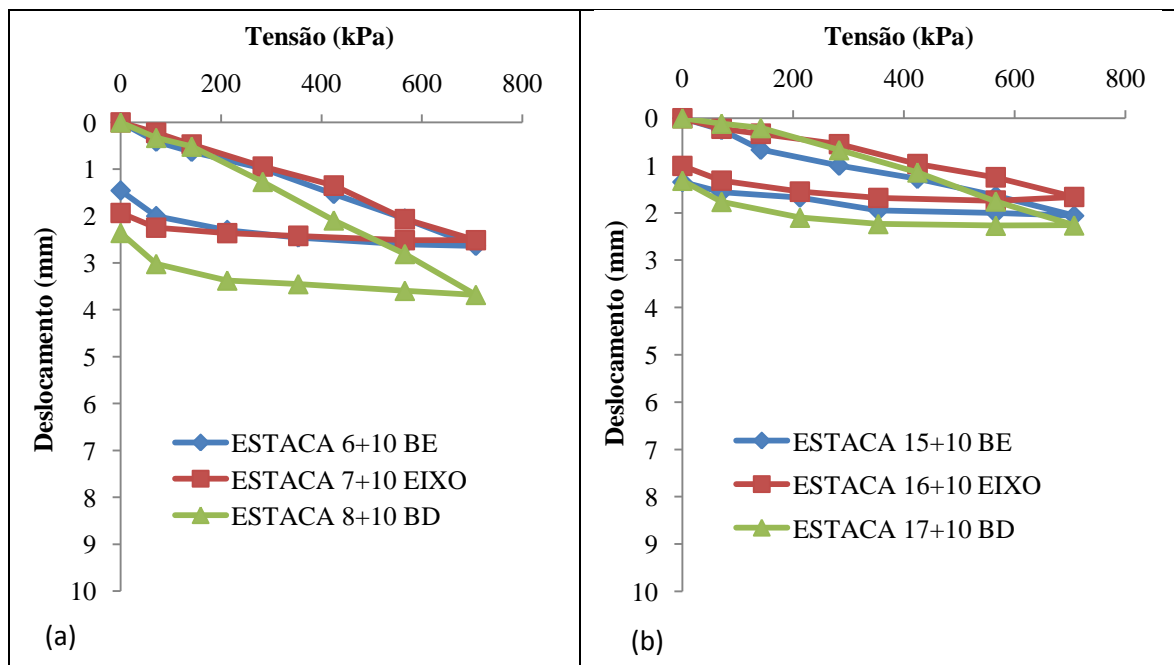


Figura 5.66 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre as bases (a)solo+cal (b) cascalho.

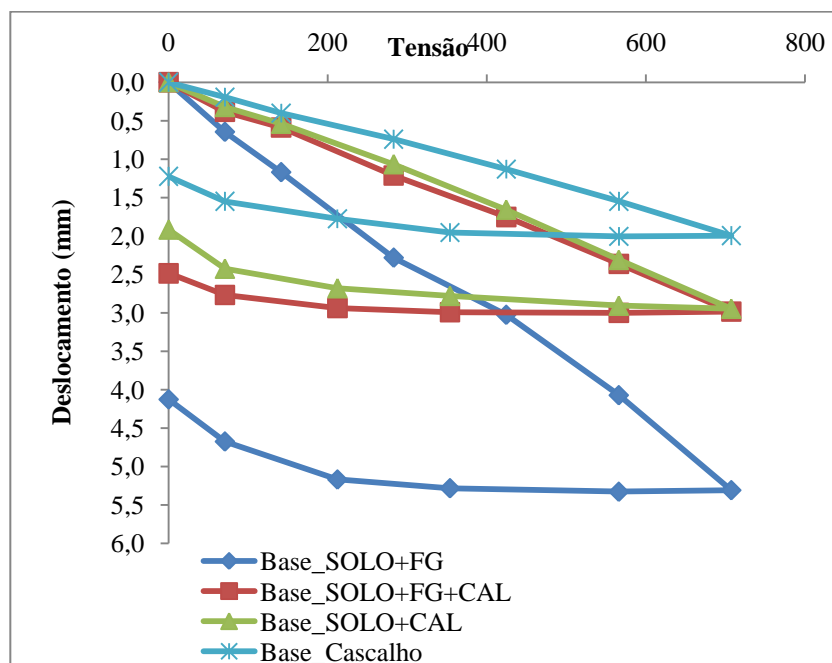


Figura 5.67 - Curvas tensões x deslocamentos médias para cada base.

c) Resultados obtidos para o revestimento

A Tabela 5.33 apresenta os valores obtidos para os parâmetros estudados em cada estaca logo após a execução do revestimento. Constata-se o ganho estrutural com a execução do revestimento, pois foram medidos deslocamentos menores que nos ensaios realizados sobre a base. Porém, no subtrecho solo+fosfogesso ainda foram notados os valores de recalques mais elevados. Os subtrechos solo+fosfogesso+cal e solo+cal apresentaram deformações semelhantes. Nesses subtrechos, os maiores deslocamentos foram observados no bordo esquerdo. O subtrecho com cascalho apresentou as menores deformações.

Ressalta-se que os ensaios sobre o revestimento foram executados depois uma semana chuvosa como confirmado pela Tabela 5.18. Além disso, o sistema de drenagem ainda não havia sido executado. Dessa forma, não existia controle da infiltração da água pelas laterais da via o que explica os deslocamentos geralmente elevados nos bordos.

As Figuras 5.68 e 5.69 mostram as curvas tensão x deslocamento obtidas para cada subtrecho. Na Figura 5.70 estão apresentadas as curvas médias por subtrecho.

Tabela 5.33 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa sobre o revestimento

REVESTIMENTO								
Estaca	Data	Posição	Subtrecho	D _{max} (mm)	D _{560kPa} (mm)	D _{plástico} (mm)	D _{elástico} (mm)	k _{placa} (MPa/m)
0+10	16/11/09	BE	Solo- Fosfogesso	2,42	2,36	1,70	0,72	240
1+10	16/11/09	EIXO		2,31	1,97	1,99	0,32	287
2+10	16/11/09	BD		4,07	3,49	3,31	0,76	162
D_{médio}				2,93	2,61	2,33	0,60	217
σ				0,80	0,65	0,70	0,20	-
3+10	17/11/09	BE	Solo- Fosfogesso- Cal	2,87	2,54	1,76	1,11	223
4+10	17/11/09	EIXO		1,33	1,03	0,56	0,77	548
5+10	17/11/09	BD		1,03	0,80	0,44	0,60	710
D_{médio}				1,74	1,46	0,92	0,83	388
σ				0,81	0,77	0,59	0,21	-
6+10	17/11/09	BE	Solo-Cal	2,39	1,92	1,26	1,14	294
7+10	17/11/09	EIXO		1,53	1,17	1,11	0,42	482
8+10	18/11/09	BD		1,05	0,87	0,41	0,64	653
D_{médio}				1,66	1,32	0,93	0,73	428
σ				0,55	0,44	0,37	0,30	-
15+10	19/11/09	BE	Cascalho	1,37	1,16	0,56	0,81	488
16+10	20/11/09	EIXO		1,50	1,06	0,87	0,63	534
17+10	20/11/09	BD		1,25	1,08	0,53	0,72	524
D_{médio}				1,37	1,10	0,65	0,72	514
σ				0,10	0,04	0,16	0,07	-

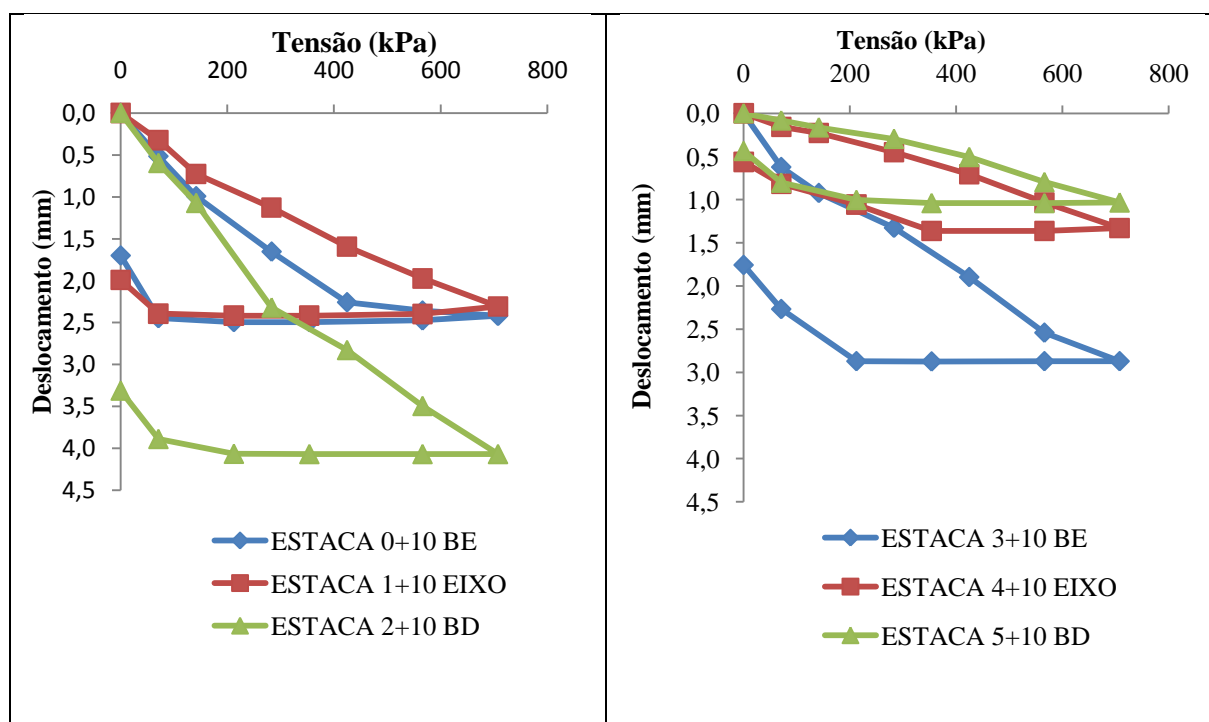


Figura 5.68 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento

(a)solo+fosfogesso (b) solo+fosfogesso+cal.

