

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

**INVESTIGAÇÃO DE JAZIDAS DE SOLOS
TROPICAIS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO
NA REGIÃO METROPOLITANA DE
GOIÂNIA - GO**

RITA DE CÁSSIA SILVA

GOIÂNIA
2010

RITA DE CÁSSIA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DE JAZIDAS DE SOLOS
TROPICAIS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO
NA REGIÃO METROPOLITANA DE
GOIÂNIA - GO**

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

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia de Araújo Romão

Co-orientadora: Profa. Dra. Lilian Ribeiro de Rezende

GOIÂNIA
2010



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

“INVESTIGAÇÃO DE JAZIDAS DE SOLOS TROPICAIS PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA - GO”

Rita de Cássia Silva

Dissertação defendida e aprovada pela banca constituída pelos senhores:

Patrícia de Araújo Romão

Prof^a. Dr^a. Patrícia de Araújo Romão (UFG)

Maurício Martins Sales

Prof. Dr. Maurício Martines Sales (UFG)

Rita Moura Fortes

Prof^a. Dr^a. Rita Moura Fortes (UPM)

Goiânia, 30 de agosto de 2010.

Dedico este trabalho aos meus pais, "Tita" e Roque (ambos, *in memoriam*), pelo exemplo de vida para mim, e à minha sobrinha e filha do coração, Juliana, pela participação nesta caminhada.

“O senhor... mire, veja: o mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas - mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam, verdade maior. É o que a vida me ensinou. Isso que me alegra montão.”

Guimarães Rosa em Grande Sertões: veredas

AGRADECIMENTOS

À essa energia superior que move, organiza e harmoniza o universo, de diferentes nomes advindo das mais diversas crenças, impulsiona rumo à evolução. Sou imensamente grata por, à seu modo e a seu tempo, preparar as condições e as pessoas para que este processo fosse cumprido.

À professora Patrícia de Araújo Romão que, assim como os solos e as rochas que são resultantes de um processo lento, diversificado e sofisticado de formação, ela demonstrou nesta tarefa de orientação uma dosagem equilibrada de dedicação, paciência, incentivo, resistência, flexibilidade e esmero Muito obrigada!!!!

À professora Lilian Ribeiro de Rezende e ao professor Maurício Martines Sales. Antes meus alunos de graduação e agora, com orgulho, eu os tenho como meus professores. À Lilian, co-orientadora, pela amizade, incentivo, apoio e respeito no desenvolvimento deste trabalho. E ao Maurício pelo incentivo e confiança depositadas. Sem o empurrão de vocês eu não teria reiniciado essa caminhada.

Aos professores do programa de Pós-Graduação, GECON, e aos meus colegas no exercício da docência, muito obrigada pelo apoio e confiança.

Ao Israel Alves de Lima Neto (Rá) pelo companheirismo, cuidado, carinho e respeito por esta opção de aprimoramento profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás, FAPEG, pelos três meses de bolsa, que apesar do curto período foi importante para o desenvolvimento da pesquisa.

À Fundo de Fomento a Mineração, Funmineral, em especial ao Sílvia D. Carolina e Aline Beatriz Santana, pelo apoio na realização dos ensaios de composição química dos solos estudados.

À Sete – Serviços Técnicos de Engenharia Ltda. Engenharia, em especial aos engenheiros Luciano Fonseca e Aleones José da Cruz Júnior, pela realização dos ensaios de sondagem do solo.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, em especial a profa. Edi Mendes Guimarães, pela realização e análise dos ensaios de Difractometria de Raios-X (DRX) da primeira etapa de estudos deste trabalho.

À Furnas Centrais Elétricas S. A. pelo apoio nos ensaios e análise dos resultados de difração de Raios-X da segunda etapa de estudos. Agradecimento especial à Heloísa Helena Azevedo Barbosa da Silva e ao Renato Batista de Oliveira.

À Agência Goiana de Transportes e Obras - AGETOP - em especial nas pessoas do presidente Sr. José Américo de Sousa e dos técnicos da seção da Faixa de Domínio, Marcos Oredes Pereira de Moraes e José Antônio, pela análise e liberação dos locais onde foram executados os poços.

Às profas. e amigas Maria Gizelda de Oliveira Tavares do Instituto de Química (IQ) e Luciana Maria Lopes do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), ambas da UFG. A primeira pelo auxílio no entendimento dos resultados da análise química dos solos. A segunda que, com sua intimidade ímpar com a geologia da região, indicou as áreas mais adequadas para o desenvolvimento deste estudo.

Aos “Joãos” do laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da UFG, João Paulo Gomide e João Júnior, pela realização dos ensaios de caracterização e índice suporte dos solos estudados. Ao Arlam Carneiro Silva Júnior pela elaboração dos gráficos MCT e método das pastilhas. Ao Marcos Dias do Vale pelas fotos dos solos dos dois poços. À Janaína Ribeiro da Cunha pela ajuda na formatação do texto.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), em especial ao Giovane Bataglione e Nélon Luís da Cunha, pela realização cuidadosa dos ensaios da metodologia Miniatura, Compactado e Tropical (MCT).

Agradecimento especial à Márcia Mara de Oliveira, Eufrosina Terezinha Leão de Carvalho, Renato Resende Angelim, Mirtes Bandeira pelo apoio, estímulo e pela inserção neste mundo geotécnico, até então muito distante. Muito obrigada!!!!

Enfim, a todos, mesmo não citados formalmente, que alguma forma contribuíram para que este processo, chamado mestrado, fosse construído dia a dia e propiciado o meu crescimento integral.

RESUMO

A pavimentação é uma atividade que deve ser considerada no investimento de infra-estrutura para manter ou ampliar o crescimento econômico e as condições de melhoria da qualidade de vida da população. É uma atividade que depende da seleção e da extração de materiais adequados e exige investimentos altos, cuja disponibilidade é geralmente limitada exigindo a minimização de custos em todas as etapas. Portanto, a utilização de materiais adequados mais próximos da área a ser pavimentada é um fator que deve ser levado em conta, pois promove uma grande economia, principalmente em transporte de material. Somado a isso, tem-se que os materiais convencionais adequados, no caso os granulares, para o uso na estrutura do pavimento estão escassos. Portanto, o conhecimento dos materiais regionais com características apropriadas à pavimentação é ainda mais premente. A experiência brasileira com a utilização de solos tropicais lateríticos em pavimentação tem-se mostrado bastante promissora, contradizendo o uso das especificações convencionais adotadas nas regiões de clima temperado. Esta experiência trouxe a aplicação de solos lateríticos e a estruturação da metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) para este fim. A partir deste contexto, este trabalho tem como principal objetivo investigar solos que apresentem propriedades adequadas ao uso em pavimentação, como possíveis jazidas minerais. Para isso, esta pesquisa foi realizada em duas etapas. A primeira delas partiu de uma caracterização ambiental, embasada principalmente nos diversos mapeamentos, o que permitiu a identificação de sete pontos para avaliação preliminar das áreas mais indicadas. As amostras, coletadas próximas da superfície, foram ensaiadas por difratometria de Raios-X, método expedito da pastilha e análise química. Com a análise destes pontos, foram escolhidas duas, onde foram escavados poços para a análise do solo em perfil. Nesta segunda etapa, as amostras de solo recolhidas desses poços foram testadas em ensaios de caracterização convencional e de capacidade suporte pelo método tradicional e pela metodologia MCT, com vista à avaliação destes solos quanto à capacidade de suporte para aplicação em pavimentos. Esta investigação possibilitou, dentre outras conclusões, a verificação de que os solos dos dois poços apresentaram propriedades consideradas favoráveis para o uso pretendido. Destaca-se, entretanto, que apesar de ambos pertencerem ao grupo dos Latossolos, eles apresentaram indícios de estarem em estágios diferentes de intemperismo. De acordo com as considerações expostas, acredita-se que esta pesquisa possa contribuir com a investigação dos solos argilosos lateríticos para uso em pavimentação como também para aprimorar as informações geotécnicas da cidade, no caso Goiânia, e com isso contribuir para o planejamento integrado das futuras áreas a serem pavimentadas.

Palavras-chave: Solos tropicais. Pavimentação. Metodologia MCT. Ensaio de pastilha. Ensaio de Azul de Metileno. Ensaio de Difratometria de Raios-X.

ABSTRACT

Paving is part of infrastructure investment to maintain and enhance economic growth and conditions for improving life quality. It is an activity that depends on selection and extraction of materials and requires high investments, whose availability is often limited and requires minimization of costs at all stages. Therefore, as it promotes a great economy mainly in transport, the use of appropriate materials extracted closest to the area to be paved should be taken into account in selection stage. Besides, conventional materials suitable for use in the pavement structure, such as granular materials, are scarce. Therefore, knowledge of regional materials with appropriate characteristics to the pavement is even more important. The Brazilian experience in using tropical lateritic soils in highways has been highly promising, contradicting the conventional use of the specifications adopted in the temperate regions. This experience has brought the implementation of lateritic soils and structured for this purpose the MCT (Miniature, Compressed, Tropical) methodology. From this context, the main objective of this work is to investigate soils that have suitable properties for use in paving and potential mineral deposits. The research was then conducted in two stages. The first one came from an environmental characterization, based mainly on maps, which allowed the identification of seven points for preliminary assessment of the indicated areas. The samples collected near to the surface were tested by X-ray diffraction, expeditious disk method and chemical analysis. By analyzing these points, two were chosen, where wells were dug for the analysis of soil profile. During this second phase, soil samples collected from these wells were tested for conventional characterization and support capacity by traditional method and by the MCT in order to evaluate these soils with respect to their support capacity to application to pavements. This investigation concluded that the soil properties of the two wells were favorable for the intended use. It is noteworthy, however, that although both belong to the group of Latossolos, they showed signs of being at different stages of weathering. According to the foregoing, it is believed that this research can contribute to the investigation of lateritic clay soils for use in paving as well as to enhance the city's geotechnical information, in the case Goiania, and thereby contribute to the integrated planning of future areas to be paved.

Keywords: Tropical soils. Paving. MCT. Disk testing. Methylene blue test. Test of X-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Carta de Plasticidade de Casagrande. Fonte: Pinto (2006)	30
Figura 2.2 – Esquema para classificação pelo SUCS. Fonte: Pinto (2006).....	30
Figura 2.3 – Gráfico de ensaio Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão de um solo laterítico. Fonte: Villibor e Nogami (2009).....	43
Figura 2.4 – Gráfico da classificação de solos pelo sistema MCT. Fonte: Villibor e Nogami (2009)	44
Figura 2.5 – Hierarquização de SAFL para uso em pavimentação de acordo com a classificação MCT. Fonte: DER-SP (2005)	47
Figura 2.6 – Carta de Classificação do Método da Pastilha. Fonte: Fortes et al. (2002)	50
Figura 2.7 – Ábaco para identificação do grau de atividade da fração argila dos solos. Fonte: Fabbri (1994).....	57
Figura 2.8 – Exemplo do teste da mancha de azul de metileno e o detalhe da formação da aura com a adição de 12 ml de azul de metileno. Fonte: A autora (2010)	62
Figura 3.1 – Mapa de solos de Goiânia. Autora: Romão (2010).....	66
Figura 3.2 – Mapa hipsométrico de Goiânia. Autora: Romão (2010).....	68
Figura 3.3 – Mapa geomorfológico de Goiânia. Autora: Romão (2010)	69
Figura 3.4 – Mapa geológico de Goiânia. Autora: Romão (2010).....	70
Figura 4.1 – Ilustração das sete áreas onde foram coletadas as amostras.	73
Figura 4.2 – Ensaio de sedimentação	79
Figura 4.3 – Imersão dos corpos de prova em água.	80
Figura 4.4 – Equipamentos necessários para a execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha. Fonte: Fabbri (1994).....	81
Figura 4.5 – Difrátômetro de Raios-X. Fonte: Oliveira (2008).....	84
Figura 4.6 – Preparação das amostras para análise de DRX: (a) moinho orbital; (b) sedimentação em coluna; (c) lâminas orientadas; (d) lâminas dentro do dessecador com etileno-glicol; e (e) mufla para calcinação	84
Figura 5.1 – Ensaio de pastilha na etapa de contração.	88
Figura 5.2 – Ensaio da pastilha realizados nos solos dos pontos 1 a 6, na etapa de reabsorção de água.....	89
Figura 5.3 – Ábaco do método expedito das Pastilhas com os resultados dos Pontos 1 a 6	89
Figura 5.4 – Difratograma da amostra total do Ponto 1	90
Figura 5.5 – Difratograma da amostra total do Ponto 2	90
Figura 5.6 – Difratograma da amostra total do Ponto 3	91
Figura 5.7 – Difratograma da amostra total do Ponto 4	91

Figura 5.8 – Difratoograma da amostra total do Ponto 5	92
Figura 5.9 – Difratoograma da amostra total do Ponto 6	92
Figura 5.10 – Difratoograma da amostra do Ponto 3, análise acumulada	97
Figura 5.11 – Difratoograma da amostra do Ponto 6, análise acumulada	98
Figura 5.12 – Ábaco do método expedito das Pastilhas com os resultados do Ponto 7	100
Figura 5.13 – Difratoograma da amostra do Ponto 7, análise acumulada	100
Figura 5.14 – Fotos das amostras de solo do Poço 1 em todas as profundidades. Autor: Vale (2010)	102
Figura 5.15 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1 nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com e sem o uso de defloculante	103
Figura 5.16 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, sem o uso de defloculante	104
Figura 5.17 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com o uso de defloculante	104
Figura 5.18 – Perfil granulométrico do Poço 1	105
Figura 5.19 – Limites de liquidez e plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras de 1,0 a 5,0 m do Poço 1	106
Figura 5.20 – Resultado do ensaio das pastilhas das profundidades de 1,0 a 50 m, do Poço 1	111
Figura 5.21 – Resultado do ensaio classificação MCT do perfil do Poço 1 e o enquadramento na área de argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos.....	112
Figura 5.22 – Resultado do ensaio classificação de Azul de Metileno pelo método da mancha, do perfil do Poço 1	112
Figura 5.23 – Curvas de compactação e de umidade ótimas nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 1	118
Figura 5.24 – Curvas de CBR por umidade e CBR por umidade ótima nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 1	119
Figura 5.25 – Curvas de expansão por umidade das amostras do Poço 1	119
Figura 5.26 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 1,0 m	121
Figura 5.27 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 2,0 m	121
Figura 5.28 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 3,0 m	121
Figura 5.29 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 4,0 m	122
Figura 5.30 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 5,0 m	122

Figura 5.31 – Curva de compactação Mini-Proctor e Mini-CBR com sobrecarga e com e sem imersão da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m.....	124
Figura 5.32 – Curvas de compactação convencional e Mini-Proctor do Poço 1 na profundidade 3,0 m.....	126
Figura 5.33 – Fotos das amostras de solo do Poço 3 em todas as profundidades. Autor: Vale (2010)	129
Figura 5.34 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com e sem o uso de defloculante	130
Figura 5.35 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, sem o uso de defloculante	131
Figura 5.36 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com o uso de defloculante	131
Figura 5.37 – Perfil granulométrico do Poço 3	132
Figura 5.38 – Limites de liquidez e plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras de 1,0 a 5,0 m do Poço 3.....	133
Figura 5.39 – Resultado do ensaio de pastilha do perfil do Poço 3.....	136
Figura 5.40 – Resultado do ensaio de classificação MCT do perfil do Poço 3 e enquadramento na área de argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos.....	137
Figura 5.41 – Resultado do ensaio de classificação de Azul de Metileno pelo método da mancha, do perfil do Poço 3	137
Figura 5.42 – Curvas de compactação do Poço 3, nas profundidades 1,0 a 5,0 m.....	144
Figura 5.43 – Curvas de CBR do Poço 3, nas profundidades 1,0 a 5,0 m.....	145
Figura 5.44 – Curvas de expansão por umidade das amostras do Poço 3	145
Figura 5.45 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 1,0 m.....	145
Figura 5.46 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 2,0 m.....	146
Figura 5.47 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 3,0 m.....	146
Figura 5.48 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 4,0 m.....	146
Figura 5.49 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 5,0 m.....	147
Figura 5.50 – Curvas de compactação com sobrecarga e Mini-CBR com e sem imersão.....	148
Figura 5.51 – Curva de compactação convencional e Mini-Proctor do Poço 3 na profundidade 3,0 m.....	149
Figura A.1 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade de 1,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	162

Figura A.2 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	162
Figura A.3 – Curvas granulométricas da amostrado Poço 1, na profundidade 3,0 m, com e sem o uso de defloculante	163
Figura A.4 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m, com e sem o uso de defloculante	163
Figura A.5 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade de 5,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	164
Figura A.6 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 1,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	164
Figura A.7 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 2,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	165
Figura A.8 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 3,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	165
Figura A.9 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 4,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	166
Figura A.10 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 5,0 m, com e sem o uso de defloculante.....	166
Figura B.1 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 1,0 m	168
Figura B.2 – Difrátograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 1,0 m.....	168
Figura B.3 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m	169
Figura B.4 – Difrátograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m.....	169
Figura B.5 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m	170
Figura B.6 – Difrátograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m.....	170
Figura B.7 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m	171
Figura B.8 – Difrátograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m.....	171
Figura B.9 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 5,0 m	172
Figura B.10 – Difrátograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 5,0 m.....	172
Figura B.11 – Difrátograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 1,0 m	173

Figura B.12 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 1,0 m	173
Figura B.13 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 2,0 m	174
Figura B.14 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 2,0 m	174
Figura B.15 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 3,0 m	175
Figura B.16 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 3,0 m	175
Figura B.17 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 4,0 m	176
Figura B.18 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 4,0 m	176
Figura B.19 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 5,0 m	177
Figura B.20 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 5,0 m	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Frações granulométricas das amostras analisadas do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m	103
Tabela 5.2 – Porcentagem de argila do Poço 1, com e sem o uso de defloculante, nas cinco profundidades estudadas.....	106
Tabela 5.3 – Massa específica dos grãos, limites de consistência e classificações das profundidades 1,0 a 5,0m, do Poço 1.	107
Tabela 5.4 – Classificação da atividade da argila nas profundidades 1,0 a 5,0 m do Poço 1.	110
Tabela 5.5 – Resumo dos resultados de classificação pelo método MCT convencional, método expedito pastilhas e por Adsorção de Azul de Metileno, para o perfil do Poço 1.....	111
Tabela 5.6 – Quadro resumo da análise química do perfil do Poço 1	113
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de compactação, expansão e CBR das profundidades de 1,0 a 5,0 m do Poço 1	118
Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios de compactação Mini-Proctor, Mini-CBR, expansão, RIS e PSI do Poço 1 na profundidade 3,0 m	124
Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de compactação convencional e Mini-Proctor, expansão e Mini-CBR, ambos com e sem imersão do Poço 1 na profundidade 3,0 m.....	125
Tabela 5.10 – Frações granulométricas das amostras analisadas do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m	130
Tabela 5.11 – Porcentagem de argila do Poço 3, com e sem o uso de defloculante, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m.....	133
Tabela 5.12 – Massa específica dos grãos, limites de consistência e classificações.....	134
Tabela 5.13 – Classificação da atividade da argila nas profundidades 1,0 a 5,0 m do Poço 3	135
Tabela 5.14 – Resumo dos resultados de classificação pelo método MCT convencional, método expedito pastilhas e por Adsorção de Azul de metileno, para o perfil do Poço 3	136
Tabela 5.15 – Resumo da análise química do perfil do Poço 3.....	138
Tabela 5.16 – Resultados do ensaio de compactação, expansão e CBR das profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 3	143
Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios de compactação Mini-Proctor, Mini-CBR, expansão, RIS e PSI do Poço 3 na profundidade 3,0 m	147
Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de compactação convencional e Mini-Proctor, expansão e Mini-CBR, ambos com e sem imersão do Poço 3 na profundidade 3,0 m.....	149