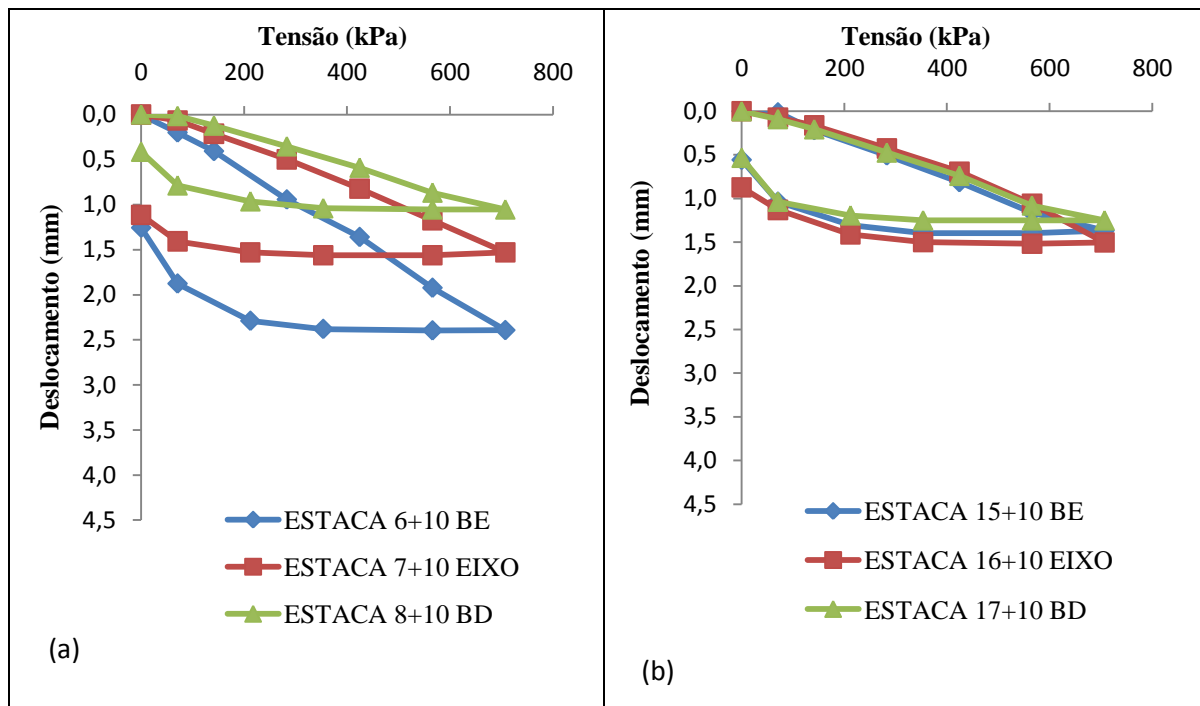


Figura 5.69 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento (a)solo+cal (b) cascalho.

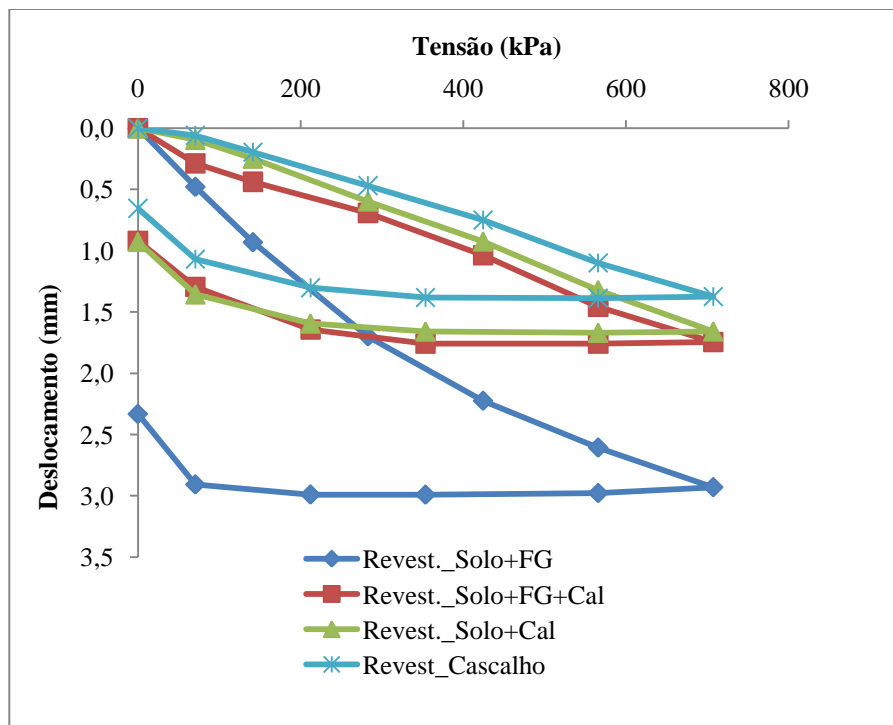


Figura 5.70 - Curvas Tensão x Deslocamento médias obtidas para o revestimento

Na Tabela 5.34 estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros estudados em cada estaca, na segunda etapa de ensaios realizados sobre o revestimento. Ressalta-se que os ensaios dessa etapa foram realizados durante o mês de maio e que não foi registradas

nenhuma precipitação nesse período. Além disso, na via já havia sistemas de drenagem constituídos por sajetas e meio-fio.

No subtrecho de solo + fosfogesso foi observado deslocamento elevado no bordo esquerdo em comparação com as demais estacas, mas em geral os deslocamentos medidos foram pequenos. As mesmas observações foram feitas no subtrecho solo+fosgesso+cal. Quanto aos subtrechos solo+cal e cascalho nota-se comportamento homogêneo entre estacas e pequenos deslocamentos.

Comparando os diferentes sub-trechos, nota-se que estes apresentaram comportamentos semelhantes com destaque para a base da mistura solo+cal.

As Figuras 5.71 e 5.72 mostram as curvas tensão x deslocamento obtidas para cada subtrecho. Na Figura 5.73 estão apresentadas as curvas médias por subtrecho.

Tabela 5.34 - Parâmetros obtidos para os ensaios de prova de carga sobre placa sobre o revestimento na segunda etapa.

REVESTIMENTO (2a ETAPA)								
Estaca	Data	Posição	Subtrecho	D_{max} (mm)	D_{560kPa} (mm)	$D_{plástico}$ (mm)	$D_{elástico}$ (mm)	k_{placa} (MPa/m)
0+10	28/05/10	BE	Solo-	2,19	1,83	1,22	0,97	309
1+10	28/05/10	EIXO	Fosgogesso	1,52	1,33	0,80	0,71	424
2+10	28/05/10	BD		1,10	0,82	0,52	0,59	693
<i>Dmédio</i>				1,60	1,33	0,85	0,76	427
<i>σ</i>				0,45	0,41	0,29	0,16	-
3+10	27/05/10	BE	Solo-	1,85	1,63	1,01	0,84	346
4+10	27/05/10	EIXO	Fosgogesso-	0,94	0,78	0,39	0,54	725
5+10	27/05/10	BD	Cal	1,24	1,01	0,63	0,61	562
<i>Dmédio</i>				1,34	1,14	0,68	0,66	496
<i>σ</i>				0,38	0,36	0,25	0,13	-
6+10	27/05/10	BE	Solo-Cal	1,07	0,83	0,37	0,70	679
7+10	27/05/10	EIXO		1,00	0,85	0,66	0,34	663
8+10	26/05/10	BD		0,96	0,74	0,50	0,46	765
<i>Dmédio</i>				1,01	0,81	0,51	0,50	700
<i>σ</i>				0,05	0,05	0,12	0,15	-
15+10	25/05/10	BE	Cascalho	1,29	0,99	0,54	0,74	570
16+10	25/05/10	EIXO		1,49	1,32	0,94	0,55	428
17+10	25/05/10	BD		1,52	1,31	0,83	0,70	432
<i>Dmédio</i>				1,43	1,21	0,77	0,66	468
<i>σ</i>				0,10	0,15	0,17	0,08	-

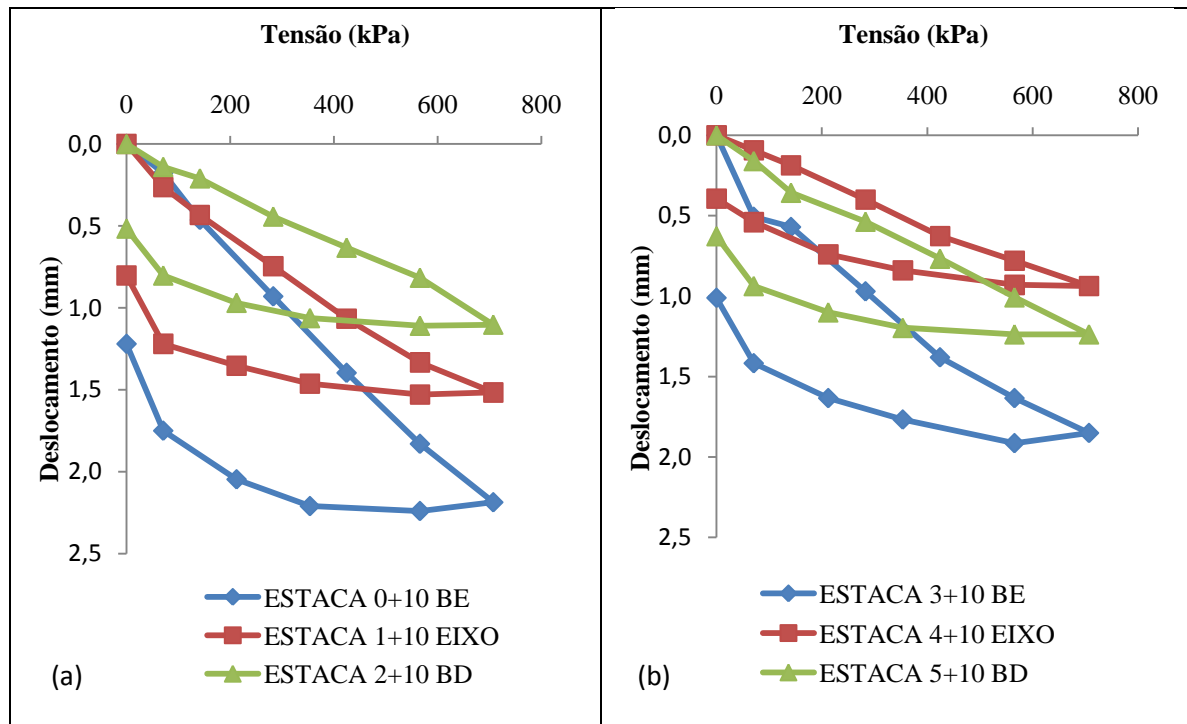


Figura 5.71- Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento na segunda etapa nos subtrechos solo+fosfogesso (a) e solo+fosfogesso+cal (b)

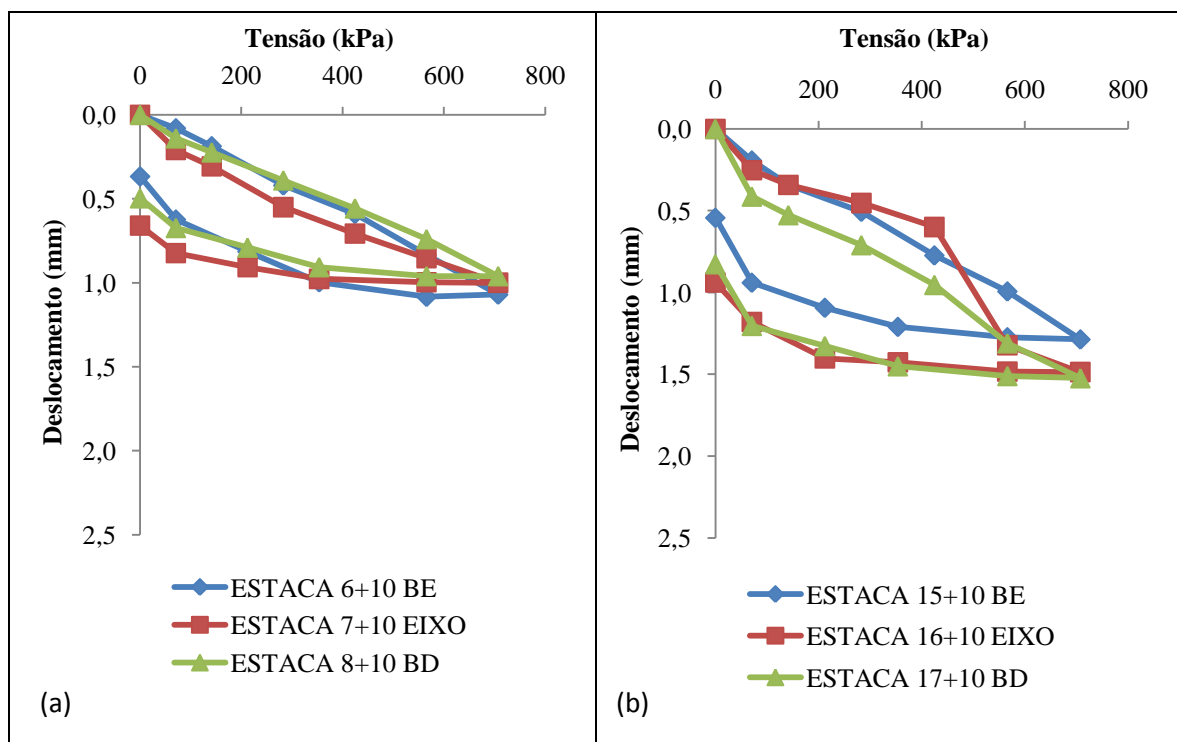


Figura 5.72 - Curvas tensão x deslocamento obtidas no ensaio de prova de carga sobre o revestimento na segunda etapa nos subtrechos solo+cal (a) e cascalho (b).

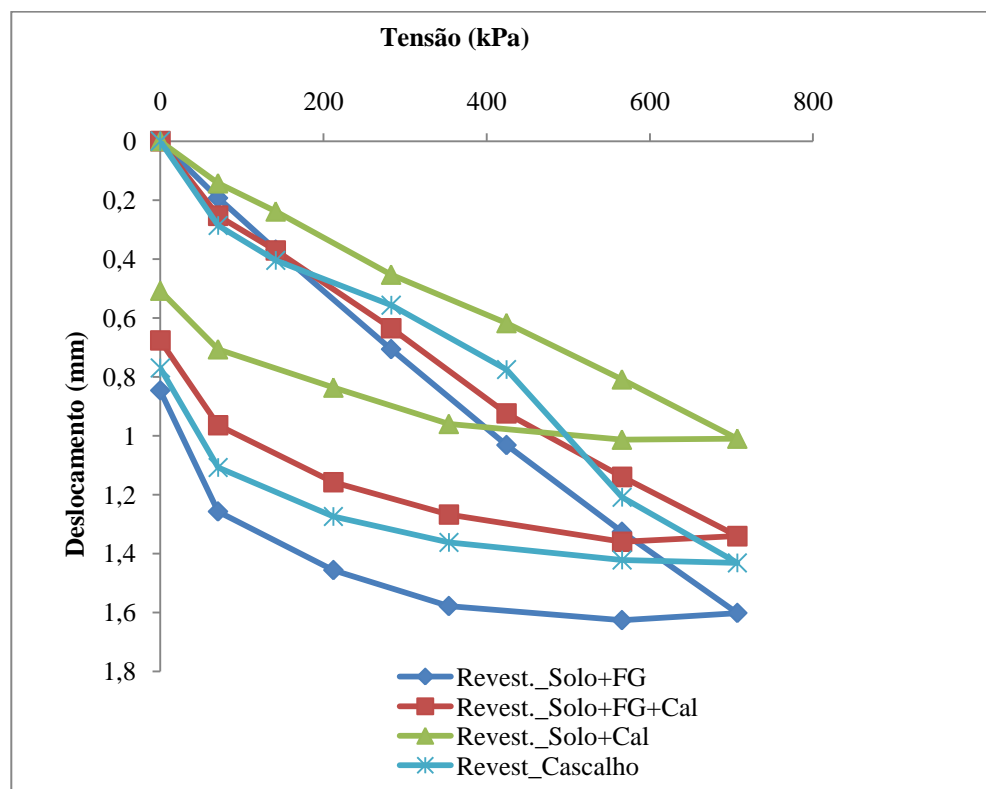


Figura 5.73 - Curvas Tensão x Deslocamento médias obtidas para o revestimento na segunda etapa

5.4.4 Penetrômetro dinâmico de cone (DCP)

A Tabela 5.35 apresenta os valores dos índices de penetração obtidos com o DCP executado no subleito. Nas Figuras 5.74 a 5.77 tem-se as curvas de penetração obtidas para cada subtrecho.