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Significado das letras utilizadas na classificação SUCS. Fonte: Pinto (2006)...	29
Quadro 2.2 – Resumo do SUCS. Adaptado de VARGAS (1978).....	30
Quadro 2.3 – Sistema de classificação de solos pela TRB. Fonte: Adaptado do DNIT (2006)	32
Quadro 2.4 – Valores típicos de c' para diferentes granulometrias (Adaptado de Nogami e Villibor, 1995).....	44
Quadro 2.5 – Valores típicos de d' para diferentes granulometrias (Adaptado de Nogami e Villibor, 1995).....	44
Quadro 2.6 – Dados diversos grupos de solos da classificação MCT. Fonte: Villibor e Nogami (2009)	46
Quadro 2.7 – Tipo de solo de acordo com os intervalos de K_i e K_r , segundo Resende e Santana (1988), Fookes (1997) e IBGE (2005).....	51
Quadro 2.8 – Valores de azul de metileno (V_a) e coeficientes de atividade (C_A) em função da superfície específica. Valores da superfície específica obtido de Lan (1980). (Fonte: Fabbri, 1994).....	59
Quadro 2.9 – Valores pré-determinados do coeficiente de atividade (C_A) da fração fina do solo para caracterização do grau de atividade dos argilominerais e os seus tipos. (Adaptado de Fabbri, 1994)	59
Quadro 4.1 – Coordenadas dos locais onde foram coletadas as seis amostras, seus pontos de referência e a relação com os poços executados na 2ª etapa.	72
Quadro 5.1 – Resumo do resultado da análise mineralógica por DRX dos seis pontos estudados	93
Quadro 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios da composição mineralógica por DRX, da composição química, da classificação do solo pelo método da pastilha dos seis pontos estudados	93
Quadro 5.3 – Resumo dos resultados da relação sílica-sesquióxido e dos principais componentes minerais obtidos pelo ensaio de DRX da amostra total dos seis pontos estudados	94
Quadro 5.4 – Matriz de interação dos critérios a partir dos resultados dos ensaios da composição mineralógica por DRX, da composição química dos pontos 1 a 6.....	96
Quadro 5.5 – Resumo da análise mineralógica das frações total e argila dos pontos 3 e 6, determinados por DRX e suas massas específicas	98
Quadro 5.6 – Resumo da análise mineralógica das frações total e argila do ponto 7, determinados por DRX.....	100
Quadro 5.7 – Massa específica dos grãos de alguns minerais. Adaptado de Lambe e Whitman (1969) e Delgado (2007).	108
Quadro 5.8 – Minerais constituintes da amostra total e fração argila do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, obtidos pelo ensaio de DRX	115

Quadro 5.9 – Quadro-resumo das especificações tradicionais para a construção de pavimentos asfálticos. Adaptado do DNIT, 2006.....	119
Quadro 5.10 – Resumo das principais características geotécnicas do Poço 1.....	128
Quadro 5.11 – Minerais constituintes da amostra total e fração argila do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, obtidos com o ensaio de DRX	140
Quadro 5.12 – Resumo das principais características geotécnicas do Poço 3.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área da face da molécula de azul de metileno
A_i	Altura inicial
A_f	Altura final
AASHO	<i>American Association for State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
c'	Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT
C	Concentração da solução de azul de metileno
CA	Coeficiente de Atividade
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
C_d	Contração diametral
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
COPPE/UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.
d'	Inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação na metodologia MCT
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes
DRX	Difratometria de Raios-X
e'	Índice da classificação MCT
EEC/UFG	Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
f	Fator de correção para o cálculo de Perda de Massa por Imersão
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FUNMINERAL	Fundo de Fomento à Mineração
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
Ia	Índice de atividade da argila
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e de Serviços
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IG	Índice de Grupo
IPLAN	Instituto de Planejamento Municipal
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Ki	Relação molecular sílica/alumínio
Kr	Relação molecular sílica/sesquióxido
kV	Kilovolt
LPCC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LV	Latossolos Vermelho
LVA	Latossolos Vermelho-Amarelo
mA	miliAmpère
M _{AM}	Massa molecular do azul de metileno na forma anidra
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MCT-M	Miniatura, Compactado, Tropical – Modificado
M _d	Massa seca desprendida
MCV	<i>Moisture Condition Value</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mini-CBR	Ensaio de suporte da metodologia MCT
Mini-MCV	Ensaio de Mini-MCV da metodologia MCT
Mini-Proctor	Ensaio de compactação de energia constante da metodologia MCT
M _S	Massa seca da parte extrudada do corpo de prova
N	Número de Avogadro
NP	Não Plástico
NV	Nitossolos Vermelho
P _F	Porcentagem que o solo contém da fração argila
PSI	Perda de Suporte por Imersão
P ₂₀₀	Porcentagem de solo que passa na # 200
RIS	Relação entre Mini-CBR: imerso, sem sobrecarga e com sobrecarga, para a condição de umidade ótima
SE	Superfície Específica
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
S _M	Superfície específica do azul de metileno
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TRRL	<i>Transport and Road Research Laboratory</i>
SAFL	Solos Arenosos Finos Lateríticos
UnB	Universidade de Brasília
Va	Volume de azul de metileno
ρ _S	Massa específica dos grãos
γ _d	Peso específico seco
γ _{dmáx}	Peso específico seco máximo
θ	Ângulo de deflexão do raio-X formado com o plano cristalino do material
μm	micrometro

w_L	Limite de liquidez
w_P	Limite de plasticidade
w_{ot}	Umidade ótima
Al_2O_3	Boehmita
$Al_2(OH)_3$	Gibbsita
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Caulinita
FeO_3	Hematita
FeO_2H	Goetita
SiO_2	Quartzo
TiO_2	Rutilo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	OBJETIVOS.....	26
1.2	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	27
2	REVISÃO	28
2.1	IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLOS.....	28
2.1.1	Classificações geotécnicas tradicionais.....	28
2.2	SOLOS TROPICAIS, SOLOS LATERÍTICOS E SUAS PECULIARIDADES.....	33
2.2.1	Aspectos mineralógicos dos solos lateríticos.....	33
2.2.2	Aspectos químicos dos solos lateríticos	35
2.2.3	Peculiaridades dos solos tropicais e os reflexos na aplicação das classificações geotécnicas tradicionais.....	36
2.2.4	Classificação segundo Duchaufour.....	38
2.3	METODOLOGIA MCT DE CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS	39
2.3.1	Generalidades.....	39
2.3.2	A Metodologia MCT e a classificação geotécnica	39
2.3.2.1	Ensaio de compactação Mini-MCV.....	40
2.3.2.2	Aplicação de solos tropicais em pavimentos.....	45
2.3.3	Método das pastilhas para identificação expedita do grupo MCT.....	47
2.3.4	Índices Ki e Kr.....	50
2.3.5	Ensaio de adsorção de azul de metileno e sua aplicação na caracterização dos solos brasileiros	53
2.4	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X ..	63

2.5	CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA DOS SOLOS	64
3	ÁREA ESTUDADA	65
3.1	SOLOS	65
3.1.1	Classe de solo estudada – Latossolos	67
3.1.2	Geomorfologia	67
3.1.3	Geologia.....	69
4	METODOLOGIA.....	71
4.1	PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO.....	71
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL DA 1ª ETAPA	75
4.2.1	Difratometria de Raios-X (DRX).....	75
4.2.2	Identificação expedita pelo método das pastilhas	76
4.2.3	Análise da composição química do solo	77
4.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL DA 2ª ETAPA	78
4.3.1	Caracterização e classificação dos solos.....	78
4.3.1.1	Massa específica dos grãos.....	78
4.3.1.2	Análise granulométrica.....	78
4.3.1.3	Limites de consistência	79
4.3.2	Identificação do carácter laterítico dos solos	79
4.3.2.1	Classificação MCT	80
4.3.2.2	Ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha	80
4.3.2.3	Metodologia DRX	83
4.3.2.4	Análises da composição química do solo	85
4.3.3	Análise de resistência mecânica e de expansibilidade dos solos.....	86
4.3.3.1	Ensaio de compactação, expansão e <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	86
4.3.3.2	Ensaio de Mini-Proctor (compactação), Mini-CBR e expansão	87
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	88

5.1	RESULTADOS DA 1ª ETAPA.....	88
5.1.1	Análise dos resultados da 1ª. etapa.....	94
5.1.2	Resultados e análise complementares da 1ª etapa.....	97
5.2	RESULTADOS DA 2ª ETAPA.....	101
5.2.1	Poço 1	101
5.2.1.1	Caracterização e classificação dos solos.....	102
5.2.1.2	Classificação e identificação do carácter laterítico dos solos.....	111
5.2.1.3	Análise da resistência mecânica e de expansibilidade dos solos.....	118
5.2.2	Poço 3	128
5.2.2.1	Caracterização e classificação dos solos.....	129
5.2.2.2	Classificação e identificação do carácter laterítico dos solos	135
5.2.2.3	Análise da resistência mecânica e de expansibilidade dos solos.....	142
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151
	REFERÊNCIAS.....	155
A.	APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICA DOS POÇOS 1 E 3, NAS PROFUNDIDADES DE 1,0 A 5,0 m.....	161
B.	APÊNDICE B – DIFRATOGRAMAS DOS POÇOS 1 E 3, NAS PROFUNDIDADES DE 1,0 A 5,0 m.....	167

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A demanda por pavimentação de vias rurais e urbanas é derivada da necessidade de transporte, por meio rodoviário, de bens de consumo e de pessoas. O Brasil fez no passado uma decisão técnica e política, pelo modo de transporte rodoviário. Independente das conseqüências econômicas de tal decisão, o fato é que, na atual matriz de transportes brasileira, o modo rodoviário, segundo Padula (2008), responde por mais de 60% do transporte de cargas e por cerca de 95% do transporte de passageiros. Seguindo a tendência da média nacional, o estado de Goiás concentra também neste modal o escoamento de seus produtos e o transporte de passageiros, inclusive nas áreas urbanas e metropolitanas.

A promoção do desenvolvimento econômico do estado de Goiás, cuja produção se concentra na agropecuária e na agroindústria tem garantido ao estado, desde a década de 90, crescimento econômico superior ao da média nacional de acordo com Silva (2002). Se por um lado esta constatação traz euforia, por outro, ela remete à preocupação da necessidade de se fazer a oferta de infra-estrutura andar à frente da demanda pelas novas necessidades de transporte, de forma que não existam impedimentos ao escoamento dos seus produtos e conseqüentemente ao desenvolvimento do estado. É reconhecido que rodovias em estado precário e sem pavimentação acarretam altos custos de transporte criando entraves ao desenvolvimento regional.

Esse processo do desenvolvimento e aperfeiçoamento da agropecuária e da agroindústria em Goiás tem sido ao mesmo tempo, responsável pelo seu desenvolvimento regional como também se constituído em agente dinamizador do crescimento de várias cidades no estado, particularmente de sua capital, Goiânia. O dinamismo econômico da cidade pode ser comprovado, conforme apresenta Oliveira (2010) com a constatação do crescimento do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e de Serviços (ICMS) no período de 2000 a 2002, que foi de 57%. Em termos populacionais, a cidade contava no último censo com uma população de pouco mais de 1 milhão de habitantes e com uma participação do PIB goiano, no ano de 2000, de aproximadamente 30%. A cidade tem uma boa infra-estrutura econômica e social refletindo no índice de desenvolvimento humano e na qualidade de vida.

Oliveira [s. a.] acredita que, apesar dos riscos e ameaças existentes, a economia goianiense tende a continuar expandindo nos próximos anos, apoiada no setor terciário, principalmente no comércio varejista e nos serviços de educação, saúde e telecomunicações. Todas essas contingências exigem o avanço de obras de infra-estrutura, como pavimentação, para dar suporte e ampliar o crescimento econômico.

Segundo o que foi estabelecido pelo Plano Diretor de Goiânia (2010), em vigor desde 2007, dentre as diversas estratégias, duas que refletem diretamente na pavimentação, a saber: mobilidade e acessibilidade de transporte e desenvolvimento sócio-cultural. Na primeira estratégia, o artigo 24 esclarece que, para a melhoria da rede viária, fica previsto um plano de fomento e incentivo visando à pavimentação das vias públicas. E quanto ao desenvolvimento sócio-cultural, uma das ações proposta é a promoção institucional da moradia provida de toda a infra-estrutura urbana.

Diante deste contexto, pode-se afirmar que a pavimentação é uma importante variável a ser considerada na oferta de infra-estrutura viária de qualidade, de forma a manter ou ampliar o crescimento econômico e as condições de melhoria da qualidade de vida da população do estado e das cidades.

É uma atividade que depende da seleção e extração de materiais adequados e exige investimentos altos, cuja disponibilidade de recursos é geralmente limitada. Daí a importância da minimização dos custos em todas as etapas. Portanto, a utilização de materiais adequados mais próximos da área a ser pavimentada é um fator que deve ser levado em conta, pois promove uma grande economia, principalmente em transporte de material. Somado a isso, tem-se que os materiais convencionais adequados, no caso os granulares, para o uso na estrutura do pavimento estão escassos e isso pode inviabilizar a consecução deste objetivo. Outra medida de economia é o conhecimento de materiais regionais com características apropriadas à pavimentação.

A experiência brasileira com a utilização de solos tropicais lateríticos em pavimentação tem-se mostrado bastante promissora. A necessidade e a ousadia em aplicar os solos brasileiros em pavimentação, contradizendo o uso das especificações convencionais adotadas nas regiões de clima temperado, trouxeram uma nova vertente no conhecimento geotécnico que é aplicação de solos lateríticos e a estruturação da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) para este fim. A implantação de rodovia de baixo volume de tráfego, os registros dos dados, o

acompanhamento e monitoramento das áreas pavimentadas ajudaram a solidificar o conhecimento.

Em virtude do exposto, este trabalho apresenta as etapas principais de um programa que tem o objetivo de investigar solos que apresentem propriedades adequadas ao uso em pavimentação, como possíveis jazidas minerais. Assim, segue-se com a apresentação dos conceitos necessários ao entendimento do atual estágio de intemperismo dos locais em análise e das propriedades dos solos tropicais que influenciam na capacidade de suporte desses solos para aplicação em pavimentos. Discorre-se também sobre a metodologia MCT como fundamentação para os procedimentos metodológicos adotados e sobre a caracterização ambiental da área de estudos, importante na definição posterior de dois perfis de solos escolhidos para investigação da sua variação em profundidade. Esta investigação é um instrumento útil, pois possibilita fornecer aos usuários, o projetista, o administrador público e o planejador, as informações prévias relativas à localização e capacidade suporte de solos como um atributo adequado à pavimentação.

Finalizando, acredita-se que essa dissertação possa contribuir com a investigação dos solos argilosos lateríticos locais para uso em pavimentação como também complementar as informações geotécnicas da cidade e com isso dar mais subsídio ao planejamento integrado das futuras áreas a serem pavimentadas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar a potencialidade de jazidas de solos lateríticos existentes na Região Metropolitana de Goiânia, para uso em pavimentação, a partir de duas áreas-alvo. Tendo em vista este objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Auxiliar no estabelecimento de uma metodologia que permita a identificação preliminar de áreas que possam atender a objetivos específicos, no caso deste trabalho, de solo para fins de uso em obras viárias;
- Caracterizar e classificar os solos coletados de acordo com as metodologias SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e TRB (*Transportation Research Board*);

- Classificar os solos de acordo com a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), específica para solos tropicais;
- Fornecer informações sobre a mineralogia dos solos das áreas em estudo;
- Contribuir com os resultados obtidos nos poços estudados para o mapeamento geotécnico dos solos goianienses.

1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Para cumprir os objetivos propostos nesta dissertação, este trabalho foi desenvolvido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo são apresentados a contextualização do tema e os aspectos gerais da pesquisa incluindo os objetivos e justificativa do estudo. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura abordando as peculiaridades dos solos tropicais, a metodologia MCT, os aspectos de relativos à utilização do solo para uso em pavimentação e os ensaios laboratoriais convencionais e não convencionais dos sistemas de classificação de solos. No Capítulo 3 é apresentada a área de estudo em termos da suas características gerais, de solo, geomorfologia e geologia. No Capítulo 4 são apresentados os critérios estabelecidos para a seleção das áreas que foram estudadas na primeira etapa e as metodologias adotadas para a escavação e análise dos dois poços estudados em perfil, na segunda etapa. Foram apresentadas as metodologias tradicional e MCT e outras determinações úteis para a confirmação dos resultados. No Capítulo 5 foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados em laboratório, cujo objetivo é de identificar as possíveis áreas que poderiam ser utilizadas em pavimentos. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais desta pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO

2.1 IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLOS

O solo tem sido estudado e interpretado de diferentes maneiras, de acordo com o uso que se faz dele. As interpretações são variadas e discordantes, pois as ciências ligadas ao solo envolvem conhecimentos e objetivos diversos em virtude dos seus vários ramos. Como o interesse que cada um desses ramos possui pelo solo varia, conseqüentemente surgem diferentes sistemas de classificação dos solos por eles elaborados.

A classificação do solo, segundo Greco (2009) é feita por associação entre as propriedades que foram observadas ou medidas e que serviram para a determinação da classe do solo com outras propriedades que não foram medidas, possibilitando que sejam feitas as previsões.

Cozzolino e Nogami (1993) ressaltam que a identificação e classificação dos solos são necessárias em quase todos os estudos geotécnicos. O nível de importância dessas etapas depende do empreendimento em estudo, servindo em alguns casos apenas como fase preliminar. Entretanto, nas fundações de pequenas edificações e obras viárias de baixo volume de tráfego, a identificação e a classificação podem ser o dado geotécnico definitivo. Em resumo, reforça-se aqui a preocupação com a identificação e classificação criteriosa já que pode ser a única informação adotada para determinados empreendimentos. As classificações geotécnicas facilitam a comunicação entre engenheiros e técnicos.

2.1.1 Classificações geotécnicas tradicionais

As classificações denominadas tradicionais, desenvolvidas em países de clima temperado, são baseadas essencialmente nos limites de Atterberg e na granulometria, denominados propriedades-índice dos solos. Para Villibor et al. (2000), os princípios norteadores do dimensionamento de pavimentos norte americanos e europeus devem-se aos materiais pétreos mais comumente encontrados na região e as condições climáticas adversas, tais como: congelamento no inverno e descongelamento na primavera, mantendo o subleito com teor de

umidade superior à obtida em ensaios laboratoriais. Daí a avaliação ser feita tomando por base as propriedades-índice, pois é necessário um controle rigoroso do Limite de Liquidez (w_L) e Índice de Plasticidade (IP) dos finos para garantir uma drenagem adequada do pavimento na época do degelo e absorver a expansibilidade da água no congelamento durante o inverno.

No Brasil as classificações mais adotadas são a Unificada, Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e para finalidade rodoviária, a *Transportation Research Board* (TRB) da *American Association Highway Transportation* (AASHTO), ambas obtidas dos estudos das regiões temperadas. Quanto aos procedimentos de estudo de materiais e dimensionamento de pavimentos, o Brasil ainda utiliza os critérios tradicionais estabelecidos pelos países de clima frio e temperado. Entretanto, apesar da viabilidade técnica da maioria dos pavimentos projetados e construídos, estes podem acarretar custos elevados em comparação com a utilização de materiais não convencionais, concluem Villibor et al. (2000).

O SUCS baseia-se na identificação dos solos segundo as suas qualidades de textura e plasticidade e os agrupam de acordo com seu comportamento quando usado em estradas, aeroportos, aterros e fundações. O SUCS, além da propriedade-índice como parâmetro para a determinação da classificação dos solos, leva em conta a presença de matéria orgânica. Destaca-se que os solos orgânicos, pela primeira vez, foram inseridos como um grupo de características e comportamento próprios. Neste sistema são consideradas as porcentagens de pedregulho, areia e finos, sendo estes entendidos como a fração que passa na peneira nº 200, ou seja, silte e argila; forma da curva granulométrica, plasticidade e compressibilidade.

Os solos na classificação SUCS são divididos em 6 grupos: pedregulhos (G), areia (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), siltes e argilas orgânicas (O) e turfas (Pt). Cada grupo é dividido em subgrupos de acordo com suas propriedades-índices mais significativas. Os solos são classificados por duas letras, conforme apresentado no Quadro 2.1, sendo a primeira relativa à granulometria e a segunda à plasticidade, no caso de solos finos.