A execução do ensaio no subleito mostrou uma variação de comportamento de materiais depois de uma profundidade média de 18 cm. Assim, foram utilizadas as denominações de subleito 1 para a parte mais superficial e subleito 2 para a mais profunda. Os menores valores de DN determinados para o subleito 1 representam a camada que foi regularizada e compactada enquanto os valores elevados correspondem ao subleito natural. Ressalta-se que os ensaios executados no subleito entre as estacas 0+00 e 9+00 foram realizados um pouco mais de uma semana depois das chuvas. Já entre as estacas 15+00 e 18+00, registrou-se chuva nos dias anteriores a execução dos ensaios. Entretanto, observa-se valores menores de DN no subleito do subtrecho de cascalho. Isto pode ser atribuído à compactação complementar desse subtrecho devida às passagens das máquinas pesadas, ocorridas entre os ensaios.

Tabela 5.35 – Índices de penetração obtidos no subleito.

Estaca	Data	Subtrecho	DN (mm/golpe)	
			Subleito1	Subleito 2
0+10	16/10/09		6	19
1+10	16/10/09	Solo+Fosfogesso	2	5
2+10	16/10/09		4	12
3+10	16/10/09		3	9
4+10	16/10/09	Solo+Fosfogesso +Cal	7	11
5+10	16/10/09		4	11
6+10	16/10/09		6	14
7+10	16/10/09	Solo+Cal	8	14
8+10	16/10/09		6	17
15+10	22/10/09		5	16
16+10	22/10/09	Cascalho	5	10
17+10	22/10/09		5	13

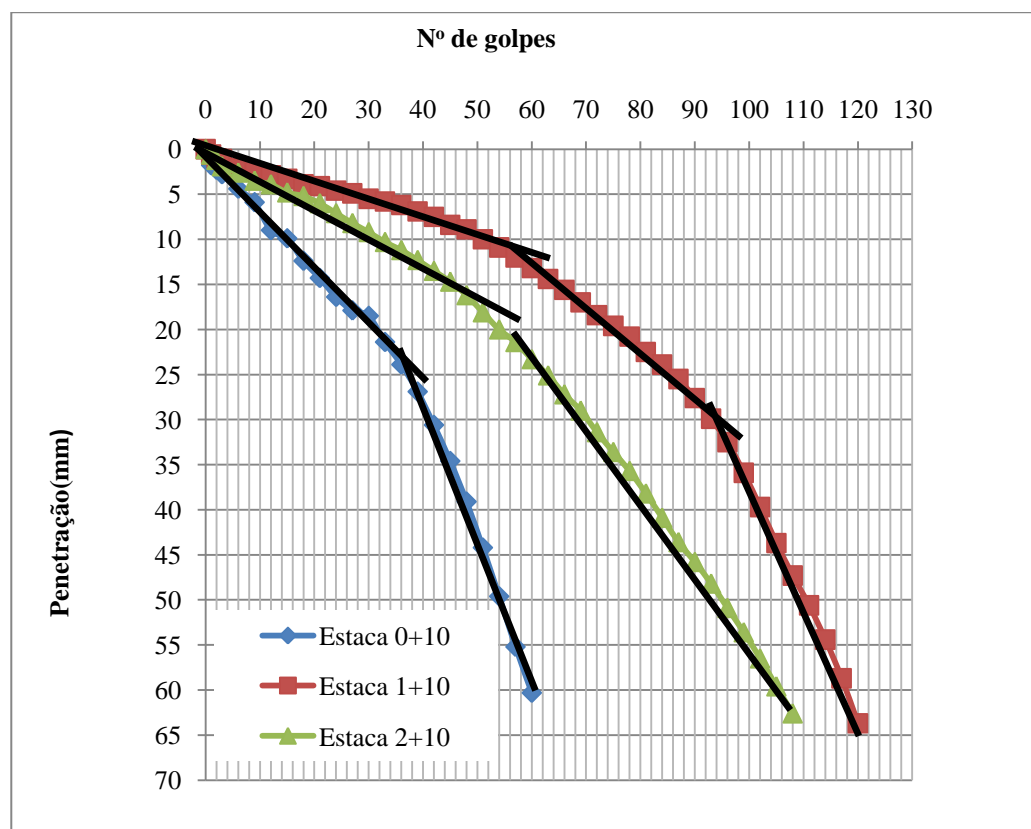


Figura 5.74 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+fosfogesso.

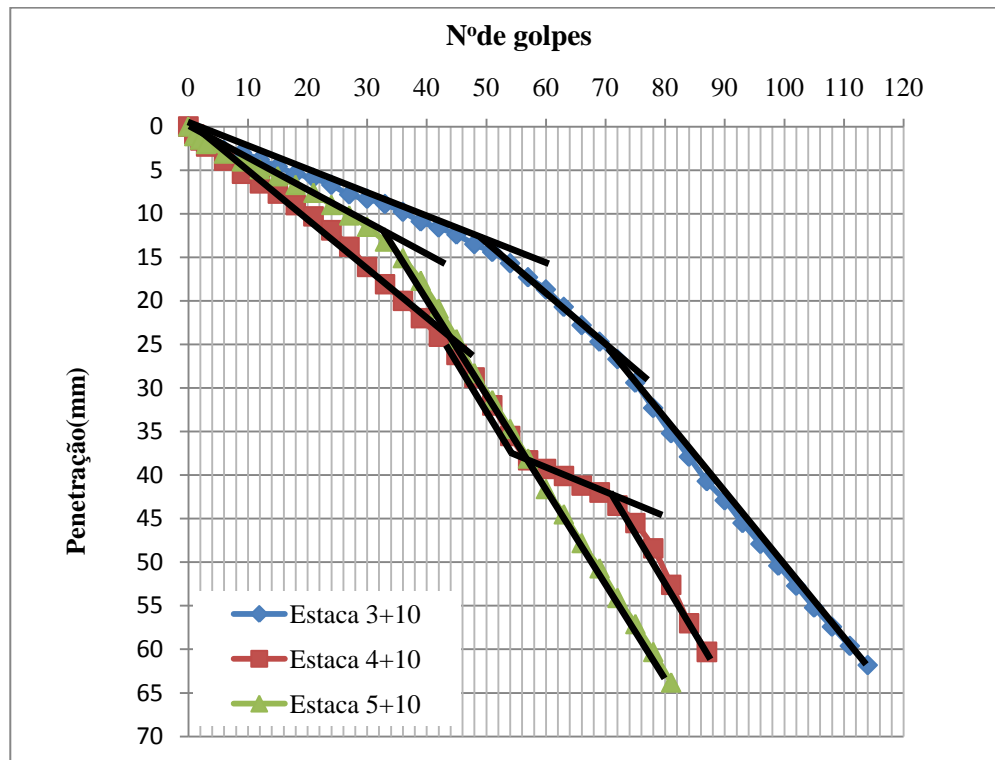


Figura 5.75 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+fosfogesso+cal.

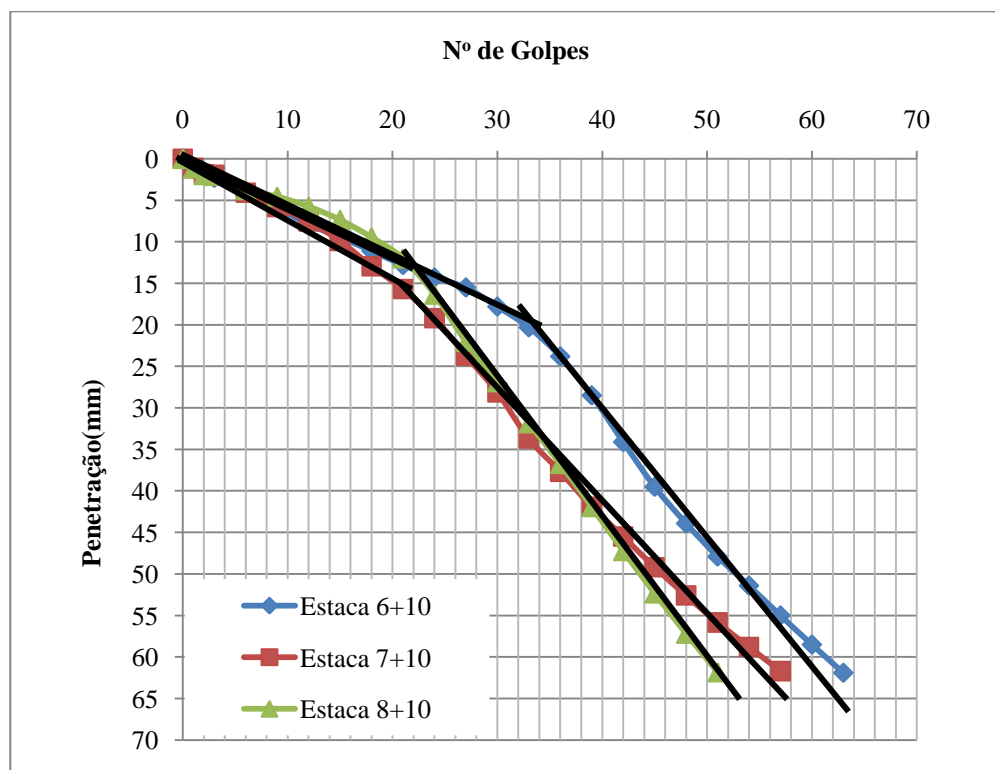


Figura 5.76 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho solo+cal.

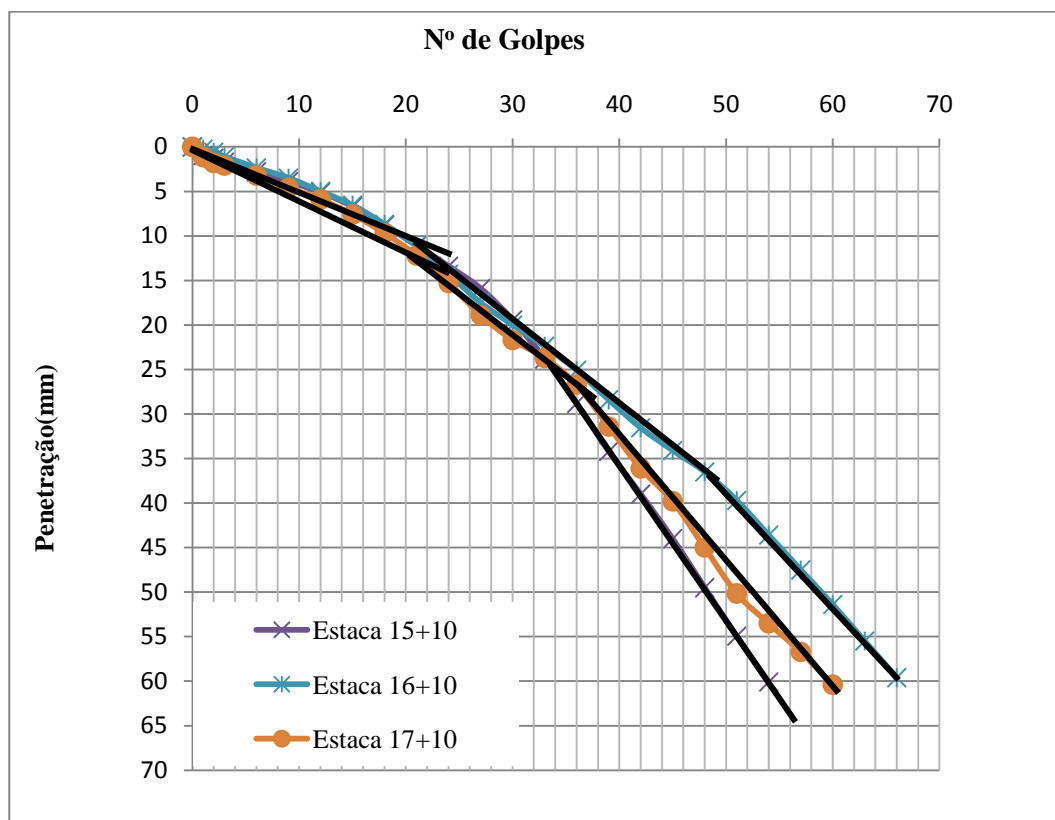


Figura 5.77 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado no subleito do subtrecho cascalho.

A Tabela 5.36 apresenta os valores dos índices de penetração obtidos com o ensaio DCP executado nas bases. Nas Figuras 5.78 a 5.81 tem-se as curvas de penetração obtidas para cada subtrecho.

Conforme indicado na Tabela 5.19, os ensaios realizados nos subtrechos solo+fosfogesso, solo+fosfogesso+cal e solo+cal foram executados dois dias depois de chover. Observa-se valores de DN muito elevados no subtrecho solo+fosfogesso e em particular nos seus bordos esquerdo e direito. Já nas demais misturas, como observado como os ensaios anteriores, a presença da cal parece reduzir significativamente o efeito prejudicial da água. Na base com cascalho, devido a processos executivos, foi possível realizar o ensaio apenas na estaca 15+10. Por esse motivo, não foi possível avaliar com eficiência o comportamento da base com cascalho nessa etapa.

Tabela 5.36 – Índices de penetração obtidos nas bases.

Estaca	Data	Subtrecho	DN (mm/golpe)
0+10	7/11/09		12
1+10	7/11/09	Solo+Fosfogesso	8
2+10	7/11/09		17
3+10	7/11/09		5
4+10	7/11/09	Solo+Fosfogesso +Cal	5
5+10	7/11/09		5
6+10	7/11/09		5
7+10	7/11/09	Solo+Cal	3
8+10	7/11/09		5
15+10	15/11/09		7
16+10	-	Cascalho	-
17+10	-		-

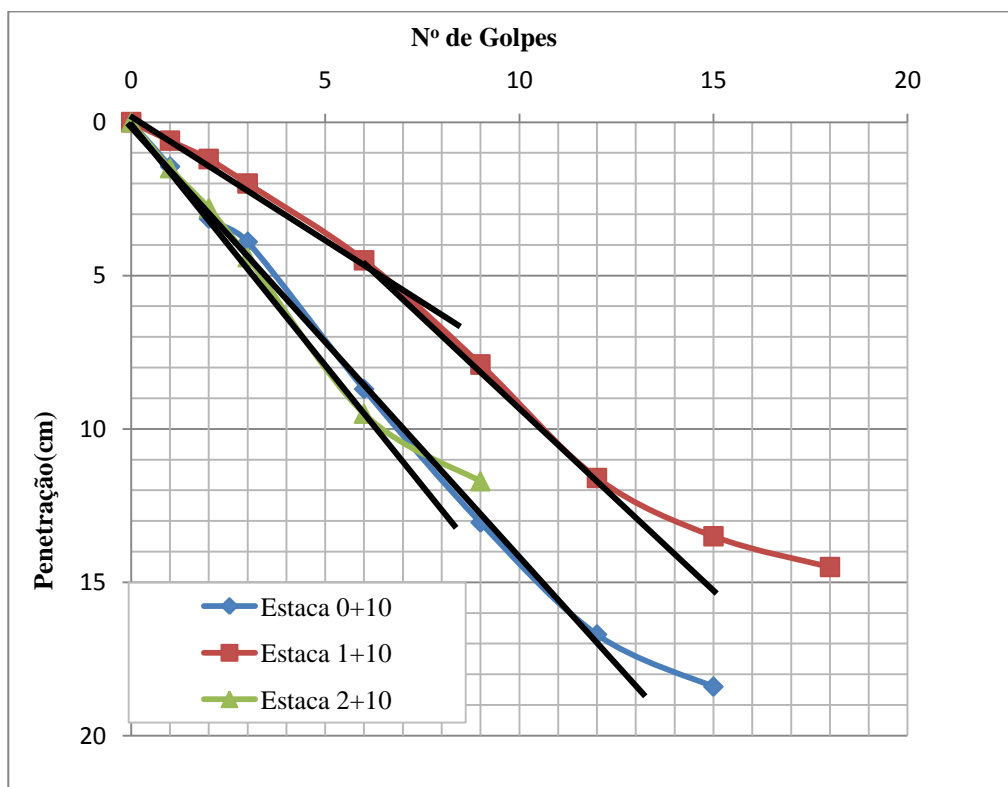


Figura 5.78 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso.

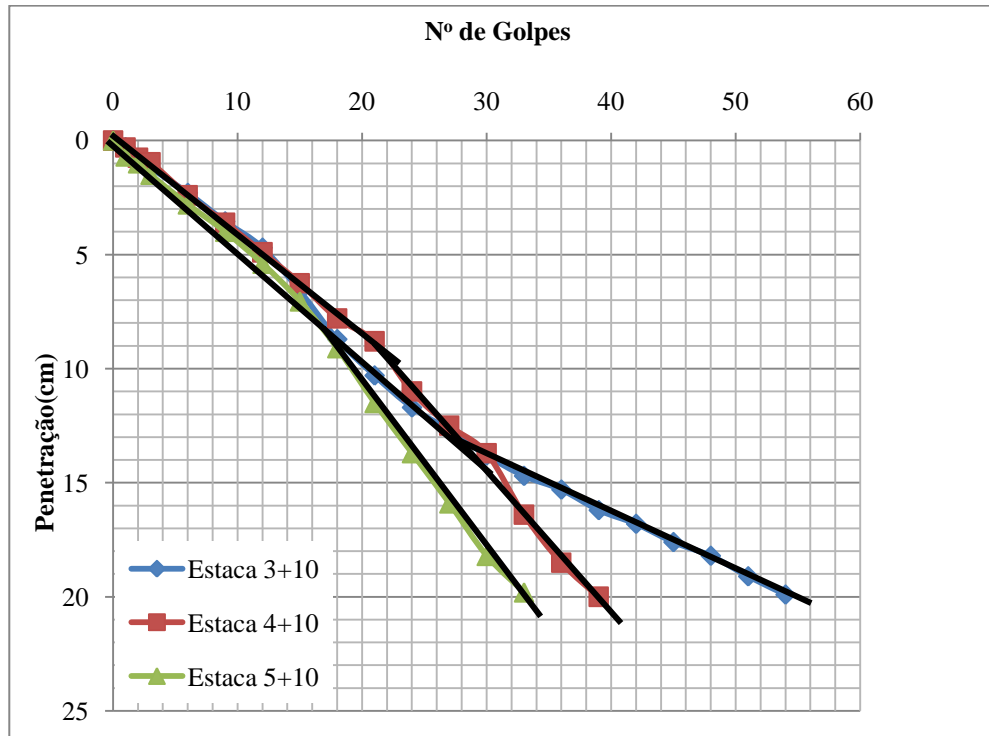


Figura 5.79 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso+cal.