Tipo Principal	Dados complementares do solo
G – pedregulho	W – bem graduado
S – areia	P – mal graduado
M – silte	H – alta compressibilidade
C – argila	L – baixa compressibilidade
O – orgânico	
Pt – turfas	

Quadro 2.1 – Significado das letras utilizadas na classificação SUCS. Fonte: Pinto (2006)

O predomínio da fração fina do solo o levará a ser classificado como silte (M), argila (C) ou solo orgânico (O), não em função da argila e silte, mas sim pelos índices que traduzam o seu comportamento argiloso. Para isso são usadas a carta de plasticidade de Casagrande e o esquema de classificação SUCS, apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2.

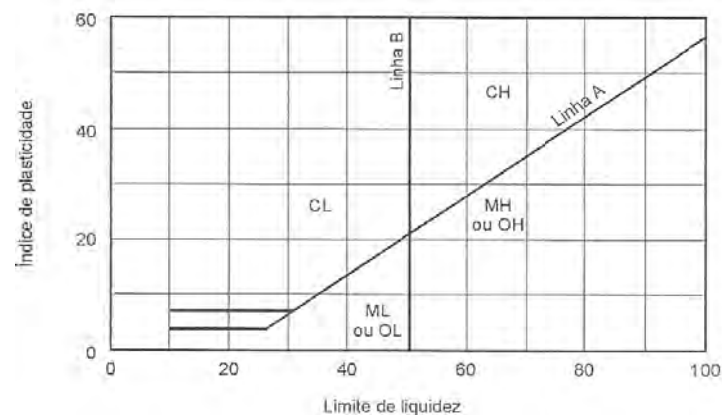


Figura 2.1 – Carta de Plasticidade de Casagrande. Fonte: Pinto (2006)

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
		% P #200 > 12	GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		5 < #200 < 12	GC GM
	S > G : S	% P #200 < 5	GW-GC, GP-GM, etc.
		% P #200 > 12	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
		5 < #200 < 12	SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 50	C	CL	SC SM
		CH	SW-SC, SP-SC, etc.
		ML	
	M	MH	
		OL	
		OH	

Figura 2.2 – Esquema para classificação pelo SUCS. Fonte: Pinto (2006)

O Quadro 2.2 resume o sistema de classificação SUCS.

Classificação Geral	Tipos Principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (menos de 50% passante na # 200)	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (mais que 50% passante na # 200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade ($w_L < 50$) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade ($w_L > 50$) MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	Pt

Quadro 2.2 – Resumo do SUCS. Adaptado de VARGAS (1978)

Nogami e Villibor (1995) destacam que, além da classificação geotécnica dos solos, os valores de w_L e IP, isolados ou em conjunto no Gráfico de Plasticidade, são usados para avaliar a variação de volume dos solos compactados em virtude dos processos de secagem e umedecimento. Como a variação de volume é uma condição indesejável, particularmente nas camadas de pavimentos, isso implica na limitação destes parâmetros com resultados satisfatórios para os solos de clima temperado.

A outra classificação tradicional é a *Highway Research Board* (HRB), publicada em 1945 e que, após algumas alterações foi adotada pela *American Association for State Highway Officials* (AASHO). Atualmente esta classificação, denominada *Transportation Research Board* (TRB) é bastante utilizada no meio rodoviário. Complementar às propriedades-índice, esta classificação inclui o Índice de Grupo (IG) que é um número inteiro que varia de 0 a 20 e define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento rodoviário. O IG é baseado nos limites de Atterberg do solo e na porcentagem do material fino que passa na peneira de nº 200. Pode ser facilmente calculada pela equação 2.1 apresentada a seguir.

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (2.1)$$

onde:

a = % do material passante na peneira 0,075 mm (#200) menos 35; caso esta % seja > 75, adota-se a = 40; caso seja < 35, adota-se a = 0;

b = % do material passante na peneira 0,075 mm (# 200) menos 15; caso esta % seja > 55, adota-se b = 40; caso seja < 15, adota-se b = 0;

c = valor de w_L menos 40; caso $w_L > 60\%$, adota-se c = 20 e se $w_L < 40\%$, adota-se c = 0 e

d = valor do IP menos 10; caso IP seja > 30%, adota-se d = 20 e no caso de IP < 35, adota-se d = 0.

O sistema TRB não classifica os solos por tipo (como areias, argilas, etc), mas simplesmente os divide em oito grupos principais, de A-1 a A-8, de acordo com o objetivo específico de avaliar a adequação dos solos para uso como subleito de pavimentos. Os três primeiros grupos são classificados como materiais granulares (A-1 a A-3), considerados de excelente a bom como material de subleito. Os grupos A-4 e A-5 são siltosos e os grupos A-6 e A-7 são argilosos, indicando segundo a classificação tradicional o material para o subleito como de regular a mau, com o acréscimo do índice de grupo. O grupo A-8 enquadra os solos altamente orgânicos. O Quadro 2.3 a seguir mostra o sistema de classificação dos solos, segundo o TRB.

Classificação Geral	SOLOS GRANULARES (% passante na # 200 ≤ 35)							SOLOS FINOS (% passante na # 200 > 35)			
Classificação em Grupos e Subgrupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria (% passante na peneira)											
# 10	50 máx.										
# 40	30 máx.	30 máx.	51 máx.								
# 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín.
Consistência (fração passante na # nº 40)											
w _L				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín.
IP	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 max	12 max	16 máx	20 máx
Materiais constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o w_L menos 30.

Quadro 2.3 – Sistema de classificação de solos pela TRB. Fonte: Adaptado do DNIT (2006)

Vale considerar que, no caso da classificação TRB, não há uma distinção clara entre siltes e argilas. Entretanto o sistema deve ser julgado com base em seus objetivos, que são de avaliar especificamente a adequação dos solos para uso como subleito de pavimentos. Desse modo, o sistema é mais restrito e mais interpretativo do que o sistema Casagrande, uma vez que não apenas classifica os solos em grupos com propriedades similares, mas também infere sobre a qualidade dos solos em cada grupo.

2.2 SOLOS TROPICAIS, SOLOS LATERÍTICOS E SUAS PECULIARIDADES

De acordo com o COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF ISSMFE (1985¹ *apud* NOGAMI e VILLIBOR, 1995), solo tropical é aquele que, comparado aos solos não tropicais, apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, em decorrência da atuação no mesmo de processos geológicos e pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas. Assim, para Nogami e Villibor (1995), para que um solo seja considerado como tropical, é primordial que ele possua peculiaridades de interesse geotécnico e não apenas tenha sido formado numa região de clima tropical úmido. É indispensável que possua peculiaridades de interesse geotécnico.

Cozzolino e Nogami (1993), apesar de considerarem difícil tratar de forma generalista os solos tropicais, em virtude de características tão peculiares, os agrupam em duas grandes classes, conhecidas no meio técnico como solos lateríticos e solos saprolíticos. Dado o interesse desse trabalho serão estudados em maior profundidade apenas os solos lateríticos.

Para Cozzolino e Nogami (1993), os solos lateríticos constituem a camada mais superficial das áreas bem drenadas, caracterizada pela cor, em que predominam os matizes vermelho e amarelo, com espessura que pode atingir e com muita frequência ultrapassa dois metros, porém só raras vezes ultrapassa os dez metros. Mineralogicamente, caracterizam-se pela presença de grãos muito resistentes mecânica e quimicamente na fração areia e pedregulho, e elevada porcentagem de partículas constituídas de hidróxidos e óxidos de Fe e Al na fração argila (partícula menor que dois μm). Os grãos mais finos estão agregados, formando uma massa de aspecto esponjoso cujos elementos constituintes lembram pipocas. Nessa estrutura analisando em escala macroscópica, nota-se a presença de torrões, que podem ser bastante resistentes à ação hídrica, e grande quantidade de vazios preenchidos de ar, o que justifica a sua baixa massa.

2.2.1 Aspectos mineralógicos dos solos lateríticos

Para Nogami e Villibor (1995), as variações nas constituições mineralógicas constatadas nos solos tropicais são muito maiores do que nos solos de outras regiões. Isso explica muitos dos

¹ Committee on Tropical Soils of ISSMFE (1985) Peculiarities of Geotechnical Behaviour of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. Progress Report, 1982-1985, ABMS, São Paulo.

comportamentos peculiares desses solos, o que justifica a importância de se considerar essa característica no estudo geotécnico dos solos tropicais. Ainda para os citados autores, os solos lateríticos apresentam uma mineralogia relativamente simples. As frações areia e pedregulho são compostas, em sua maioria, por concreções lateríticas e minerais pesados, como magnetita, ilmenita, turmalina e zircão etc.

Outra associação de minerais que frequentemente ocorre nos solos lateríticos, sobretudo na fração pedregulho, é a laterita ou concreção laterítica. É constituída essencialmente de óxidos hidratados de Fe e Al, podendo estar associada a outros minerais pesados. Um dos problemas relacionados à presença de laterita na fração areia e pedregulho dos solos é a sua grande variação de propriedades, o que dificulta a previsão de sua influência no comportamento global dos solos em que se integra. Na fração silte pode ocorrer a laterita (forma concrecionada de óxidos hidratados de ferro e alumínio), porém é difícil de ser distinguida dos torrões de argila.

Deve ser notado também que nas frações areia, pedregulho e silte é comum a ocorrência de quartzo, sendo que, no caso da fração areia, ele tem peculiaridades que permitem identificar o caráter laterítico do solo.

No caso da fração argila seus principais constituintes podem ser classificados como constituintes minerais (argilominerais, óxidos e hidróxidos de Fe e Al) e orgânicos. Os argilominerais são encontrados em porcentagens elevadas, enquanto que os orgânicos têm participação eventual.

Os argilominerais são silicatos de Al hidratados, podendo conter pequena quantidade de elementos alcalinos (K, Na, Li) e alcalinos terrosos (Ca e Mg, principalmente). O argilomineral predominante na fração argila é a caulinita, cuja unidade estrutural é 1:1, que devido à forte ligação do tipo ponte de hidrogênio proporciona ao argilomineral pequena atividade coloidal. No caso dos solos lateríticos essa atividade é ainda mais reduzida em virtude do envolvimento da caulinita pelos óxidos e hidróxidos que dão o aspecto de pipoca já citado anteriormente.

Os óxidos e hidróxidos de Fe hidratados na fração argila dos solos tropicais, e de maior interesse na área geotécnica, são a goethita, a limonita e ferrihidrita. Quanto aos hidróxidos de Al podem ser citados o diásporo e bohemita e a gibbsita. Ressalta-se que os óxidos e hidróxidos de Fe e de Al hidratados possuem propriedades cimentantes, desempenhando

importante papel na formação de agregados e concreções lateríticas nos solos lateríticos. Os óxidos de Fe também contribuem com a cor vermelha e vermelha amarela dos solos enquanto que os óxidos de Al contribuem para a cor amarelada com eventuais propriedades pozolânicas, de acordo com Nogami e Villibor, 1995.

Os solos lateríticos sofrem contribuição eventual das substâncias orgânicas, sob a forma de húmus, na sua fração argila. O húmus tem uma atividade coloidal acentuada, entretanto em razão da sua ocorrência em pequena porcentagem nos solos lateríticos, ele contribui muito pouco nas características mecânicas e hidráulicas desses solos.

2.2.2 Aspectos químicos dos solos lateríticos

O intemperismo químico promove a produção de novos minerais. Essa intemperização é uma associação dos processos de alteração dos silicatos e migração e acumulação das novas substâncias. Nas regiões tropicais, a alteração dos silicatos se dá com predomínio da hidrólise, pois com a dissociação da água, os íons H^+ e OH^- se unem aos minerais dos silicatos, formando produtos secundários. O ciclo de molhagem e secagem, típico das regiões tropicais, promove o ataque dos minerais silicatados, como bases, ferro, alumínio e silício, dentre outros.

A alteração dos silicatos de alumínio leva a eliminação da sílica original e a manutenção dos hidróxidos de alumínio, fenômeno denominado hidrólise total ou ainda alitização ou ferralitização, coincidente com o conceito de laterização.

Além dessas reações químicas citadas, segue-se a migração e a acumulação dos novos minerais. A migração é o deslocamento de substâncias no estado solúvel ou coloidal, pela água que circula no solo e a acumulação é a precipitação destas substâncias em diferentes horizontes daqueles em que foram formados. O horizonte de eluviação é o de onde partem as substâncias (horizonte A) e o de iluviação é onde as substâncias se depositam (horizonte B). Segundo Sousa (1980), as substâncias capazes de migrar são as bases alcalinas (K, Na) e alcalinas terrosas (Ca, Mg), certos eletrólitos (cloretos, sulfatos, carbonatos), os sesquióxidos (Fe, Mn, Al), o húmus, a argila e a sílica. O processo de migração é influenciado pela pluviometria e drenagem, pelas condições hidrológicas, pH e natureza do húmus.

A acumulação das substâncias migratórias ocorre pela presença de soluções ou pseudo-soluções, pela mudança para outro horizonte que favoreça a precipitação ou ainda em razão das alterações sazonais. As condições de pH e hidratação são citadas por Sousa (1980) como as principais responsáveis pelo fenômeno da acumulação.

O processo de queluviação é um caso particular de migração em que certos elementos, como o ferro e o alumínio, migram sob a forma de complexos organometálicos ou quelatos e tendem a se concentrar no perfil de alteração.

2.2.3 Peculiaridades dos solos tropicais e os reflexos na aplicação das classificações geotécnicas tradicionais

O berço da Mecânica dos Solos Tradicional é a região de clima temperado, portanto a ciência foi desenvolvida baseando-se nesses solos. Já se sabe que os solos tropicais apresentam comportamento diferente dos daqueles onde surgiu a ciência, em virtude do processo de formação, tipo de rocha, condições climáticas desencadeando numa composição química e a estrutura diferenciada. Propriedades como expansão, colapso e erodibilidade não são analisadas nos ensaios das metodologias tradicionais e, portanto não traduzem corretamente o comportamento dos solos tropicais.

Cozzolino e Nogami (1993) citam que a agregação dos finos nos solos lateríticos é um importante aspecto de influência na identificação e classificação tradicional. Estes solos, por terem uma forte agregação das partículas, ao sofrerem destruição das mesmas por causa dos processos de ensaio, apresentam resultados bastante diferenciados, em particular das propriedades índice. É o caso das determinações granulométricas, pois o uso de defloculantes e os seus diversos componentes químicos, o processo e o tempo de dispersão mecânica e o tipo de solo são práticas que conduzem ao desmembramento das agregações, resultando numa ampla dispersão de resultados nas frações do solo. Também o ensaio para determinação do limite de liquidez (w_L) que exige espatulação até a completa homogeneização da amostra, promove alterações no solo formado em ambiente tropical trazendo reflexos na sua classificação.

Nogami e Villibor (1995) à época não consideravam inteiramente esclarecidos a interferência da disposição espacial dos constituintes do solo nos valores de w_L e IP. As suspeitas recaíam sobre as formas e dimensões dos agregados, as suas irregularidades superficiais, os seus

vazios internos, as suas cargas elétricas negativas relativamente reduzidas e a diminuta dimensão dos seus elementos constituintes.

Outra suposição apresentada por Cozzolino e Nogami (1993) é que, como as partículas menores dos solos lateríticos não apresentam a forma de placa, há a possibilidade daquelas terem os vazios internos preenchidos com água, influenciando no w_L . Segundo Nogami e Villibor (1995), a experiência tem mostrado que a destruição dos agregados eleva os w_L e a percentagem que passa na peneira 0,075 mm (# 200), porém sem alterar significativamente o Limite de Plasticidade (w_P). Esses aumentos, entretanto, não têm ocasionado expansões significativas nas amostras compactadas.

Ainda com relação à agregação dos finos típica dos solos lateríticos, Nogami e Villibor (2009) registram que, no caso do uso de bases de Solos Arenosos Finos Lateríticos (SAFL), os limites de consistência mais relevantes, o w_L e o IP, apresentam uma pequena reprodutibilidade dos seus resultados, o que foi confirmado pelos estudos desenvolvidos pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), ambos de São Paulo. Para Gidigas (1976² *apud* VILLIBOR e NOGAMI, 2009), a pequena reprodutibilidade dos resultados dos ensaios de plasticidade de alguns solos lateríticos ocorre devido à tendência de alteração da plasticidade à medida que se mistura ou molda esses solos antes do ensaio. A discrepância dos resultados entre os laboratórios traz reflexos nas etapas posteriores, pois acarreta sérias dificuldades na seleção e uso de jazida, respectivamente na fase de projeto e construção do pavimento.

Outro item considerado por Cozzolino e Nogami (1993) na influência da classificação geotécnica é a constituição diversificada das partículas que compõem a fração argila dos solos lateríticos. Capilaridade, tensão superficial, superfície específica e pH são alguns dos “fenômenos” que afetam os componentes das argilas, levando-as a um comportamento diversificado.

Similar ao que foi apresentado com relação aos limites de consistência, o uso da fração que passa na peneira 0,0075 mm (# 200), também é razão de divergência. Apesar da Mecânica dos Solos Tradicional prever que as características do silte e da argila ou ambos, materiais passantes naquela peneira, serem muito variadas e apresentarem propriedades e

² GIDIGASU M. D. Laterite Soil Engineering. Elsevier, Amsterdam, 1976.

comportamentos bem diferentes, este é um dos índices mais usados na escolha de solos para obras viárias e nas classificações geotécnicas. Esta diferença pode ser detectada, ainda que com limitações, pela consideração do w_L e do IP.

Além da classificação e identificação dos solos, o w_L e o IP têm também sido usados para avaliar a variação de volume dos solos compactados, como consequência da variação do teor de umidade por secagem (contração) ou umedecimento (expansão). Como as variações de volume não são desejáveis, sobretudo nas camadas subjacentes ou constituintes dos pavimentos, as normas tradicionais estabeleceram intervalos de valores para o w_L e o IP de modo a enquadrar as variações de volume nos padrões aceitáveis. Entretanto, as observações de campo e dos dados laboratoriais não comprovaram o que se esperava com o atendimento dos limites estabelecidos para os solos tropicais. E isso se deve às características destes solos e às condições ambientais tropicais bastante diferentes das regiões onde estas normas foram estabelecidas.

Com relação aos solos saprolíticos, Tubey (1961³ *apud* COZOLLINO e NOGAMI, 1993) revela que a fração silte destes solos frequentemente contém mica e macrocristais de caulinita, associados a haloisita, que influenciam no comportamento dos mesmos. Os siltes desses minerais, sem a fração argila, podem apresentar plasticidade, tornando discutível a validade das leis que regem a atividade coloidal. Também a validade do princípio do gráfico da plasticidade fica prejudicado com a presença de areia de mica, interferindo diretamente no IP ou w_L . Essas particularidades interferem, como vem sendo apresentado, na classificação deste tipo de solo.

2.2.4 Classificação segundo Duchaufour

De acordo com Fookes (1997), existem diversos sistemas de classificação disponível para o estudo dos solos tropicais, mas nenhum ainda é aceito ou usado universalmente. Duchaufour (1982⁴ *apud* FOOKES, 1997) distinguiu três fases do desenvolvimento de solo residual em áreas tropicais, sendo a primeira originando os solos fersialíticos; a segunda, os solos

³ Tubey, L. W. Laboratory Investigation to Determine the Effect of Mica on Properties of Soils and Stabilized Soils. Note 4077, Road Research Laboratory. U. K. *Apud* Gidigas, M. D., *Laterite Soil Engineering*, p.247, Elsevier, Amsterdam, 1961.

⁴ Duchaufour, P. 1982. *Pedology Pedogenesis and Classification* (English Edition Trans. T. R. Paton). George Allen and Unwin, London.

ferruginosos e a terceira e última fase os solos ferralíticos. Estas fases são caracterizadas pelo aumento do intemperismo dos minerais primários, aumento da perda de sílica e incremento do domínio de novos argilominerais formados dos materiais dissolvidos.