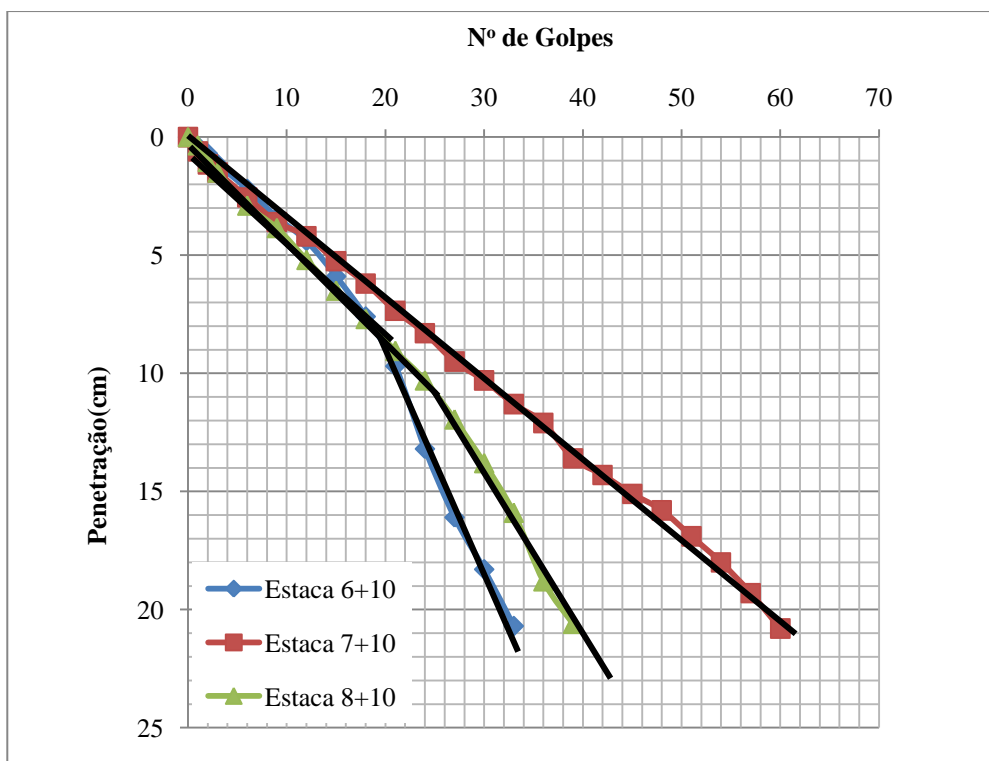


Figura 5.80 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+cal.

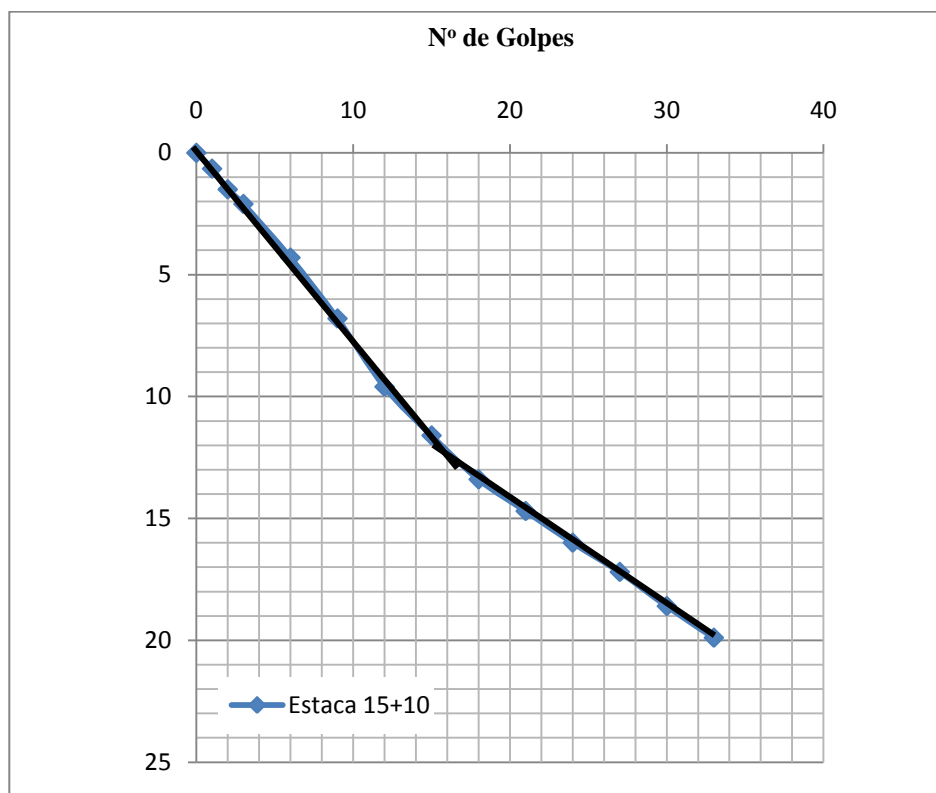


Figura 5.81 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de cascalho.

Na Tabela 5.37 tem-se os valores médios de índices de penetração obtidos para os subleitos 1 e 2 e para as bases. A Tabela 5.38 apresenta as relações entre DN médios das amadas estudadas.

Tabela 5.37 Valores dos índices de penetração média obtidos com o DCP para o subleito e as camadas de base

Subtrecho	DN _{med} (mm/golpe)		
	Subleito 1	Subleito 2	Bases
Solo-Fosfogesso	4	12	12
Solo-Fosfogesso-Cal	4	10	5
Solo-Cal	7	15	4
Cascalho	5	13	7

Tabela 5.38 Relação entre os índices de penetração das bases e dos subleitos.

Subtrecho	Base/Sub.1	Base/Sub.2	Sub.1/Sub.2
Solo-Fosfogesso	3,2	1,0	0,3
Solo-Fosfogesso-Cal	1,1	0,5	0,4
Solo-Cal	0,7	0,3	0,4
Cascalho	1,2	0,5	0,5

Observa-se que as misturas solo-fosfogesso-cal e solo-cal mostraram um melhor comportamento. A mistura solo-fosfogesso apresentou maior índice DN, atingindo níveis de resistência observados para o subleito 2, o que significaria num material de menor resistência. Este fato gerou maior valor na razão entre o DN da base e dos subleitos conforme ilustrado na Tabela 5.38.

Os resultados obtidos com o ensaio DCP na segunda etapa estão apresentados na Tabela 5.39 e a Tabela 5.40 mostra os valores médios de DN para o subleito e as bases, assim como a relação entre esses parâmetros. Ressalta-se que os ensaios foram realizados durante a estação seca. Observa-se redução dos valores DN para todas as estacas o que sugere uma estabilização dos materiais. Porém, ainda foi no subtrecho solo+fosfogesso que foram registrados os índices de penetração mais elevados. Nas Figuras 5.82 a 5.85 tem-se as curvas de penetração obtidas para cada subtrecho.

Tabela 5.39 – Índices de penetração obtidos na segunda etapa.

Estaca	Data	Subtrecho	DN (mm/golpe)	
			Subleito	Base
0+10	28/05/10		10	10
1+10	28/05/10	Solo+Fosfogesso	11	7
2+10	28/05/10		3	8
3+10	28/05/10		4	6
4+10	28/05/10	Solo+Fosfogesso +Cal	4	3
5+10	28/05/10		14	7
6+10	28/05/10		1	1
7+10	28/05/10	Solo+Cal	5	4
8+10	28/05/10		5	4
15+10	26/05/10		3	2
16+10	26/05/10	Cascalho	3	3
17+10	26/05/10		9	6

Tabela 5.40 – Valores médios de DN das bases e relação aos do subleito.

Subtrecho	DN _{med} (mm/golpe)		
	Subleito	Bases	Base/Subleito
Solo-Fosfogesso	8	8	1,00
Solo-Fosfogesso-Cal	7	5	0,71
Solo-Cal	4	3	0,75
Cascalho	5	4	0,8

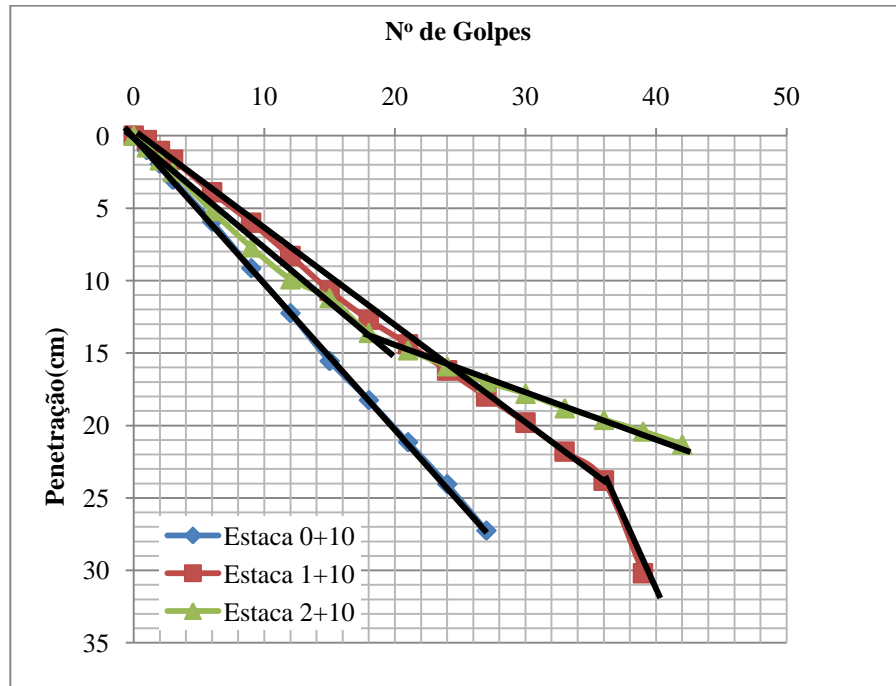


Figura 5.82 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso durante a segunda etapa.

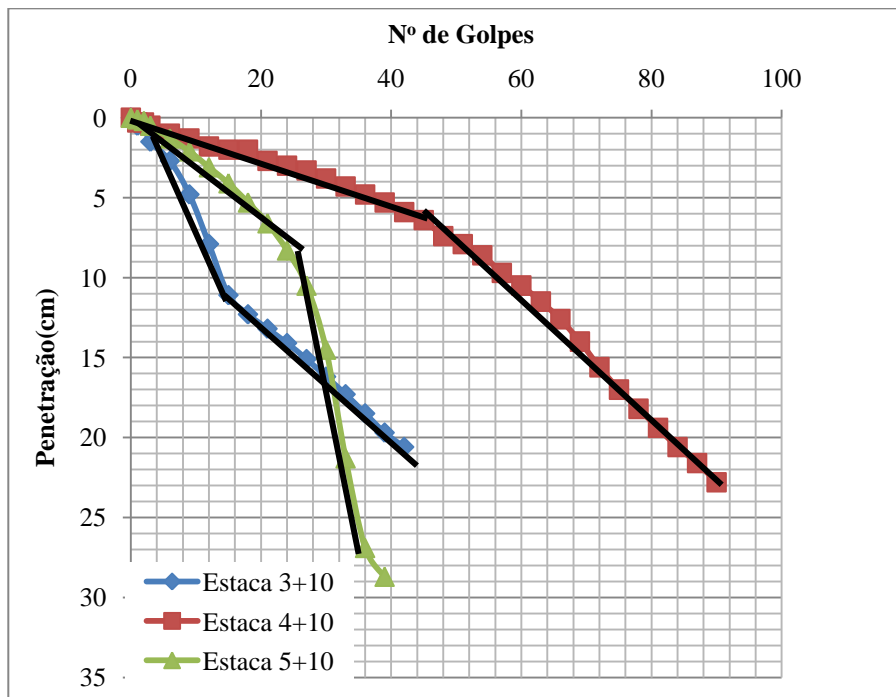


Figura 5.83– Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+fosfogesso+cal durante a segunda etapa.

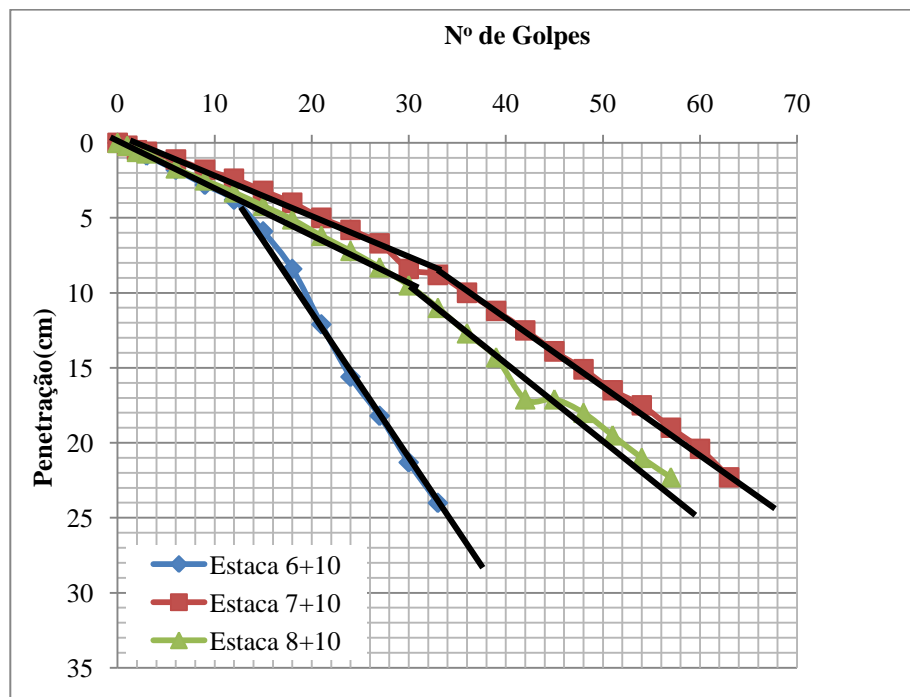


Figura 5.84 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de solo+cal durante a segunda etapa.

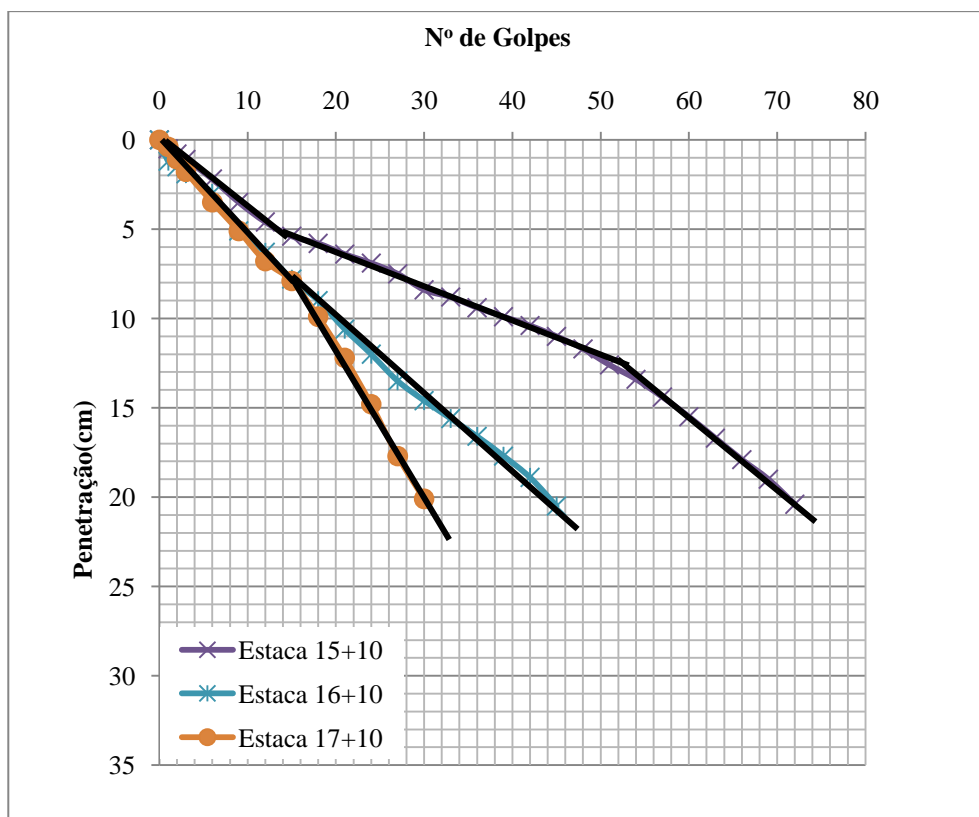


Figura 5.85 – Curvas de penetração obtidas com o ensaio DCP realizado na base de cascalho durante a segunda etapa.

5.4.5 Análise da expansão por difração de Raios-X

No item 6.2 do Capítulo 4 relatou-se a expansão de materiais nos bordos assim como nas zonas de transição do subtrecho solo+fosfogesso+cal. Nesses pontos, foram retiradas amostras e estas foram submetidas ao ensaio de difração de Raios-X para verificar suas composições mineralógicas. O resultado obtido dessa análise mostra que houve formação da etringita ao misturar os três materiais com água. Esse mineral é conhecido pelo seu caráter expansivo e pode ser considerado responsável das expansões observadas em campo. Ressalta-se que essa expansão já havia sido detectada em laboratório, porém como isso foi num nível menor do que os valores obtidos por Rufo(2009), arriscou-se aplicar essa mistura em campo. A Figura 5.86 mostra o difratograma obtido da análise dessas amostras.