Das três fases, a que interessa para o desenvolvimento desta dissertação é a terceira, por serem solos formados em ambientes quentes e úmidos, condições que se assemelham às das regiões tropicais. Estes solos apresentam perfis com vários metros de espessura. Todos os minerais primários, exceto o quartzo, são intemperizados por hidrólise em condições neutras e uma fração considerável de sílica e das bases são removidas em solução. A fração de sílica remanescente pode combinar com o alumínio e formar a caulinita, mas usualmente existe um excesso de alumínio que forma a gibbsita.

2.3 METODOLOGIA MCT DE CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS

2.3.1 Generalidades

A constatação das divergências de resultados e de comportamento dos solos tropicais comparados aos dos solos de clima frio e temperado instigaram Nogami e Villibor a encontrar uma metodologia que caracterizasse mais adequadamente os solos tropicais. Isso resultou no desenvolvimento de uma metodologia, a MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) que será apresentada posteriormente.

2.3.2 A Metodologia MCT e a classificação geotécnica

Segundo Villibor e Nogami (2009), a classificação MCT foi divulgada pela primeira vez em 1981 no Simpósio de Solos Tropicais em Engenharia (COPPE/UFRJ) e após esta data algumas alterações foram apresentadas até atingir o formato atual. Como já comentado, a metodologia MCT é uma alternativa para sanar as limitações dos métodos de classificação convencionais não apropriadamente adotados para os solos tropicais.

Para envolver as peculiaridades dos solos de ambientes tropicais, esta metodologia foi desenvolvida baseada numa série de ensaios e procedimentos que reproduzem as condições em campo de camadas destes tipos de solos compactados, aferindo as suas propriedades

geotécnicas, mecânica e hidráulica. O conjunto de ensaios é executado em corpos de prova de dimensões reduzidas e são os seguintes: ensaio de compactação mini-MCV, perda de massa por imersão, mini-CBR e expansão e contração. Os itens seguintes apresentam de forma resumida os dois primeiros ensaios citados.

2.3.2.1 Ensaio de compactação Mini-MCV

O ensaio de compactação Mini-MCV é originário do experimento inglês MCV (*Moisture Condition Value*). Este ensaio foi concebido em 1976 por Parsons, engenheiro inglês do TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*), para uma avaliação rápida e segura das condições de umidade do solo para fins de terraplenagem. Em 1979, Parsons e Bodem indicaram a possibilidade do uso deste ensaio para uma nova classificação de solos.

Sob a orientação de Nogami, Sória e Fabbri utilizaram o princípio do ensaio MCV adaptado ao equipamento de compactação de corpos de prova de dimensões reduzidas. Este novo ensaio foi chamado Mini-MCV e consiste basicamente em determinar os esforços de compactação em termos de número de golpes necessários para compactação de uma amostra de solo.

Posteriormente, em 1985, foi apresentada uma versão do MCV de porte ainda menor, denominada Sub-MCV, desenvolvida com o objetivo de tornar as determinações necessárias à classificação mais rápidas e simples.

Os procedimentos de laboratório que visam a classificação do solo de acordo com a metodologia MCT são realizados em corpos de prova em cilindros de 50 mm de diâmetro interno. Neste ensaio é utilizado um processo de compactação que permite que a medição da altura do corpo de prova resultante após um conjunto de golpes aplicados. A densidade do corpo de prova tende a um valor próximo da condição de saturação. Para cada teor de umidade há uma energia (número de golpes) que leva a amostra a este estado de compactação.

De acordo com a metodologia proposta, a compactação Mini-MCV deve ser iniciada com a preparação de, no mínimo, 5 porções de solo com umidade variada. Iniciando-se pela porção de menor umidade, deve-se acondicionar sempre a mesma quantidade de solo úmido (200 g) em um cilindro posicionado no equipamento de compactação. Depois de aplicado um golpe inicial de um peso padrão caindo de uma altura padronizada, mede-se a altura A_i (altura inicial) do corpo de prova. Em seguida é aplicada uma série crescente de golpes de acordo

com a seguinte sequencia: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256, fazendo-se as leituras das alturas A_f (altura final) ao final de cada série de golpes. Quando a diferença da altura observada entre duas séries de golpes sucessivas for menor que 0,1 mm, ou quando o número de golpes atingir 256 ou então for observada a expulsão de água do corpo de prova, a compactação pode ser encerrada. Este procedimento é repetido para os diferentes teores de umidade.

O ensaio de compactação fornece os seguintes dados: número de golpes e o afundamento, $A_n - A_{4n}$, e o teor de umidade e a massa específica aparente seca. Os dois primeiros resultados são lançados num diagrama em cujo eixo das abcissas, parte superior do gráfico, é registrado o número de golpes e no eixo das ordenadas o valor correspondente à diferença de leitura $A_n - A_{4n}$. Para cada curva de deformabilidade, como também é chamada, é determinado o valor de Mini-MCV, de acordo com a equação 2.2 bastando para isso verificar o ponto onde a curva intercepta a reta de equação $a = 2$ mm, paralela ao eixo horizontal, e desta intersecção descer até o eixo das abcissas e obter o valor do número de golpes.

$$Mini - MCV = 10 \times \log_{10} (n^o \text{ golpes}) \quad (2.2)$$

O coeficiente c' é determinado a partir da inclinação da reta tangente às curvas de afundamento e passa pelo afundamento igual a 2 mm e pelo Mini-MCV = 10. Este coeficiente é um valor de inclinação que representa a tendência de todas as curvas.

Para a determinação de d' é traçado um outro gráfico, denominado curva de compressibilidade. Nele é plotado, no eixo das abcissas, o teor de umidade e no eixo das ordenadas a massa específica aparente seca para os diversos níveis de energia representados pela série de golpes aplicados. Dessa forma cada curva corresponde a um determinado número de golpes. O valor de d' é o coeficiente angular da parte mais inclinada do ramo seco da curva correspondente a 12 golpes e deve ser expresso em kg/m^3 .

❖ Perda de massa por imersão

Os corpos de prova, após serem compactados no ensaio de Mini-MCV, são extrudados 10 mm do molde, com o uso de um extrator. Os moldes com os corpos de prova são transferidos para um tanque, na posição horizontal, localizados alguns centímetros acima do recipiente coletor da massa desprendida e imersos em água, por um período mínimo de 12 h. Após este tempo, o material desprendido é retirado, secado em estufa e pesado.

O valor da perda de massa por imersão (P_i), expresso em percentagem, é determinado, para cada teor de umidade, pela equação 2.3.

$$P_i = \frac{M_d}{M_s} \times f \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

M_d = massa seca eventualmente desprendida (g);

M_s = massa seca da parte extrudada do corpo de prova (g) e

f = fator de correção que assume o valor de 0,5 quando há desprendimento de blocos cilíndricos coesos (em forma de uma bolacha) e 1 para os outros casos.

Os valores da perda de massa por imersão para cada teor de umidade são traçados na curva Mini-MCV x P_i . O valor do coeficiente P_i do solo ensaiado será obtido da curva de Mini-MCV = 10 ou Mini-MCV = 15, que dependerá da densidade do solo, se alta ou baixa. Se a altura do corpo de prova compactado for maior que 48 mm, a densidade é baixa e a curva adotada é a do Mini-MCV = 10. Se a altura na condição especificada no item anterior for menor que 48 mm, a densidade é alta e a curva adotada é a de Mini-MCV = 15.

O cálculo do valor característico da perda de massa por imersão de um solo, conforme apresentado anteriormente, em conjunto com o valor do coeficiente d' , permite a determinação do coeficiente e' . Este coeficiente é obtido pela equação 2.4.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (2.4)$$

Onde:

P_i = perda de massa por imersão;

d' = inclinação do ramo seco da curva de compactação, correspondente à energia de 12 golpes, no ensaio de mini-MCV.

A Figura 2.3 apresenta o gráfico do ensaio Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão de um solo laterítico.

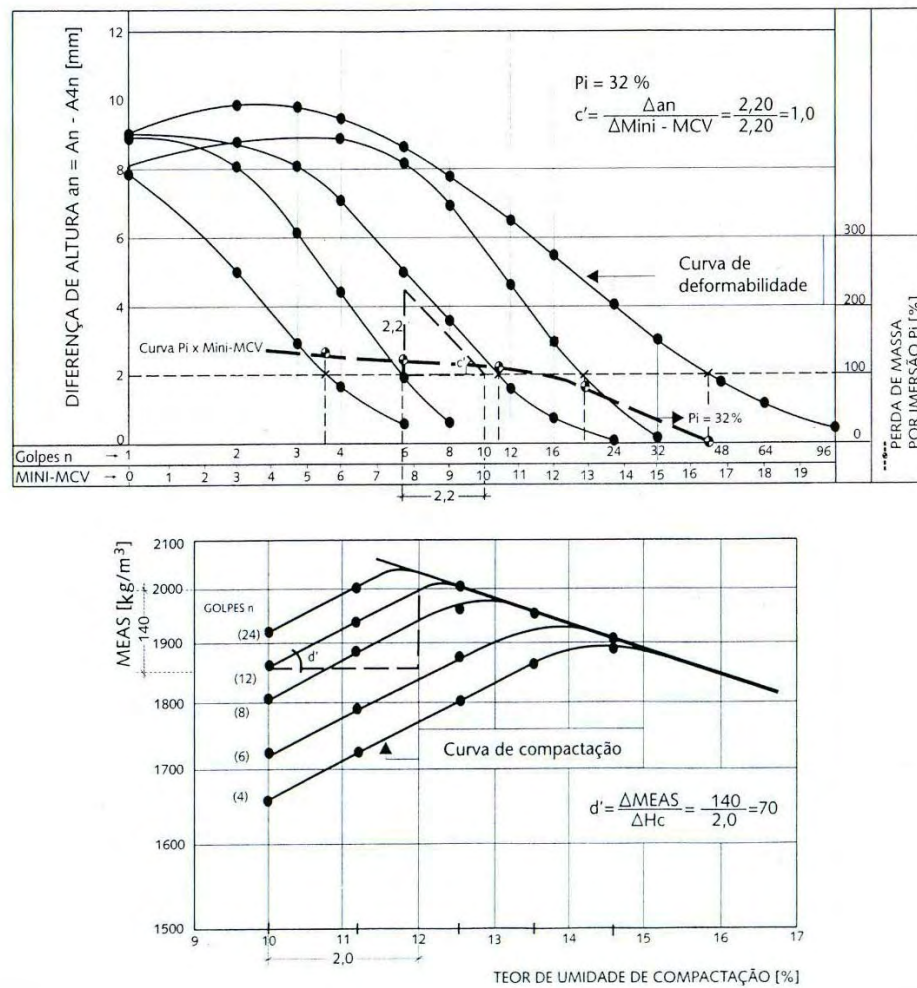


Figura 2.3 – Gráfico de ensaio Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão de um solo laterítico. Fonte: Villibor e Nogami (2009).

De posse dos resultados obtidos dos ensaios que compõem a referida metodologia, é possível, a partir do gráfico apresentado na Figura 2.3, diferenciar os solos de comportamento laterítico dos não lateríticos. Neste gráfico, no eixo das abcissas são plotados o coeficiente c' , obtido do ensaio de compactação mini-MCV, e no eixo das ordenadas, o índice e' .

Nos Quadros 2.4 e 2.5 são apresentados os valores típicos de c' e d' para diferentes granulometrias, adaptado de Nogami e Villibor (1995). Para estes pesquisadores, os índices c' e e' , da classificação MCT expressam o grau de argilosidade do solo e o caráter laterítico, respectivamente. Como os solos de comportamento laterítico apresentam $d' > 20$ e $Pi < 100$, os autores da metodologia estabeleceram uma linha horizontal correspondente a $e' = 1,15$. Esta é a linha representada no Gráfico da Classificação MCT por uma linha tracejada que separa os solos de comportamento laterítico e não laterítico.

Tipo de solo	Coefficiente c'
Argilas e solos argilosos	$c' > 1,5$ (elevado)
Solos de vários tipos granulométricos como: areias argilosa, argila siltosa, argila arenosa, etc	$1,0 < c' < 1,5$
Areias e siltes não plásticos ou poucos coesivos	$c' < 1,0$ (baixo)

Quadro 2.4 – Valores típicos de c' para diferentes granulometrias (Adaptado de Nogami e Villibor, 1995)

Tipo de solo	Coefficiente d'
Argilas lateríticas	Geralmente $d' > 20$
Argilas não lateríticas	Não atingem o valor anterior, frequentemente possuem valores $d' < 10$
Areias puras	d' baixo
Areias finas argilosas	d' muito elevado (pode ultrapassar a 100)
Siltosos, micáceos e/ou caulíníticos	d' muito pequeno, frequentemente $d' < 5$

Quadro 2.5 – Valores típicos de d' para diferentes granulometrias (Adaptado de Nogami e Villibor, 1995)

Um dos resultados desta metodologia é a classificação dos solos tropicais em duas grandes classes, a saber: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são divididos em três subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA') e solos argilosos lateríticos (LG'). Os de comportamento não laterítico são subdivididos em quatro subclasses: areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA'), solos siltosos não lateríticos (NS') e solos argilosos não lateríticos (NG). A Figura 2.4 apresenta o gráfico de classificação dos solos tropicais pela metodologia MCT.

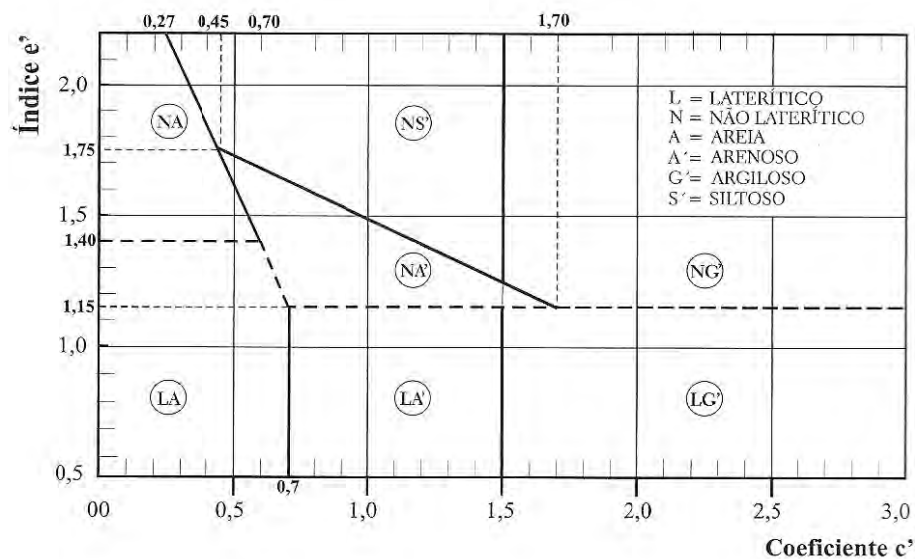


Figura 2.4 – Gráfico da classificação de solos pelo sistema MCT. Fonte: Villibor e Nogami (2009)

O termo “comportamento” utilizado na nomenclatura da metodologia tem o objetivo de enfatizar que a classificação está baseada nos resultados observados no comportamento geotécnico e não exclusivamente na sua natureza genética do solo estudado.

No tocante a relação entre o tipo de solo e o coeficiente c' , Barroso (2002) cita os seus estudos com solos compostos em laboratório, onde foram alterados o tipo e o teor da fração fina presente em cada solo. Para ela, este índice nem sempre traduziu a argilosidade, pois na maioria dos casos estudados no seu trabalho, o valor de c' não foi diretamente proporcional à quantidade da argila presente nas misturas.

2.3.2.2 Aplicação dos solos tropicais em pavimentação

Os solos de comportamento laterítico cujas propriedades de interesse da engenharia de pavimentos são sua elevada capacidade de suporte quando ensaiados no Mini-CBR, pequena perda desta capacidade por imersão em água e baixa expansão volumétrica.

Os solos de comportamento não laterítico são representados em sua maioria por solos saprolíticos, além dos solos superficiais do referido comportamento. Os primeiros apresentam grandes variações de ocorrência, de propriedade e de comportamento. Já os solos superficiais não lateríticos, de uma maneira geral, apresentam propriedades e comportamento semelhantes aos dos solos de clima temperado. As propriedades dos solos de comportamento não laterítico de interesse da engenharia de pavimentos são a variada capacidade suporte quando ensaiados no Mini-CBR, grande perda de capacidade por imersão e expansão volumétrica variável, de baixa a muito elevada.

No Quadro 2.6 são apresentados os valores das propriedades dos diversos grupos da classificação MCT, incluindo o nível de prioridade dos solos para os usos em pavimentação e a correlação com as classificações tradicionais.

DESCRIÇÃO			GRANULOMETRIAS TÍPICAS						
k = caolínico s = sericítico m = micáceo q = quartzo			areias siltes (q,s)	areias siltsosas	siltes (k, m) siltes arenosos	argilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos	areias	areias argilosas	agilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
PROPRIEDADES	Mini-CBR (%)	Sem imersão	M, E	E	M, E	E	E	E, EE	E
		Perda por imersão	B, M	B	E	E	B	B	B
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE. (k)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEFIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B, M	E	M, E	B	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito Elevado E = Elevado M = Médio B = Baixo						
UTILIZAÇÃO	Base de pavimento		n	4º	n	n	2º	1º	3º
	Reforço do subleito compactado		4º	5º	n	n	2º	1º	3º
	Subleito compactado		4º	5º	7º	6º	2º	1º	3º
	Aterro (corpo) compactado		4º	5º	6º	7º	2º	1º	3º
	Proteção à erosão		n	3º	n	n	n	2º	1º
	Revestimento primário		5º	3º	n	n	4º	1º	2º
n = não recomendável									
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		SUCS	SP SM	MS SC ML	SM, CL ML, MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
		AASHTO (TRB)	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

Quadro 2.6 – Dados diversos grupos de solos da classificação MCT. Fonte: Villibor e Nogami (2009)

Como exemplo dessa aplicação, pode ser citado que o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) (2005) definiu os critérios para utilização dos solos de comportamento laterítico e brita descontínua para o uso em sub-base e base em obras rodoviárias sob a sua jurisdição baseando-se na classificação MCT. De acordo com este departamento, os Solos Arenosos Finos Lateríticos (SAFL) ideais devem ser enquadrados com LA', LA ou LG' e sempre que possível obedecer a seqüência apresentada na Figura 2.5.

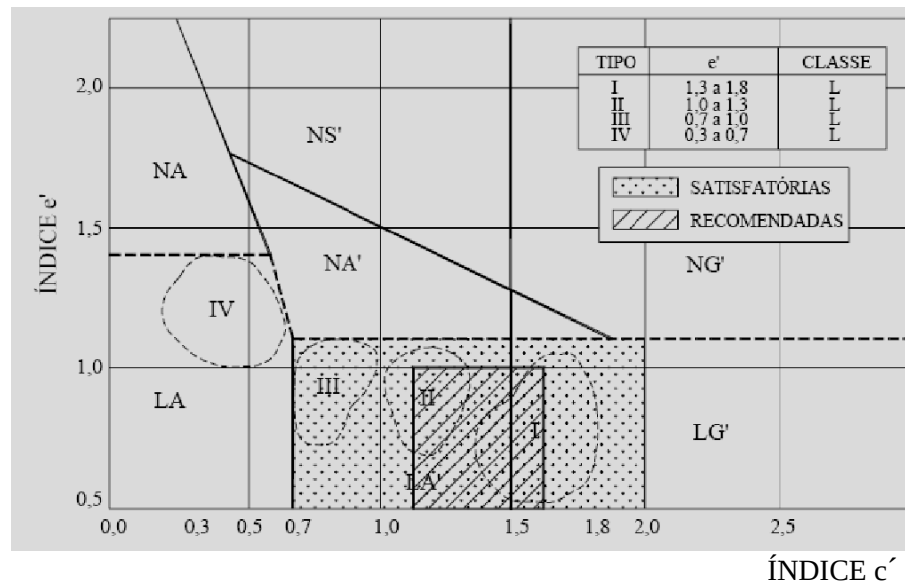


Figura 2.5 – Hierarquização de SAFL para uso em pavimentação de acordo com a classificação MCT. Fonte: DER-SP (2005)

2.3.3 Método das pastilhas para identificação expedita do grupo MCT

De acordo com Villibor e Nogami (2009) várias tentativas têm sido feitas no sentido de se obter a classificação MCT, de forma rápida e expedita. No caso desta dissertação destaca-se o método das pastilhas. Em 1985, Nogami e Cozzolino, iniciaram o desenvolvimento do método que mais tarde passou a ser conhecido como Método Expedito da Pastilha para uma identificação rápida dos solos tropicais, a ser aplicada na fase de realização de estudos geotécnicos para fins de pavimentação. Constava de determinações rápidas e simples, baseadas em índices empíricos e determinações qualitativas, podendo ser executada no campo e a baixo custo.

De acordo com Castro (2002), o Método Expedito das Pastilhas caracterizava-se pelo caráter preliminar dos resultados que eram obtidos, cuja confiabilidade apresentava diferentes graus. Os solos de comportamento laterítico, argilosos ou argilo-arenosos, assim como os de comportamento não laterítico, em suas variedades siltosas ou argilas expansivas, proporcionavam uma boa caracterização pelo método expedito graças aos seus comportamentos típicos. Em casos duvidosos, recomendava-se a utilização de métodos mais completos e que envolvessem a avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas.

Fortes (1990) e Fortes e Nogami (1991⁵ *apud* FORTES et al., 2002) fizeram uma revisão do Método Expedito das Pastilhas de modo a permitir a identificação dos grupos MCT, o que pela proposta inicial não era possível. Apresentaram uma proposta para o procedimento de ensaio e de identificação dos solos de comportamento laterítico e não laterítico, que mantinha os mesmos princípios do método preliminar: determinações rápidas e simples, utilizando equipamentos simples, facilmente transportáveis e com a possibilidade de execução em campo. A partir disso, Nogami e Villibor (1994) e Nogami e Villibor (1996⁶ *apud* FORTES et al., 2002), apresentaram simplificações do método, conseguindo obter a identificação dos grupos MCT através de determinação do valor da contração diametral e da penetração, e empregando a carta de Classificação. Fortes (1997) apresentou uma proposta de normalização e desde então esta metodologia para procedimento expedito de investigação geotécnica passou a ser bastante utilizada, com sucesso, em todo o país, em locais onde ocorrem solos tropicais, principalmente na hierarquização de jazidas de solos. Como exemplo, pode ser citado que o Desenvolvimento Rodoviário S. A. (DERSA) (s/a) elaborou diretrizes usando o método das pastilhas para identificação dos solos no Trecho 30-Sul do Rodoanel Mário Covas.

Segundo Castro (2002), além da simplicidade e rapidez na obtenção de resultados, a vantagem da utilização de um método expedito de classificação de solos durante a fase preliminar de projeto reside no fato desta metodologia proporcionar uma pré-qualificação dos solos a serem estudados de forma mais aprofundada em fase posterior, a fase de projeto. Neste sentido, aqueles solos que se mostram mais promissores para a aplicação em vista, devem ser priorizados para a realização de estudos mais detalhados, em que se aplicam métodos mais completos.

Fortes et al. (2002) fizeram um estudo comparativo entre o método da pastilha e a metodologia MCT classificatória, convencional, para 34 amostras diferentes e observaram que as discrepâncias de classificação são mais representativas para os solos arenosos, quer possuam ou não comportamento laterítico, mesmo que as suas propriedades não difiram muito. Os demais resultados foram considerados coerentes levando em consideração que o

⁵ FORTES, R.M.; NOGAMI, J.S. – “Método Expedito de identificação do grupo MCT de Solos Tropicais utilizando anéis de PVC rígido”. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação – São Paulo, 1991, v.1, p. 591-604.

⁶ NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. – “Importância e determinação do Grau de Laterização em Geologia de Engenharia”. VIII Congresso da ABGE – Rio de Janeiro, Brasil, Anais vol. 1, 345/358, 1996.

método da pastilha é utilizado para identificação preliminar de solos conforme afirmam os autores.

Para Castro (2002), os procedimentos previstos no referido método para a classificação geotécnica dos solos permitem a observação de seu comportamento segundo os parâmetros de umidade de moldagem, contração diametral da pastilha, tempo de ascensão da frente de umidade, expansão diametral, resistência a penetração e a quantidade de água reabsorvida pela amostra.

A metodologia do ensaio das pastilhas será descrito com mais detalhes no capítulo 4. Cabe neste tópico relatar que o solo passado na peneira 0,42 mm é umedecido e espatulado até atingir a consistência pastosa preconizada pelo método. Nesta condição pequenas esferas são moldadas em anéis plásticos de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Esses corpos de provas são submetidos à secagem, em que é determinada a contração diametral (C_d), e em seguida à embebição em água para a determinação da penetração. O valor de C_d apresenta uma correlação razoável com o coeficiente c' do eixo x, e a consistência, determinada sob a forma de penetração, com o coeficiente e' do eixo y, da metodologia MCT classificatória.

Os resultados de C_d e penetração são traçados na Carta de Classificação do Método das Pastilhas apresentados na Figura 2.6 permitindo a identificação do grupo ao qual o solo amostrado pertence. O valor de c' é calculado através das equações 2.5 e 2.6 apresentadas a seguir.

$$0,1 \text{ mm} \leq C_d \leq 0,5 \text{ mm} \quad c' = \left(\frac{1 + \log_{10} C_d}{0,904} \right) \quad (2.5)$$

$$C_d \leq 0,6 \text{ mm} \quad c' = \left(\frac{0,7 + \log_{10} C_d}{0,5} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

C_d = contração diametral (mm)

Fortes e Binotto (2006) estudaram o comportamento de duas amostras de solos do litoral paulista em termos de erosão e instabilidade, segundo a metodologia MCT. Para isso aplicaram soluções de estabilização com adição de cimento Portland e soluções químicas estabilizantes e concluíram que o ensaio da pastilha, desde que feitas algumas adaptações, pode também ser utilizado como um estudo preliminar de dosagem para estabilização de solos.

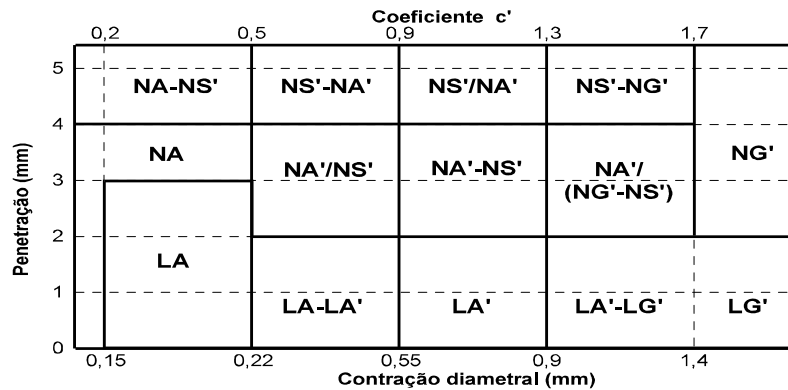


Figura 2.6 – Carta de Classificação do Método da Pastilha. Fonte: Fortes et al. (2002)

2.3.4 Índices Ki e Kr

É sabido que na gênese dos solos tropicais estes atingem níveis diferenciados de intemperização. A mineralogia destes solos é normalmente composta por minerais como goetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$), hematita (Fe_2O_3), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), quartzo (SiO_2), e opacos, como a ilmenita e a magnetita. Em virtude do processo genético e da mineralogia resultante do mesmo, as determinações da composição mineralógica e dos índices a ela relacionados fornecem, para alguns pesquisadores, importantes resultados que permitem a avaliação do nível de intemperização de um solo. Um destes índices é o Ki, que de acordo com Kehrigh (1949⁷ *apud* IBGE, 2005), foi originalmente proposto por Harrassovitz para indicar a relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ da fração argila do solo. De acordo com Araki (1997), Galvão et al. (2007) dentre outros, o índice Ki fornece uma indicação do grau de alteração ou intemperismo de solos tropicais ou mesmo um indicador do processo de dessilificação dos solos. Ele representa a variabilidade relativa nos conteúdos de SiO_2 e Al_2O_3 , sendo este último associado à caulinita e gibbsita. O índice Ki é calculado a partir da relação transcrita na equação 2.7 a seguir:

$$Ki = 1,7 \times \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} \quad (2.7)$$

Estabelecendo uma faixa de valor, Araki (1997) registrou o intervalo entre 1,33 e 2,0 como o característico de solo intemperizado. Também estabelecendo limites de valores, para o

⁷ KEHRIG, A. G. As relações Ki e Kr no solo. Ministério da Agricultura, Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Bol. Inst. Quím. Agric. n. 13, 1949, 67p.

IBGE (2005), o índice Ki da caulinita, que é igual a 2,0, foi tomado como referência para estabelecer o limite entre solos muito intemperizados ($Ki \leq 2,0$) e pouco intemperizados ($Ki > 2,0$). Ainda de acordo com o IBGE (2005), no Brasil, o Ki é um dos referenciais empregados na definição do horizonte B latossólico ($Ki \leq 2,2$).

Outro índice que pode ser obtido a partir da composição mineralógica é o Kr que estabelece a relação molecular entre sílica e sesquióxidos de ferro e alumínio. De acordo com o MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994), Kr é calculado conforme apresenta a equação 2.8. Os números 60, 102 e 160 são os pesos moleculares dos óxidos de sílica, alumínio e ferro, respectivamente.

$$Kr = 1,7 \times \frac{\frac{\%SiO_2}{60}}{\frac{\%Al_2O_3}{102} + \frac{\%Fe_2O_3}{160}} \quad (2.8)$$

O Quadro 2.7 apresenta um resumo das classificações do solo de acordo com o nível de intemperização, baseando em Ki ou Kr de acordo com Resende e Santana (1988), Fookes (1997) e o IBGE (2005).

Fonte	Ki	Kr	Tipo de solo
Resende e Santana (1988)	Ki > 0,75	Kr > 0,75	Cauliníticos
	Ki > 0,75	Kr ≤ 0,75	Cauliníticos-oxídicos
	----	Kr ≤ 0,75	Oxídicos
	Ki ≤ 0,75	Kr ≤ 0,75	Gibbsíticos
Fookes (1997)	---	Kr < 2,0	Ferralíticos ricos em óxidos, ferrisolos e alguns solos ferruginosos.
	---	Kr > 2,0	Fersialíticos e ferruginosos.
	---	Kr < 1,33	Ferrites, ferralitos e alitas e a maioria dos solos ferralíticos endurecidos.
IBGE (2005)	Ki ≤ 2,0	---	Solos muito intemperizados
	Ki > 2,0	---	Solos pouco intemperizados

Quadro 2.7 – Tipo de solo de acordo com os intervalos de Ki e Kr, segundo Resende e Santana (1988), Fookes (1997) e IBGE (2005)

Os intervalos dos índices Ki e Kr apresentados no Quadro 2.7 nem sempre dão indícios seguros do nível de intemperização dos solos. Graft-Johnson et al. (1972⁸ *apud* MAHALINGA-IYER e WILLIAMS, 1997), estudaram os cascalhos lateríticos de Gana e registraram a relação sílica-sesquióxidos variando entre 2,5 e 6,0, devido a presença de quartzo, valores considerados bem superiores ao estabelecido para solos lateríticos. Apesar do material não ser indicado para uso em pavimentação, ele foi aplicado em obras desta natureza e apresentou uma resistência mecânica bem alta e um desempenho muito bom nos pavimentos rodoviários.

Um aspecto que pode ser levantado é se os índices, Ki e Kr, em cascalhos podem ser usados como indicadores de intemperização já que os autores do estudo consideraram preliminarmente se tratar da avaliação de cascalho laterítico para construção de rodovias, conforme título do artigo.

Também Mahalinga-Iyer e Williams (1997) se depararam com essa divergência ao estudarem o solo laterítico de Greenswamp na região de Queensland, Austrália, com o intuito de discutir as propriedades e desempenho de rodovias pavimentadas. O solo estudado, formado a partir de um arenito, consistia de 16% de Fe_2O_3 , 66% de SiO_2 e 10% de Al_2O_3 e apresentava uma relação sílica-sesquióxido 2,51, valor superior a 2 que é o estabelecido, por alguns pesquisadores, para a definição de solo laterítico. Entretanto Mahalinga-Iyer e Williams observaram que os grãos de quartzo juntamente com a caulinita estavam envolvidos por óxidos de ferro e no processo de preparação da amostra para a análise química o quartzo era esmagado resultando em teor elevado de sílica e em consequência alto valor de Kr. A precisão do diagnóstico se deu graças a constatação de que a hematita segregada da matriz apresentava-se como uma película, denotando um bom estado de laterização.

Nessa mesma linha de raciocínio, Batalione (2007) desenvolveu um estudo técnico sobre a utilização de rejeitos finos de pedreira na estabilização de quatro solos tropicais da região noroeste de Goiás, sendo três deles finos e um cascalho. Dentre as diversas análises, foram feitas as determinações de Ki e Kr das amostras de três solos finos, um cascalho e um rejeito de pedreira, obedecendo a metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), (1997). O pesquisador analisando os coeficientes Ki e Kr do cascalho e dos

⁸ De Graft-Johnson, J. W. S., Bhatia, H. S. and Hammond, A. A., 1972. Laterite gravel evaluation for road construction. J. Soil Mech. Found. Eng., Am. Soc. Civil Engrs., 98:1245-1265.

solos finos concluiu que o primeiro apresentou índices inferiores a 2,0, sendo sob esta análise intemperizados. Entretanto os solos finos apresentaram valores de K_i superiores a 2,0, caracterizando-os como solos não lateríticos, apesar de a composição mineralógica determinada pela difratometria de Raios-X registrar a presença de argilominerais com elevado grau de alteração.

Fookes (1997), apesar de apresentar uma proposta de classificação do solo de acordo com o coeficiente K_r , conforme mostrado no Quadro 2.7, ressalta que em outros processos, tais como acumulação de Fe_2O_3 por podzolização e a segregação hidromórfica, podem resultar em concentrações de sílica ou sesquióxidos, dependendo da composição da rocha mãe. Entretanto, como essas concentrações não são originárias do processo de intemperização, isso implica em dizer que o valor K_r calculado a partir desses resultados não são indicadores de intemperismo. Essa constatação é aplicável, segundo Fookes (1997), aos solos franceses e, portanto neles os valores de K_r não os classificam corretamente. Mahalinga-Iyer e Williams (1997) citam diversos pesquisadores que não consideram a relação sílica-sesquióxidos adequada para avaliar corretamente a natureza e o grau de laterização.

Outra correlação pode ser sugerida graças ao trabalho de Martins (2005) ao estudar a influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico de dois solos residuais tropicais, com propriedades diferentes, sendo um laterítico e o outro saprolítico. A autora desenvolveu um amplo programa experimental e, dentre os experimentos, foram realizadas a análise química seletiva por ataque sulfúrico e difratometria de Raios-X dos dois solos estudados. Os resultados de K_i e K_r confirmaram a previsão quanto ao comportamento laterítico ou não dos solos e mais ainda foi possível inferir, de forma aproximada, a partir dos percentuais de óxidos e resíduos obtidos na análise química as respectivas composições mineralógicas. A autora concluiu que os resultados de difração de raios-X corroboraram, sob o aspecto qualitativo, a composição mineralógica obtida a partir dos ensaios de análise química por ataque sulfúrico.

2.3.5 Ensaio de adsorção de azul de metileno e sua aplicação na caracterização dos solos brasileiros

O ensaio do azul de metileno é baseado na quantidade de corante adsorvida ionicamente pelo solo, preferencialmente pelas argilas. O método consiste na titulação da suspensão de água

destilada e solo por uma solução de azul de metileno. A adição do corante é feita em volumes pequenos e conhecidos. Em intervalos de tempo estabelecidos é coletada uma gota da suspensão que é pingada no papel filtro e é observada a coloração da água pingada neste papel. O ensaio prossegue até que haja excesso do corante na suspensão. O excesso é captado pelo aparecimento de uma “aura” azulada (mancha) em torno do núcleo da gota da suspensão depositada no papel filtro. A partir do volume de azul de metileno adsorvido pelo solo pode-se calcular a Superfície Específica (SE) e, conseqüentemente, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e assim caracterizar o comportamento da fração fina do solo ($< 0,005$ mm), se laterítico ou não laterítico, quanto a sua atividade.

De acordo com Bastos et al. (2008), a necessidade de caracterizar melhor a atividade da fração argila do solo desencadeou no aprimoramento do método do azul de metileno, indicado para os solos tropicais. Segundo Barroso (2002), o primeiro registro de aplicação da técnica de adsorção de azul de metileno foi feita em 1924 por Paneth cujo foco era voltado para a indústria cerâmica. Entretanto, segundo Fabbri (1994), foi Lan (1977) que iniciou os estudos com azul de metileno com o objetivo de caracterizar os solos. Isso se deu quando o citado pesquisador estabeleceu correlações entre os valores do índice de plasticidade e equivalente de areia e os resultados do corante pelo método do papel filtro. Os resultados desta pesquisa, de acordo com Fabbri (1994), Barroso (2002) e Bastos et al. (2008), impulsionaram o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LPCC)* a realizar novas pesquisas e inovar com a utilização do azul de metileno na caracterização e classificação de solos para obras rodoviárias. Diversas outras pesquisas semelhantes no mundo e no Brasil foram desenvolvidas a partir desta data.

No país, Barroso (2002) cita o trabalho pioneiro de Ferreira et al. (1972) com a aplicação desta técnica em solo ao estudar onze amostras de solo nordestino, com o objetivo de comparar a determinação de superfícies específicas por diversos métodos, incluindo o da adsorção de azul de metileno pela técnica do papel filtro. Diversos outros pesquisadores seguiram esta linha de pesquisa ao longo dos anos, mas o destaque dado neste trabalho será aos estudos de Pejon (1992) e Fabbri (1994).

Casanova (1986 ⁹ *apud* FABBRI, 1994), estudou 35 solos lateríticos cuja relação sílica-alumínio (Ki) variava entre 0,37 e 1,97 e a relação sílica-sesquióxidos (Kr) entre 0,27 e 1,93. Neles foram determinadas a SE e a CTC por métodos tradicionais e os resultados foram comparados com os obtidos pelo método do azul de metileno. O pesquisador detectou uma boa correlação entre a CTC obtida pelos métodos tradicionais e pelo método da mancha do azul de metileno, apesar de a CTC obtida pelos métodos tradicionais, para todos os solos analisados, ter sido sempre inferior à obtida pelo método da mancha do azul de metileno. Casanova (1986 *apud* FABBRI, 1994) concluiu que o ensaio da mancha de azul de metileno deve ser adotado como meio de caracterização dos solos lateríticos, dada a sua rapidez, simplicidade e eficácia na obtenção das propriedades químicas e físico-químicas de superfície daqueles solos.

Pejon (1992) foi um dos primeiros a utilizar o ensaio de adsorção de azul de metileno em mapeamento geotécnico, como um instrumento de caracterização da fração fina dos solos. Na visão de Pejon (1992), esta técnica é apropriada ao mapeamento geotécnico em virtude do grande número de amostras a serem ensaiadas e, muitas vezes, da necessidade de caracterização no próprio campo. O pesquisador estudou diferentes amostras de solos, submetendo-as dentre outros, à classificação MCT, Difractometria de Raios-X (DRX) e adsorção de azul de metileno pelo método da mancha, como ficou mais conhecida. O objetivo do estudo era testar a capacidade de previsão do ensaio de azul de metileno quanto ao comportamento laterítico do solo. Pejon (1992) aplicou o método de Lan (1979) modificando a fração granulométrica que foi a passada na peneira 2,0 mm (# 10) e concentração de azul de metileno que foi reduzida para 1,5 g/l devido à baixa adsorção do corante pelos solos tropicais. Ele concluiu que, para 85% das amostras estudadas, houve uma concordância de comportamento entre os dois métodos estudados, MCT e DRX. O pesquisador constata que o ensaio de adsorção de azul de metileno pode fornecer informações complementares sobre a mineralogia da fração desde que associada à curva granulométrica completa do material.