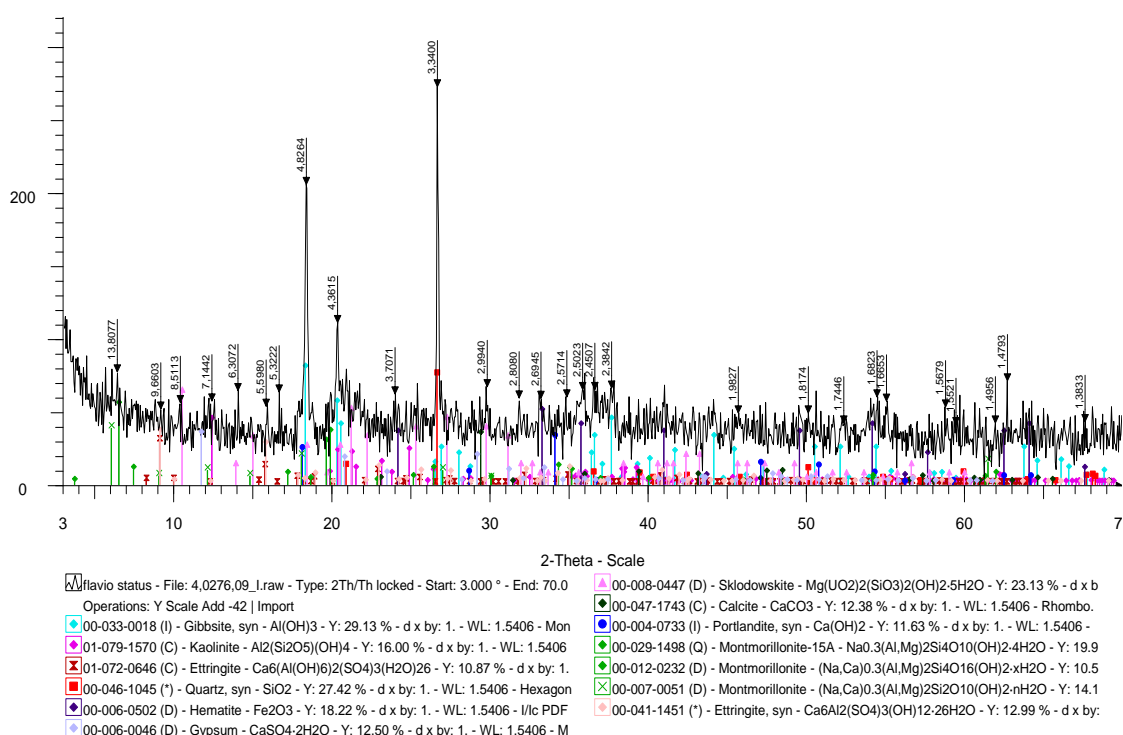


Figura 5.86 – Difratograma da amostra Solo–Fosfogesso-Cal retirada em campo

5.4.6 Ensaios radiométricos no fosfogesso

Como especificado no Capítulo 4, antes do seu descarregamento assim como após o seu depósito, o fosfogesso foi submetido a medições radiométricas para verificar se esse material apresenta algum risco ao meio ambiente e à população. Medições similares foram efetuadas nos trechos onde o fosfogesso foi utilizado como constituinte de material de base e num

trecho sem fosfogesso para servir de comparação. Os resultados detalhados dessas medições estão apresentados a seguir.

a) Antes e após o descarregamento do fosfogesso

Os resultados das medições radiométricas realizadas sobre o fosfogesso antes e depois seu descarregamento constam no Relatório Técnico SPR 002/2010 do Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO) e estão apresentados nas Tabelas 5.41 a 5.43.

Com os dados obtidos conclui-se que os valores de taxa de dose encontrados não oferecem riscos adicionais sob o ponto de vista de radioproteção aos motoristas, operadores, alunos e professores da Universidade Federal de Goiás envolvido no projeto. Ressalta-se ainda que as regulamentações de transporte de materiais perigosos e de transporte de materiais radioativos vigentes no Brasil (DECRETO N° 96.044, DE 18 DE MAIO DE 1998 e RESOLUÇÃO N° 1.644, DE 26 DE SETEMBRO DE 2006 do Ministério dos Transportes do Brasil e também a Norma “Transporte de Materiais Radioativos” Resolução CNEN – 01/88, Publicação D.O.U. de 01/08/88), menciona que o material monitorado e analisado, o fosfogesso, não possui concentrações suficientes de minerais radioativos (dose equivalente anual superior a 5mSv/ano) para ser classificado como material perigoso ou material radioativo, portanto, não deve ser regido por tais regulamentações.

Tabela 5.41- Taxa de exposição medida no primeiro caminhão (23t).

Ponto	Taxa Exposição $\mu\text{Sv/h}$	
	A 5cm da superfície	A 2m da superfície
Lateral direita	0,22	0,08
Lateral direita	0,20	0,07
Lateral direita	0,18	0,06
Tampa traseira	0,30	0,06
Lateral esquerda	0,24	0,07
Lateral esquerda	0,20	0,06
Lateral esquerda	0,22	0,07
Dentro da cabine do caminhão – sobre o banco do motorista	0,06	

Tabela 5.42 - Taxa de exposição medida no segundo caminhão (23t)

Ponto	Taxa Exposição $\mu\text{Sv/h}$	
	A 5cm da superfície	A 2m da superfície
Lateral direita	0,22	0,08
Lateral direita	0,21	0,06
Lateral direita	0,20	0,06
Tampa traseira	0,30	0,06
Lateral esquerda	0,24	0,08
Lateral esquerda	0,22	0,06
Lateral esquerda	0,22	0,07
Dentro da cabine do caminhão – sobre o banco do motorista	0,06	

Tabela 5.43- Taxa de exposição medida após descarregamento do fosfogesso

Pontos de medidas	Taxa Exposição $\mu\text{Sv/h}$	
	Primeiro monte	Segundo monte
01	0,12	0,14
02	0,14	0,14
03	0,16	0,12
04	0,10	0,14
05	0,12	0,16
06	0,14	0,10
07	0,14	0,12
08	0,12	0,14
09	0,14	0,14
10	0,16	0,12

Obs. As taxas de dose foram obtidas a uma distancia de 5 (cinco) cm da superfície do material.

b) Medições radiométricas do fosfogesso aplicado nos subtrechos

Os resultados das medições realizadas nas camadas de base compactadas compostas de misturas com fosfogesso constam no Relatório Técnico SPR 003/2010 do CRCN-CO e estão apresentados nas Tabelas 5.44 a 5.46.

Constatou-se que os resultados obtidos no trecho que recebeu 20% de fosfogesso apresentaram uma variação de taxa de dose entre 0,08 e 0,13 $\mu\text{Sv/h}$, enquanto que no trecho com 11% de fosfogesso os resultados variam entre 0,06 e 0,09 $\mu\text{Sv/h}$. Já no trecho sem uso de fosfogesso, os resultados encontrados equivalem a radiação de fundo (background) existente

no local devido às fontes de radiação ionizantes naturais e apresentaram uma flutuação estatística de 0,04 a 0,08 $\mu\text{Sv/h}$.

Tabela 5.44 – Taxa de exposição medida no trecho de pavimento com o uso de 20% de fosfogesso

Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$
1	0,08	9	0,10	17	0,11	25	0,10
2	0,12	10	0,13	18	0,10	26	0,13
3	0,12	11	0,13	19	0,10	27	0,09
4	0,11	12	0,10	20	0,12	28	0,11
5	0,09	13	0,10	21	0,12	29	0,09
6	0,13	14	0,10	22	0,11	30	0,10
7	0,12	15	0,09	23	0,08	31	0,12
8	0,10	16	0,11	24	0,10	32	0,12

Tabela 5.45 – Taxa de exposição realizada no trecho de pavimento com o uso de 11% de fosfogesso

Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$
1	0,07	9	0,07	17	0,09	25	0,08
2	0,08	10	0,08	18	0,09	26	0,06
3	0,09	11	0,08	19	0,06	27	0,07
4	0,09	12	0,08	20	0,07	28	0,09
5	0,08	13	0,06	21	0,07	29	0,09
6	0,09	14	0,08	22	0,06	30	0,07
7	0,08	15	0,06	23	0,07	31	0,09
8	0,09	16	0,08	24	0,07	32	0,09

Tabela 5.46 – Taxa de exposição realizada no trecho de pavimento sem o uso de fosfogesso

Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$	Ponto	Taxa $\mu\text{Sv/h}$
1	0,06	9	0,07	17	0,06
2	0,06	10	0,05	18	0,06
3	0,04	11	0,08	19	0,05
4	0,06	12	0,06	20	0,07
5	0,05	13	0,06	21	0,06
6	0,06	14	0,05	22	0,06
7	0,05	15	0,07	23	0,07
8	0,06	16	0,05	24	0,08

Observa-se que apesar das taxas de dose encontradas nos trechos com 20% e 11% de fosfogesso terem sido um pouco superiores comparadas com aquelas encontradas no trecho que não recebeu o fosfogesso (Solo-Cal), a pequena diferença observada não é suficiente para exceder a dose anual para população descrita na Norma CNEN NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Sendo assim, o uso do fosfogesso em camadas de pavimento não oferece nenhum risco adicional ao meio ambiente e à população.