Fabbri (1994) ao desenvolver seu trabalho de tese tinha como objetivo principal estabelecer um processo simples, econômico e rápido para classificar solos para fins de aplicação em obras viárias, levando em consideração as características peculiares dos solos tropicais. Para cumprir seu objetivo ele desenvolveu a fase inicial da sua pesquisa classificando os solos

⁹ Casanova, F. J. – O Ensaio de Azul de Metileno na Caracterização de Solos Lateríticos. Anais da XXI Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Salvador, BA. 1986.

baseando-se na distribuição granulométrica, que é a mais difundida entre os técnicos do meio rodoviário, mas deixando de lado os índices plásticos w_L e IP, já sabidamente não apropriados aos solos tropicais. A pesquisa na literatura despertou nele o estudo da adsorção do azul de metileno, pelo método da mancha, possibilitando substituir os índices físicos, mas mantendo os ensaios que pudessem qualificar a parte fina do solo analisado em conjunto com a granulometria. A revisão bibliográfica da adsorção do azul de metileno levou-o a concluir que:

- a adsorção deste corante pelos principais argilominerais se dá na seguinte ordem, da menor para a maior: caulinita, illita, vermiculita e montmorilonita;
- solos com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio adsorvem menor quantidade de azul de metileno;
- solos lateríticos e muitos daqueles de comportamento laterítico, segundo a classificação MCT, tem como principal argilomíneral constituinte a caulinita revestida por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Para comprovar estas conclusões, Fabbri (1994) estudou detidamente 297 amostras de solos cedidas por diversos pesquisadores, provenientes em sua maioria, do estado de São Paulo, e 72 delas de outros estados brasileiros. A seleção e coleta das amostras basearam-se, segundo o pesquisador, na premissa de que a superfície específica, determinada pelos ensaios de adsorção de azul de metileno, era capaz de refletir a atividade dos argilominerais contidos na fração fina dos solos e que, a partir dessa atividade, era possível tanto inferir os tipos de argilominerais presentes como prever, de modo grosseiro, sua influência no comportamento desses solos. Ele admitiu também que a classificação MCT refletia de alguma forma essa atividade, o que permitia diferenciar os solos lateríticos dos não lateríticos.

Nos ensaios de adsorção de azul de metileno desenvolvidos por Fabbri (1994), foi adotado o procedimento adotado por Pejon (1992), pautado nos seguintes objetivos: caracterizar a atividade dos argilominerais presentes nos solos, testar a influência do pH da suspensão solo + água nos resultados dos ensaios e definir o diâmetro da fração granulométrica da fração argila dos solos ($< 0,002$ ou $< 0,005$ mm) para o cálculo do coeficiente de atividade. Os estudos indicaram que não houve uma influência significativa do pH da suspensão solo + água nos resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno, pelo método da mancha, e que não houve vantagem adicional em utilizar fração ativa menor que 0,005 mm, para o cálculo dos coeficientes de atividade dos solos.

Com relação ao confronto de resultados entre a adsorção de azul de metileno e a classificação da metodologia MCT, Fabbri (1994) conclui que aquela produz resultados tão bons ou até melhores, que os obtidos pelo último, no que se refere à identificação do tipo de argilomineral presente na fração fina de solo. Esta certeza deve-se à confirmação com os ensaios de DRX e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Entretanto, o próprio Fabbri (1994) reconhece que os dois métodos têm objetivos diferentes. A metodologia da classificação MCT foi desenvolvida visando à qualificação do comportamento de solos quando compactados e os classifica de acordo com as suas semelhanças com materiais lateríticos e não lateríticos, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas são conhecidas. Já no ensaio de adsorção de azul de metileno avalia a superfície específica da fração fina dos solos e, a partir da sua magnitude, infere sobre o tipo ou os tipos de argilominerais presentes. E a partir dos argilominerais presentes pode-se ter uma avaliação bem precisa do comportamento destes solos.

Uma importante contribuição de Fabbri (1994) foi a construção do ábaco para caracterização da fração fina presente no solo. Este ábaco, apresentado na Figura 2.7, foi fruto da experiência adquirida pelo pesquisador na sua tese de doutoramento associado a gráficos semelhantes propostos Magnam e Youssefian (1989) e Pejon (1992), com os ajustes e considerações que se fizeram necessários.

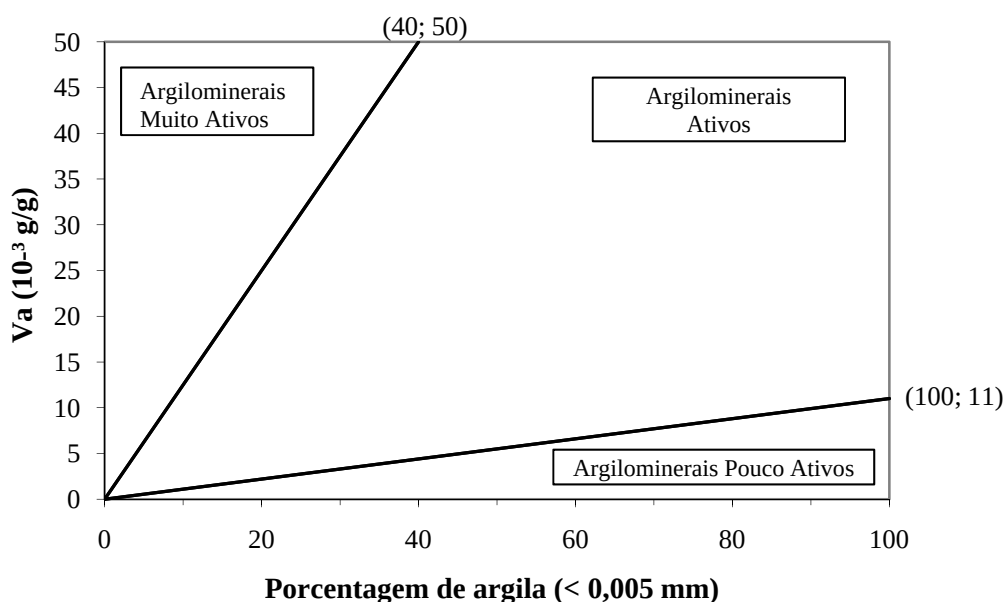


Figura 2.7 – Ábaco para identificação do grau de atividade da fração argila dos solos. Fonte: Fabbri (1994)

O ábaco proposto é um gráfico cartesiano tendo no eixo das abcissas a porcentagem da fração argila (< 0,005 mm) e no eixo das ordenadas o valor de azul de metileno (Va). As retas divisórias que diferenciam os solos em termos de atividade foram obtidas graças à conversão

dos resultados da superfície específica dos argilominerais em coeficiente de atividade (CA) ou valor de azul de metileno (Va).

Substituindo os valores de cada coeficiente na equação 2.9, apresentada a seguir, tem-se que cada ml de solução padrão de azul de metileno consumida no ensaio corresponde a uma superfície específica equivalente a $2,45 \text{ m}^2$. Dessa forma o Coeficiente de Atividade (CA) pode ser obtido dividindo os valores da superfície específica (SE) por 2,45. A partir dos argilominerais, Fabbri (1994), apoiado nos estudos e conclusões de outros pesquisadores, estabeleceu o grau de atividade para os grupos de argilominerais. As retas divisórias, citadas anteriormente, correspondem aos valores de CA, que é o coeficiente de atividade como pode ser visto na equação.

$$S_M = \frac{A \times N \times C}{M_{AM} \times 1000} \quad (2.9)$$

Onde:

S_M = superfície específica do azul de metileno (m^2/ml);

A = área da face da molécula de azul de metileno ($130\text{\AA}^2 = 130 \times 10^{-20} \text{ m}^2$)

N = número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$);

C = concentração da solução de azul de metileno seco (1 g/l);

M_{AM} = massa molecular do azul de metileno na forma anidra (319,9 g).

De acordo com Fabbri (1994), considerando que o material analisado é composto unicamente de fração argila ($100\% < 0,005 \text{ mm}$), o valor de azul (Va) é numericamente igual ao coeficiente de atividade (CA).

O Quadro 2.8 apresenta os grupos de argilominerais, suas superfícies específicas, coeficientes de atividade e grau de atividade. Este último atribuído por Fabbri (1994) foi dividido em três grupos: pouco ativos com valores de CA inferiores a 11; os ativos, com CA num intervalo entre 11 e 80 e os muito ativos com CA superior a 80, conforme apresentado no Quadro 2.9.

Grupo de Argilominerais	SE (m ² /ml)	CA	Va ¹	Grau de Atividade
Montmorilonita	860	350	350	Muito Ativo
Vermiculitas ²	200	82	82	
Ilita	74	30	30	Ativo
Caulinita	48	20	20	
Laterizados ³	5	11	11	Pouco Ativo

1. Valores de azul de metileno para 1g da fração argila; 2. Superfície específica segundo o LCPC (1979) e 3. Superfície específica para CA = 11

Quadro 2.8 – Valores de azul de metileno (Va) e coeficientes de atividade (CA) em função da superfície específica. Valores da superfície específica obtido de Lan (1980). (Fonte: Fabbri, 1994)

Valor de CA	Grau de atividade dos argilominerais	Tipos de argilominerais
CA < 11	Pouco ativos	Materiais inertes até argilominerais laterizados ou ainda combinações entre estes e os de outros mais ativos
11 < CA < 80	Ativos	Caulinita, e/ou ilitas, combinações destes com os de grupos mais ativos e menos ativos
CA > 80	Muito ativos	Montmorilonita, vermiculita, etc

Quadro 2.9 – Valores pré-determinados do coeficiente de atividade (CA) da fração fina do solo para caracterização do grau de atividade dos argilominerais e os seus tipos. (Adaptado de Fabbri, 1994)

Para avaliação da atividade da fração fina pelo método de Fabbri (1994) são necessários três parâmetros obtidos do ensaio:

- a percentagem de solo que passa na peneira 0,075 mm (# 200);
- o teor de argila que corresponde à percentagem de solo inferior a 0,005 mm e
- o volume da solução-padrão de azul de metileno consumido pela fração fina de solo.

Para a determinação da atividade da fração fina de argila existem duas possibilidades. A primeira é com o uso do ábaco proposto por Fabbri (1994) e para isso é necessário calcular o Valor de Azul (Va), conforme equação 2.10, que associado à percentagem de argila, fazer a determinação. A outra opção é calcular o valor do Coeficiente de Atividade (CA) através da equação 2.11 e, de acordo, com o Quadro 2.8 determinar o grau de atividade.

O Valor de Azul (V_a) é dado pela Equação 2.10.

$$V_a = V \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (2.10)$$

Onde:

V_a = valor de azul correspondente à quantidade de azul de metileno consumida por 1 g de amostra de solo integral passado na peneira 0,075 mm (# 200) expresso em ml de solução-padrão por grama de solo, ou por 10^{-3} g de azul de metileno por g de solo (10^{-3} g/g de solo);

V = volume da solução-padrão de azul de metileno adicionado à suspensão (ml);

P_{200} = percentagem de solo que passa na peneira 0,075 mm (# 200) (%) e

w = teor de umidade do solo ensaiado, passado na peneira 0,075 mm (# 200) (%).

O valor de CA pode ser obtido pela equação 2.11 a seguir:

$$CA = \frac{100 \times V_a}{P_F} \quad (2.11)$$

Onde:

CA = coeficiente de atividade;

V_a = valor de azul correspondente à quantidade de azul de metileno consumida por 1 g de amostra de solo integral passado na peneira 0,075 mm (# 200) expresso em ml de solução-padrão por grama de solo, ou por 10^{-3} g de azul de metileno por g de solo (10^{-3} g/g de solo);

P_F = percentagem que o solo contém da fração argila (< 0,005 mm)

Vários estudos foram desenvolvidos com foco diferenciado do de Fabbri (1994) como foi o caso de Cardoso (1996)¹⁰ *apud* BONINI, 2005). Aquele pesquisador não considerou o referido método como o mais indicado para a determinação da CTC de argilas, apresentando discordância da afirmação de Pejon (1992) e Chen et al. (1974)¹¹ *apud* PEJON, 1992). Para estes últimos pesquisadores, o cátion de azul de metileno substitui os cátions Na^+ , Na^{2+} , K^+ , Mg^{2+} e H_2O adsorvidos aos argilominerais. Entretanto Cardoso (1996), na sua pesquisa detectou uma significativa agregação de corante após a saturação da argila com o azul de metileno, o que levou a concluir que a suposição comumente difundida de que cada molécula do corante toma o lugar de um íon trocável na superfície da argila não foi observado. Em

¹⁰ CARDOSO, M. (1996). Determinação do Ponto de Saturação de Argilas através da Fluorescência utilizando Corantes Catiônicos. São Carlos, 1996. 96p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.

¹¹ CHEN, T.J.; SANTOS, P.S.; FERREIRA, H.C.; CALIL, S.F.; ZANDONADI, A.R.; CAMPOS, L.V. (1974): Determinação da capacidade de troca de cátions e da área específica de algumas argilas e caulins cerâmicos brasileiros pelo azul de metileno e sua correlação com algumas propriedades tecnológicas. *Cerâmica*, 79, julho a setembro, pp. 305-326.

virtude disso, o pesquisador admite a possibilidade de que o processo de adsorção do corante na superfície da partícula deve-se, não só à troca iônica, mas também à área disponível para adsorção da molécula do corante. Portanto, para Cardoso (1996 *apud* Bonini, 2005), os pontos de saturação, aqui entendido como volume de azul de metileno na condição de saturação, não devem necessariamente refletir as capacidades de trocas iônicas das argilas.

Barroso (2002) analisou os solos da Região Metropolitana de Fortaleza com o objetivo principal de prever algumas propriedades geotécnicas destes solos de interesse à pavimentação. Para isso foram coletadas e estudadas sessenta amostras de solos distribuídas por ocorrência percentual pedológica e realizados os ensaios de classificação tradicional e pelos métodos MCT e Miniatura, Compactado, Tropical – Modificado (MCT-M), proposto por Vertamatti, e adsorção de azul de metileno. A análise foi feita tomando por base a classificação pedológica dos solos estudados.

Das sessenta amostras analisadas, a pesquisadora avaliou a concordância de aproximadamente 62% entre a previsão de comportamento fornecida pelo método de adsorção de azul de metileno e o método MCT-M de Vertamatti. Nesta análise, duas situações foram consideradas concordantes por Barroso (2002). A primeira delas foi no caso dos solos com pouca atividade de acordo com o ensaio de azul de metileno e foram enquadrados nas classes lateríticas ou transicionais no ábaco MCT-M. A outra situação ocorreu com os solos ativos e muito ativos que no ábaco MCT-M foram enquadrados como não lateríticos. No caso da classificação MCT não foi possível obter essa mesma na avaliação, em virtude de muitos resultados estarem situados numa zona de indefinição entre o comportamento laterítico e não laterítico. No caso dos solos cuja expectativa era de não adequação às obras viárias, ou seja, solos não lateríticos, a concordância de resultados entre o método de azul de metileno e as metodologias MCT e MCT-M foi de 89%.

Para Barroso (2002), o ensaio de azul de metileno pelo método da mancha foi considerado como um método promissor para a identificação de solos com potencial de uso em pavimentação. E aponta ainda a possibilidade de desenvolvimento de um método de classificação de solos a partir da atividade da fração argilosa do solo associado às características granulométricas da fração grossa.

Outro aspecto que desencadeou um novo estudo foi a discordância de Bonini (2005) com relação à idéia de simplicidade e rapidez disseminado por muitos pesquisadores com relação ao referido

ensaio. Bonini (2005) ressalta, entretanto, que uma das dificuldades do ensaio é a percepção do ponto de viragem que é percebido pela formação da aura como apresentado na Figura 2.8. Este ponto nem sempre é fácil de ser percebido em alguns solos. Em razão disso, ela estudou aproximadamente 85 amostras de solos de diversos locais do país em que foram aplicadas metodologias para titulação do excesso de azul de metileno. Após a aplicação do ensaio de adsorção do azul de metileno, foram estudadas três opções, a saber: o papel filtro, o filtro de vidro e a centrifugação, sendo adotado o primeiro deles como o mais adequado. A etapa seguinte foi definir qual o método mais indicado para a titulação do sobrenadante entre a oxi-redução e a colorimetria. Depois de vários estudos a pesquisadora optou pela reação de oxi-redução, faltando estabelecer o oxidante ou a mistura de oxidantes mais adequados, decidindo-se pelo permanganato de potássio. A autora concluiu que o método de adsorção de azul de metileno pelo método redox conseguiu apresentar uma concordância de valores da ordem de 90% quando comparado com a previsão da MCT e acredita que esta técnica pode ser importante para a classificação de solo associada a outros parâmetros.

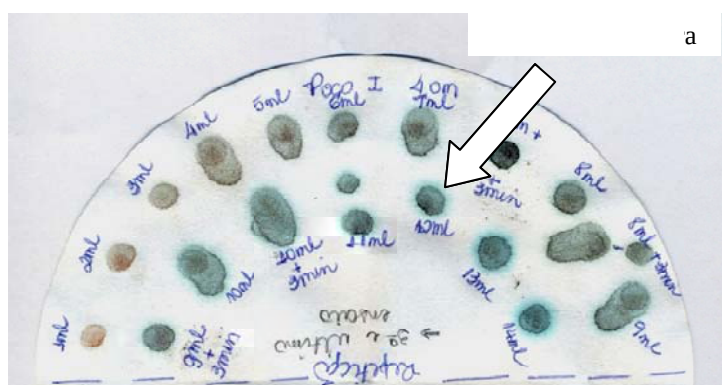


Figura 2.8 – Exemplo do teste da mancha de azul de metileno e o detalhe da formação da aura com a adição de 12 ml de azul de metileno. Fonte: A autora (2010)

Takeda (2006) estudou a influência da umidade após a compactação no comportamento resiliente das rodovias do interior paulista. Para isso, usou o ensaio de azul de metileno como mais um instrumento de identificação dos solos dessa região. Foram coletados e caracterizados 73 solos e destes foram selecionados trinta para a etapa de estudos posteriores como os ensaios MCT, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), difração de Raios-X e azul de metileno. O pesquisador observou que o ensaio de adsorção de azul de metileno foi bastante eficiente na caracterização dos argilominerais presentes na fração fina do solo, o que, com a determinação do grau de atividade, possibilitou a distinção dos solos lateríticos e não-lateríticos. Da análise conjunta dos ensaios citados anteriormente concluiu que em 83% dos trinta casos estudados houve uma concordância da totalidade dos resultados, registrando que

as divergências encontradas se deveram aos ensaios de MEV ou ao de adsorção de azul de metileno.

Da mesma forma, Bastos et al. (2008), utilizaram deste método de identificação para estudar as propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. A deficiência de materiais nobres em pavimentação e obras de terra impulsionou a pesquisa com o intuito de encontrar materiais considerados alternativos. O solo estudado pertence ao horizonte pedogenético B de perfis de solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo, formados em terrenos sedimentares da Barreira Litorânea. Os ensaios obedeceram aos procedimentos de Pejon (1992) e Fabbri (1994) e os resultados obtidos por ambos os métodos indicaram a presença de argilominerais não ativos, confirmando pelo ensaio MCT, o comportamento laterítico do solo.

2.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Segundo Camargo et al. (2009), o solo é um sistema composto de várias espécies minerais responsáveis pela suas propriedades físicas e químicas, em especial os constituintes da fração fina (silte e argila). No caso específico da fração argila esta é composta de uma mistura de um ou mais minerais aluminossilicatados secundários e minerais primários herdados diretamente do material de origem. Portanto, a identificação, a caracterização e o entendimento das propriedades dos diferentes minerais dos solos ajudam na avaliação da sua gênese, suas propriedades e possibilidades de uso.

A difratometria de Raios-X é um método eficiente e um dos mais comumente usados para identificar e estimar quantitativamente as proporções das várias espécies minerais, em particular do solo. Segundo Calderano et al. (2009), esta técnica vem sendo utilizada desde a década de 30 para a determinação da estrutura cristalina, possibilitando a caracterização mineralógica dos argilominerais e de outros constituintes cristalinos presentes na fração fina dos solos.

O procedimento usual completo para a análise de argilominerais inclui a separação e a concentração dos minerais, a preparação das lâminas com o material orientado (ou não), a análise no difratômetro de Raios-X e a interpretação dos difratogramas.

Os processos diversos de preparação das amostras para o ensaio de difratometria de Raios-X, como a solvatação, o aquecimento e a calcinação, tem o objetivo de prever ou confirmar a presença dos argilominerais no material estudado. Por esta razão, Alves (1987) comenta que a solvatação com etileno-glicol é um teste para detectar argilominerais expansivos, pois eles têm a capacidade de aumentar a distância interfoliar pela absorção de substâncias como água ou poliálcoois. Já o aquecimento da amostra tem a função de promover a expulsão de água existentes no espaçamento interfoliar de alguns argilominerais, provocando uma retração de suas distâncias basais. Entretanto Silva (2006), ressaltava que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, os constituintes que ocorrem na amostra abaixo deste limite provavelmente não serão captados.

2.5 CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA DOS SOLOS

Conforme já apresentado anteriormente, os solos são classificados de acordo com as mais diversas finalidades. Do ponto de vista pedológico os sistemas de classificação mais conhecidos em todo o mundo são Classificação de Solos Norte-americana (*Soil Taxonomy*) e a Classificação da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO). Segundo Nunes (2008), ambas as classificações foram formuladas com o intuito de atender as especificidades mundiais, contudo, devido à complexidade dos solos em escala de maior detalhe, vários países desenvolveram suas próprias classificações, como o Brasil.

A classificação dos solos é estabelecida a partir da definição dos atributos diagnósticos. Eles são características ou propriedades dos solos utilizadas para separação de classes em vários níveis categóricos do Sistema de Classificação ou na definição de alguns horizontes diagnósticos. A partir dos atributos diagnósticos, de acordo com a Embrapa (1999), as classes de solos estabelecidas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) foram os Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos, Organossolos, Planossolos, Plintissolos e Vertissolos. Na região em estudo predominam os Latossolos e os Nitossolos cujas características serão mais detalhadas no item relativo à área de estudo.

CAPÍTULO 3

ÁREA ESTUDADA

As áreas escolhidas para investigação estão situadas no município de Goiânia que, de acordo com Instituto de Planejamento Municipal (IPLAN) (1992), é marcado pelo crescimento populacional, principalmente após a década de 70. De acordo com o IBGE (2011) apresenta uma extensão territorial de 739 km², incluindo a área urbana, de expansão urbana e rural. O presente tópico apresenta os solos, a geomorfologia e a geologia do município de Goiânia, levando-se em conta a relação intrínseca entre a configuração da superfície e a variabilidade espacial dos solos, principalmente das propriedades referentes aos seus graus de intemperismo. O grau de intemperismo consistiu em uma das variáveis principais para a identificação da região mais adequada para utilização em pavimentos.

3.1 SOLOS

Com referência aos solos do município de Goiânia, Campos et al. (2003) fizeram uma caracterização das classes tomando por base apenas parâmetros macroscópicos observados nos perfis do solo, sem levantamento dos componentes químicos. O levantamento levou em consideração a dinâmica das águas nos solos e com base nas análises dos resultados dos ensaios de infiltração *in situ* foi feito um agrupamento das classes do solo, sendo definidos três grupos. A maior parte do município é ocupada pelos Latossolos Vermelho (LV) e Vermelho-Amarelo (LVA) e Nitossolo Vermelho (NV).

Os Latossolos, de acordo com Campos et al. (2003), apresentam o horizonte B em avançado estágio de intemperismo dadas às intensas transformações sofridas pelo material de origem. Esses solos são compostos por quantidades variáveis de óxido de ferro e alumínio, argilas com estrutura mineral 1:1, quartzo e outros materiais resistentes ao intemperismo, baixa capacidade de troca catiônica e expressiva atuação do processo de ferralitização. Apresentam uma camada de solo que pode superar 20 m, mas com pouca diferenciação dos horizontes e tem o cerrado como cobertura vegetal natural. Em termos de capacidade de infiltração estes solos variam de fortemente a bem drenados. São solos extremamente ácidos, com baixa

saturação por bases, distróficos, por vezes distroférricos. Tanto os Latossolos Vermelhos (LV), quanto os Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA), estão localizados em relevo plano a suave ondulado, com cobertura vegetal natural representada por campos limpos e sujos de cerrado, freqüentemente substituídos por pastagens. A Figura 3.1 ilustra os solos da região. Com relação aos Nitossolos, Campos et al. (2003) relatam que eles compreendem solos espessos e bem drenados, moderadamente ácidos a álicos, com saturação por bases variando de baixa a alta. Abrangem solos com incremento no teor de argila no horizonte B, com composição caulínica-oxídica o que possibilita argila de baixa atividade. As coberturas vegetais predominantes desta classe são as matas mesofíticas e as manchas de cerradão.

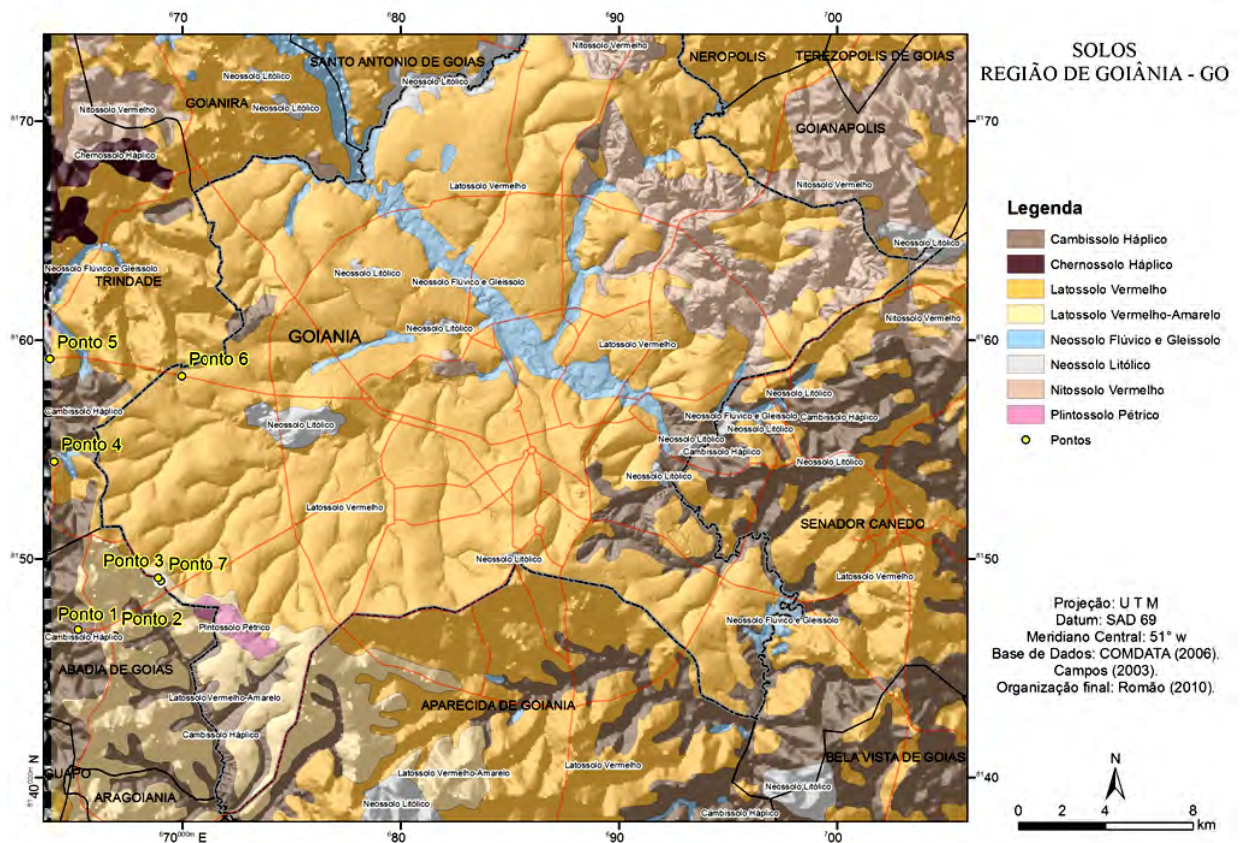


Figura 3.1 – Mapa de solos de Goiânia. Autora: Romão (2010)

Neste trabalho as áreas previstas para investigação estão situadas na divisa dos municípios de Goiânia, Trindade e Abadia de Goiás. Nelas o solo predominante é o Latossolo, apresentando um estágio avançado no processo intempérico, com presença de óxido de ferro e de alumínio, dando indícios de serem apropriadas para o uso em pavimentos.

3.1.1 Classe de solo estudada – Latossolos

Os solos em estudo compreendem aqueles constituídos por material mineral subsuperficial com horizonte B latossólico. Estes solos estão em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, em virtude de enérgicas transformações no material constitutivo, com exceção dos minerais pouco alteráveis. Esta condição pode ser percebida, conforme afirmam Cunha et al. (2000), pela quase completa alteração dos minerais primários menos resistentes ao intemperismo e/ou de minerais argila 2:1, seguida de intensa dessilicificação, lixiviação de bases e concentração residual de sesquióxidos, argila do tipo 1:1 e minerais primários resistentes ao intemperismo. Em geral, são constituídos por quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, minerais de argila 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo, podendo haver predominância de quaisquer outros materiais. Resende e Santana (1988) afirmam que a caulinita, a gibbsita, a goethita e a hematita, em diferentes proporções, têm sido os principais minerais identificados na fração argila da maioria dos Latossolos brasileiros.

3.1.2 Geomorfologia

Casseti (1992) estruturou a compartimentação geomorfológica do município de Goiânia baseando-se na dissecação do relevo comandada pela drenagem. Dessa forma a cidade está compartimentada em cinco unidades morfológicas, a saber: Planalto Dissecado de Goiânia a nordeste; os Chapadões de Goiânia na região sudoeste; o Planalto Embutido de Goiânia na região central; Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte e Fundos de Vale.

O Planalto Dissecado apresenta altitudes médias entre 920 a 950 m e nele são reconhecidas duas subunidades: as superfícies de formas aguçadas com declividade superior a 30% e as superfícies convexas com declividades inferiores a 20%. A primeira subunidade citada apresenta um elevado grau de dissecação (vales encaixados) associada aos solos do tipo Nitossolo e Latossolo Vermelho. Os Chapadões de Goiânia, com altitude entre 860 a 900m, localizam-se na porção sudoeste do Município. Neles também são distintas duas subunidades: as Superfícies Aplainadas e as Rampeadas. Nas primeiras são reconhecidos os níveis de concrecionamento em solos do tipo Latossolo. O Planalto Embutido de Goiânia, com altitudes em torno de 750 a 800 m, está localizado entre o Planalto Dissecado e os Chapadões de Goiânia e é dividido em duas subunidades: Superfície de Formas Convexas e de Formas

Tabulares. A primeira compreende a área de maior ocupação urbana do município e há o predomínio de Latossolos. Nas Formas Tabulares há a ocorrência de lateritas. Os Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte ocorrem acompanhando os principais cursos d'água da região, sendo divididos em Terraços Fluviais Suspensos e Planícies Fluviais de Inundação. Localizam-se em altitudes de 700 – 720 m e apresentam solos do tipo aluvial e hidromórfico (Neossolo flúvico e Gleissolo). A compartimentação estabelecida por Casseti (1992) de Fundos de Vale são caracterizadas por faixas de transição processual ao longo dos cursos d'água, com declividades superiores a 40% e apresentam solos profundamente alterados pela erosão acelerada. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, o mapa hipsométrico e o mapa geomorfológico de Goiânia.

De acordo com os aspectos geomorfológicos das áreas escolhidas para o desenvolvimento deste trabalho, cinco estão localizadas nos Chapadões de Goiânia com declividades entre 0 e 5%. Nestes locais esperou-se que fossem encontrados os solos mais antigos, como descritos no item anterior.

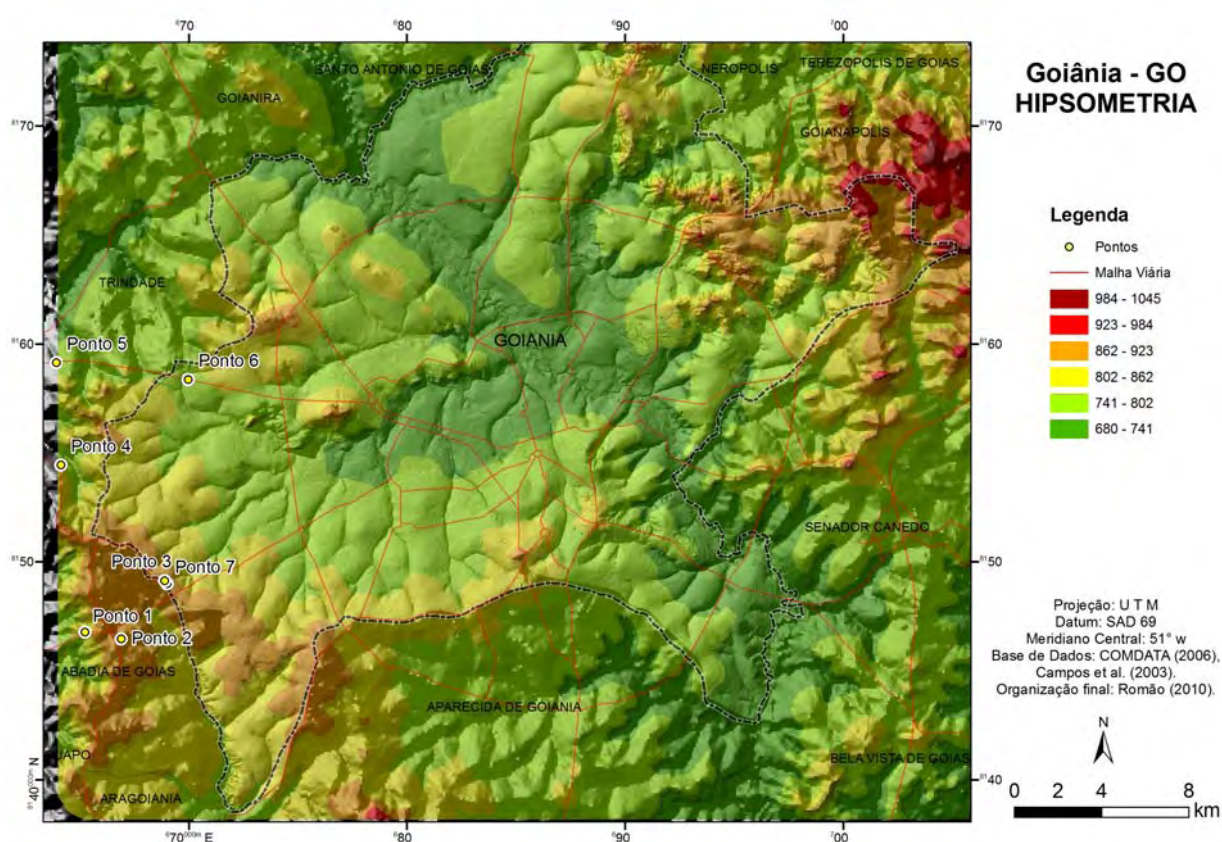


Figura 3.2 – Mapa hipsométrico de Goiânia. Autora: Romão (2010)

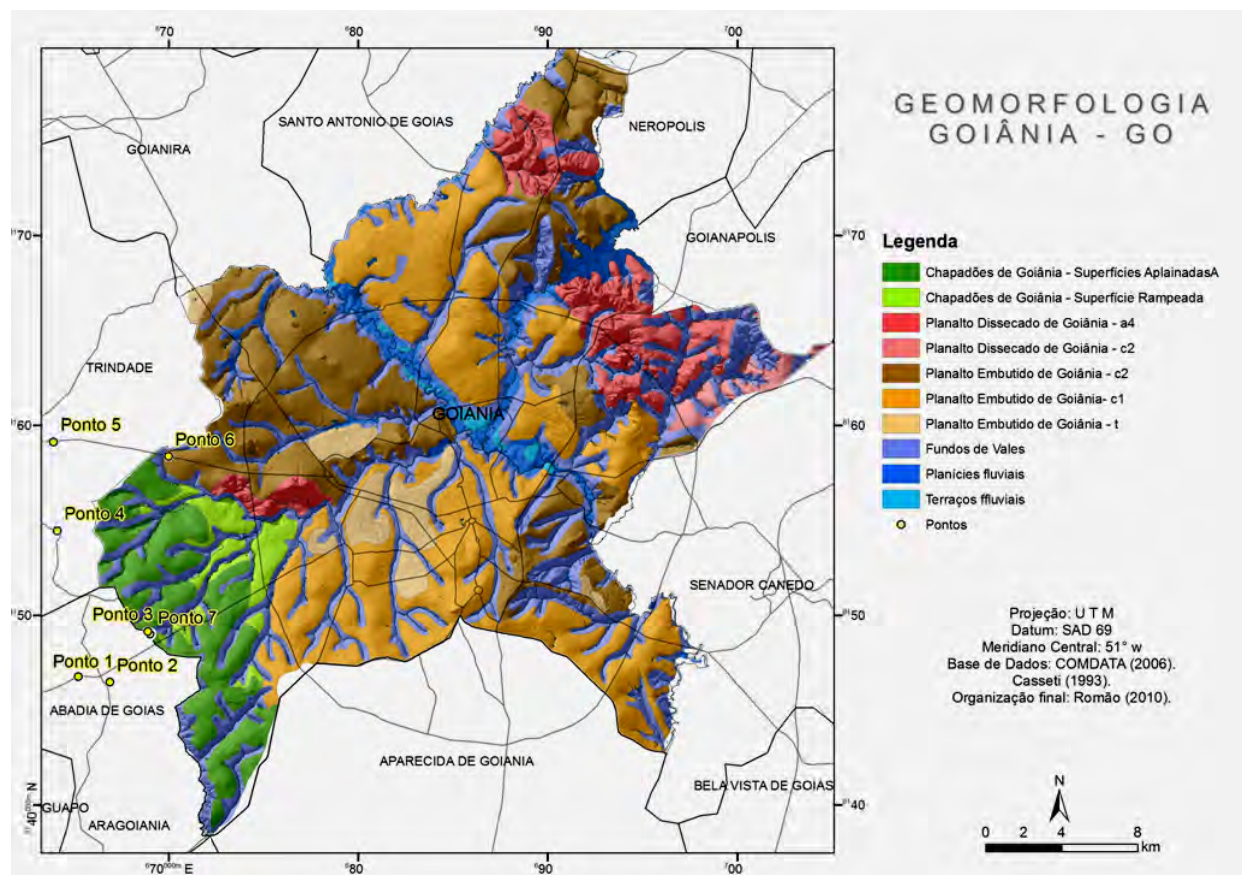


Figura 3.3 – Mapa geomorfológico de Goiânia. Autora: Romão (2010)

3.1.3 Geologia

As áreas onde foram desenvolvidos os estudos estão inseridas, do ponto de vista geológico, nos dois compartimentos geológicos denominados: Complexo Anápolis-Itauçu e Grupo Araxá. Segundo Campos et al. (2003), o Complexo Anápolis-Itauçu corresponde a uma faixa de rochas granulíticas individualizadas sob a denominação Associação Ortogranulítica e Associação de Rochas Supracristais enquanto o Grupo Araxá constitui xistos e, subordinadamente, quartzitos.

De acordo com Campos et al. (2003), as principais rochas que compõem o Complexo Anápolis-Itauçu são: granulitos bandados, granulitos paraderivados, gnaiss hiperalfuminoso, metapiroxenitos, metagabros e metatufos básicos. A composição mineralógica dos granulitos é representada por hornblenda, biotita, ortopiroxênio, clinopiroxênio, quartzo, plagioclásio e K-feldspato. Como acessórios ou produtos de alteração podem ocorrer carbonato, opacos, zircão, fluorita, titanita e apatita e ainda minerais como cianita, dumortierita e granada.

De acordo com Campos et al. (2003), as rochas do Grupo Araxá são compostas essencialmente de mica xistos e quartzitos micáceos. No caso dessas rochas, ocorrem como minerais em maior proporção, os micáceos do tipo biotita, muscovita e clorita e os granulares, granada, epidoto, anfibólio, quartzo e feldspato, sendo que estes dois últimos estão recrystalizados. A Figura 3.4 apresenta o mapa de geológico de Goiânia.

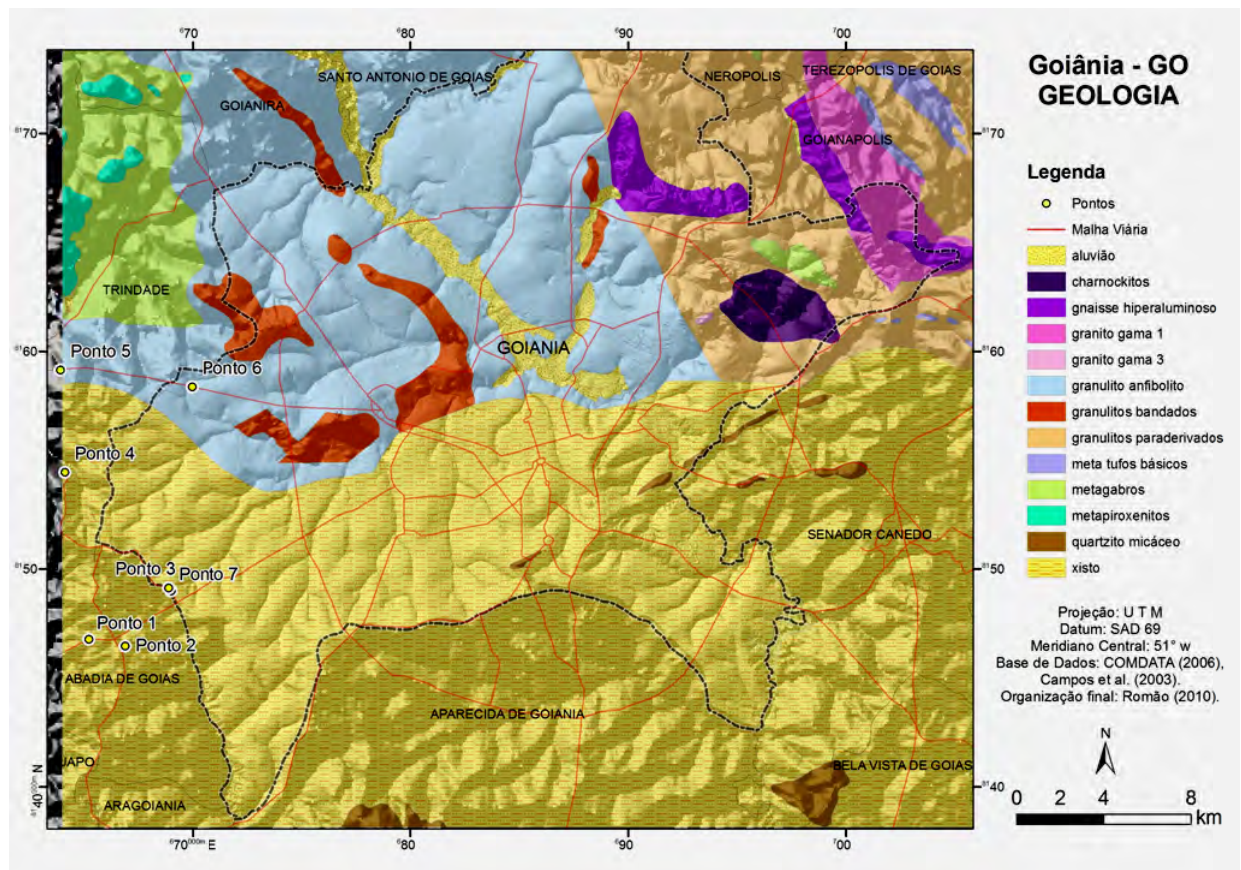


Figura 3.4 – Mapa geológico de Goiânia. Autora: Romão (2010)

O conhecimento das características da área em estudo, em termos de solo, geomorfologia e geologia, possibilitou prever ou confirmar os resultados dos estudos geotécnicos com o fim pretendido para pavimentação.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

O programa de investigação de solo teve a finalidade de analisar as propriedades de solos adequados para uso em pavimentação existentes em Goiânia. Tal investigação foi desenvolvida em duas etapas. A primeira delas consistiu da análise das informações dispostas nos documentos cartográficos, como hipsometria, litologia, geomorfologia e solos do Aglomerado Urbano de Goiânia associada a trabalhos de campo de reconhecimento por profissionais especializados, como geólogos e engenheiros geotécnicos. Tudo isso para a obtenção de informações sobre as condições fisiográficas e para a identificação expedita da cor, textura e estrutura dos horizontes superficiais.

Sabe-se que o processo de intemperização para a formação do solo é resultado de um conjunto de processos e condições como o clima, a altitude, a rocha de origem e a idade. Em virtude disso, as áreas selecionadas para a avaliação *in loco* foram as localizadas nas regiões mais planas e altas, pois nestas supôs-se haver melhores condições para a infiltração da água e, portanto para uma lixiviação de forma mais intensa e em maiores profundidades, facilitando o intemperismo químico e formando camadas de solos mais espessas.

A partir da documentação cartográfica e visita aos locais, a investigação permitiu, inicialmente, a seleção de seis áreas cujos solos apresentariam propriedades que os indicassem como mais adequados para pavimentação. Destes pontos estudados, foram selecionados dois deles cuja análise e avaliação apresentaram mais promissoras. Entretanto um dos pontos selecionados teve de ser descartado, após a execução do poço, por não atender ao objetivo deste estudo. Essa situação exigiu a inclusão e o estudo de um novo ponto, o Ponto 7, próximo da área alterada, para avaliar a possibilidade de substituição.

Para facilitar o entendimento e o desenvolvimento deste trabalho o Ponto 7 foi registrado juntamente com os outros pontos, reforçando a informação de que em termos de andamento do trabalho ele foi o último a ser estudado.

O Quadro 4.1 apresenta as coordenadas obtidas com um Global Positioning System (GPS) de navegação, o ponto de referência de cada uma das sete áreas avaliadas e a nova nomenclatura quando foi feita a execução dos poços. A Figura 4.1 apresenta fotos ilustrativas das mesmas.

Ponto	Coordenadas		Ponto de referência	Poço (2ª etapa)
	X (m)	Y (m)		
1	665.229	8.146.777	Em frente à porteira de uma propriedade particular.	---
2	666.892	8.146.474	Escavação de uma gaeria de água pluvial no centro da cidade de Abadia de Goiás, com profundidade aproximada de 3 m.	---
3	668.881	8.149.141	Bordo esquerda da estrada de terra para Trindade, sentido Abadia de Goiás-Trindade.	Poço 2 (descartado)
4	664.127	8.154.448	Bordo da estrada de terra para Trindade	---
5	666.892	8.146.474	Próximo à fábrica de Refrigerante Imperial. Sentido Goiânia – Trindade, pequena erosão do lado esquerdo da rodovia.	---
6	669.969	8.158.368	Bordo da rodovia dos Romeiros. Sentido Goiânia – Trindade, corte do lado esquerdo da rodovia.	Poço 1
7	668.955	8.148.969	Bordo direita da rodovia municipal que liga a BR-060 a GO-469, sentido Abadia de Goiás-Trindade.	Poço 3

Quadro 4.1 – Coordenadas dos locais onde foram coletadas as seis amostras, seus pontos de referência e a relação com os poços executados na 2ª etapa.

Nos locais analisados foram coletadas amostras a uma profundidade aproximada de 20 cm, com exceção do Ponto 2 em que foi aproveitado o material descartado da escavação da galeria de água pluvial, em uma profundidade de aproximadamente 3m. O material recolhido em todos os pontos foi em quantidade suficiente para a realização dos ensaios de identificação expedita pelo método das pastilhas, análise de difratometria de Raios-X da amostra natural e de determinação da composição química dos materiais. Todos os pontos onde foram coletados materiais foram destacados nas Figuras 3.1 a 3.4.



Figura 4.1 – Ilustração das sete áreas onde foram coletadas as amostras.

A partir da análise dos resultados obtidos na primeira etapa, foram selecionadas duas áreas que se mostraram preliminarmente adequadas ao uso em pavimentação, passando-se para a segunda etapa do processo investigativo. Nesta, o objetivo era analisar as características físicas e mecânicas, as composições químicas e mineralógicas das áreas selecionadas para a investigação detalhada e indicação de solos mais adequados para uso em pavimentação.

Antes da descrição do método de preparação do local, coleta do material e execução dos ensaios, é importante registrar que nesta fase do trabalho, as denominações anteriormente citadas como “Pontos” foram alteradas para “Poço”, já que o estudo se estendeu ao perfil do solo.

Foram executados no total 3 poços, sendo que no Ponto 6 foi executado o Poço 1, no Ponto 3 foi executado o Poço 2 e no Ponto 7, o Poço 3. Entretanto, a construção da rodovia na área parece ter mascarado o ponto anteriormente amostrado, podendo ser a justificativa para que o material recolhido na escavação do Poço 2 tivesse de ser descartado em razão de atender ao propósito do estudo. O Quadro 4.1 relaciona os pontos aos poços executados.

O Poço 1 foi executado na parte superior do talude da rodovia dos Romeiros, lado esquerdo sentido Goiânia- Trindade e o Poço 3 no bordo direito da rodovia municipal que liga a BR-060 à GO-469, passando pelo povoado Nossa Senhora do Perpétuo Socorro.

Cada poço foi executado com 0,70 m de diâmetro e 5 m de profundidade, onde supôs-se ter atingido o horizonte C. Antes da sua execução, o local foi previamente limpo com a retirada de folhas, galhos e outros materiais e a superfície foi rasada em aproximadamente 0,50 m, aproximadamente, para a retirada de outros solos. A execução foi manual e de cada um deles foram coletadas aproximadamente 100 kg de amostra representativa de cada metro de profundidade. Para atingir a massa de solo necessária para a execução de todos os ensaios, foi estabelecido que o recolhimento do material se daria na profundidade que variava entre 0,10 m para mais e para menos na profundidade desejada. Ou seja, para o primeiro metro, foi recolhido solo entre os 0,90 e 1,10 m de profundidade, seguindo do mesmo modo para as demais profundidades. O material retirado da escavação, de cada profundidade, foi disposto em uma lona plástica, homogeneizado, acondicionado em dois sacos plásticos transparentes, com capacidade de 50 kg, e devidamente identificados.

Todo o material recolhido foi levado e guardado no laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG). A secagem foi ao

sol, espalhando o material em bandejas metálicas ou em lona plástica disposta na área do estacionamento da Unidade.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL DA 1ª ETAPA

4.2.1 Difratometria de Raios-X (DRX)

Este ensaio foi realizado nas duas etapas do desenvolvimento deste trabalho. Na primeira delas, o objetivo foi o de caracterizar mineralogicamente as áreas para se ter uma noção do nível de intemperização do solo superficial recolhido. Na etapa posterior, os resultados de DRX serviram para avaliar duas áreas pré-selecionadas em perfil, em termos do grau de alteração.

A caracterização mineralógica dos solos coletados na 1ª etapa deste estudo, extraídos dos Pontos 1 ao 6, foi realizada no Laboratório de Difração de Raios-X do Laboratório de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). O equipamento usado foi o difratômetro RIGAKU – D/MAX – 2A/C, operando à época com tubo de cobre, 40 kV e 20 mA e ângulo de incidência de 2 a 30° - 2 θ . De acordo com Guimarães (2009), a partir dos difratogramas, os minerais foram identificados, pelo *software* JADE 3.0 da MDI, que dispõe de rotinas de suavização de curva, eliminação de *background*, procura automática de picos, cálculo da largura a meia-altura, tamanho médio de partículas e pesquisa de possíveis minerais no banco de dados mineralógicos do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se *software*, com banco de dados contendo milhares de fichas, de vários minerais.

A preparação das amostras de todos os pontos obedeceu ao procedimento padrão para difração de Raios-X de argilominerais: secagem ao ar, desagregação com o uso de gral de ágata até obtenção de 100% do material passante na peneira de 44 μ m. A amostra total colocada no suporte metálico do equipamento foi analisada por difração de Raios-X para caracterização mineralógica das rochas. Concluída esta fase, parte do material foi analisada no difratômetro de Raios-X pelo Método do Pó Não-Orientado, cujo resultado é denominado Análise total.

A necessidade de confirmação dos resultados dos Pontos 3 e 6, exigiu o desenvolvimento de mais etapas com o objetivo de confirmar as previsões. Para isso, procedeu-se à separação, por

centrifugação, da fração argila destas amostras. Após o período estabelecido para a centrifugação, a fração líquida foi descartada e a “lama” do fundo da cubeta foi cuidadosamente colocada na lâmina de vidro e espalhada, ocupando aproximadamente um terço da peça de vidro, sem preocupação com a orientação da amostra. Duas lâminas foram preparadas conforme descrito anteriormente e foram utilizadas para as leituras das três etapas posteriores. A primeira lâmina foi utilizada para a leitura da difratograma do material seco ao ar e posteriormente com saturação por etileno-glicol. A primeira é a fase denominada Análise Natural da fração argila. A etapa seguinte foi a da saturação da referida lâmina com etileno-glicol, em dessecador, colocado sobre uma chapa aquecida a 50°C, por 12 horas. A lâmina, com material seco ao ar, foi colocada em um dessecador contendo etileno-glicol sob a placa perfurada e graças aplicação de vácuo foi produzido no dessecador uma atmosfera saturada da referida substância. O dessecador foi vedado e as amostras ficaram expostas sob essas condições por um período aproximado de 15 horas. Este procedimento visa garantir a completa saturação da atmosfera interna e desta maneira permitir a identificação dos argilominerais expansivos, caso existam. Após este tempo, a lâmina foi retirada do equipamento e levada imediatamente ao difratômetro de Raios-X para análise, cujo resultado foi anotado como Análise Glicolada.

A segunda lâmina serviu para a realização da etapa de calcinação da “fração argila”. A lâmina, após o material estar seco ao ar, foi levada à mufla e calcinada a 490°C, por 5 horas. De acordo com Alves (1987), antes de serem analisadas sob ação dos raios-X, as amostras devem ser resfriadas em dessecador, pois alguns argilominerais têm a capacidade de se reidratar quando expostos às condições atmosféricas. Após a etapa de resfriamento, foi feita a análise da lâmina calcinada. Esta é a chamada Análise Calcinada e serve para indicar a presença de minerais que passam por retração, total ou parcial, de sua estrutura nestas condições, como é o caso da caulinita, gibbsita, goethita entre outras.

4.2.2 Identificação expedita pelo método das pastilhas

A identificação expedita pelo método das pastilhas foi desenvolvida nas duas etapas deste trabalho no Laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG. A metodologia adotada foi a descrita por Fortes et al. (2002), com pequenas adaptações.

As pastilhas foram inicialmente moldadas com a fração de solo que passa na peneira 0,42 mm, em estado pastoso, com a consistência padronizada pelo uso de um mini-penetrômetro adaptado, em anéis de 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura. O mini-penetrômetro usado neste experimento foi adaptado da ponta do aparelho de Vicat, instrumento bastante utilizado para detectar pega de concreto. Como o diâmetro da ponta deste aparelho atende ao estabelecido pela metodologia, foi preciso apenas envolver a parte superior da mesma com fita crepe até atingir o peso especificado de 10 g e fazer pequenas marcas para facilitar a leitura da penetração. Esses corpos de provas foram submetidos à secagem ao ar, após a qual foi medida a contração diametral. Essa contração correlaciona-se razoavelmente com o coeficiente c' do eixo x, da metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) classificatória. As pastilhas obtidas foram, em seguida, submetidas à embebição de água por capilaridade, cuja consistência foi medida com o mini-penetrômetro. O valor da consistência, determinado sob a forma de penetração, correlaciona-se razoavelmente com o coeficiente e' do eixo y, da metodologia MCT, possibilitando classificar preliminarmente a amostra ensaiada.

O desenvolvimento deste ensaio na nossa região requer cuidado, pois em determinadas épocas do ano a umidade do ar é bastante baixa e a consistência das amostras ensaiada altera com muita facilidade.

Os resultados obtidos de contração diametral e de penetração foram traçados na Carta de Classificação do Método das Pastilhas, apresentada na Figura 2.6 permitindo a identificação do grupo ao qual o solo amostrado pertence.

4.2.3 Análises da composição química do solo

A análise química dos solos coletados na 1ª etapa, as áreas de 1 à 6, foram realizados por uma empresa particular credenciada pela Embrapa. Os solos estudados nesta etapa foram coletados a uma profundidade média de 0,20 m. Os parâmetros obtidos nesta etapa foram o SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e a partir deles os coeficientes K_i e K_r .

De acordo com Rodrigues (2008), a metodologia desenvolvida para esta análise química é o denominado ensaio de ataque sulfúrico para extração de ferro, alumínio, titânio e sílica no resíduo da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). O material após a dissolução com ácido sulfúrico 1:1 é aquecido até a fervura, sob refluxo, seguido de resfriamento, diluição e filtração. A

determinação da sílica foi feita no resíduo e o ferro, alumínio e titânio no filtrado. A determinação das relações moleculares K_i e K_r foram feitas utilizando as equações 2.7 e 2.8.

4.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL DA 2ª ETAPA

4.3.1 Caracterização e classificação dos solos

As amostras foram caracterizadas por meio dos seguintes ensaios: massa específica dos grãos, granulometria por peneiramento e sedimentação, sendo este com e sem defloculante e limites de consistência. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG. De posse dos resultados de granulometria e limites de consistência, os solos foram classificados de acordo com os sistemas convencionais do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e da *Transportation Research Board* (TRB).

4.3.1.1 Massa específica dos grãos

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado pelo método do picnômetro das partículas com diâmetro menor que 4,8 mm, conforme prescreve a NBR 6508 (ABNT, 1984a).

4.3.1.2 Análise granulométrica

A determinação das frações granulométricas foi desenvolvida obedecendo a NBR 7181 (ABNT, 1984b) pelo método do peneiramento para determinação da fração grossa e por sedimentação para a determinação das frações silte e argila. A análise granulométrica por sedimentação foi executada com e sem defloculante, sendo usado o hexametáfosfato de sódio como agente dispersor das partículas finas. A Figura 4.2 ilustra o ensaio de sedimentação. A classificação granulométrica foi realizada atendendo a NBR 6502 (ABNT, 1995).



Figura 4.2 – Ensaio de sedimentação

4.3.1.3 Limites de consistência

Os limites de consistência foram definidos a partir dos resultados dos limites de liquidez (w_L), que foi realizado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984c) e de plasticidade (w_P), executado de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 1984d).

O limite de plasticidade, segundo Bastos (2010), é importante na caracterização de solos finos e ele é função dos teores de argila e de umidade e da mineralogia dos argilominerais. Solos com predomínio de argilomineral 2:1 são mais plásticos do que os de 1:1. O índice de plasticidade (IP) é obtido pela diferença entre os dois limites, de liquidez e de plasticidade. Ele infere a capacidade de absorção de água pelo solo e, caso ela seja elevada, pode provocar aumento sensível de volume do solo. Por causa dessa possibilidade de aumento de volume, esse solo é avaliado como inadequado para o uso em pavimento, dado comprometimento da estabilidade. No caso da inviabilidade de determinação de algum destes limites, normalmente em virtude da natureza do solo em estudo, o índice de plasticidade é classificado com não plástico (NP).

4.3.2 Identificação do caráter laterítico dos solos

Para esta identificação, as amostras foram analisadas segundo cinco metodologias diferentes a saber: ensaios de classificação MCT, identificação de argilominerais por difratometria de Raios-X; adsorção de Azul de Metileno, pelo Método da Mancha; identificação expedita pelo Método das Pastilhas e determinação química do solo, incluindo Ki e Kr.

4.3.2.1 Classificação MCT

Os ensaios da metodologia MCT foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG). A classificação dos perfis dos poços, segundo a metodologia MCT, foi feita de acordo com o que preconiza a metodologia, em que são realizados os ensaios de compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.

O ensaio de compactação pelo método Mini-MCV foi executado de acordo com a norma do M 258 (DNER, 1994a), a perda de massa por imersão foi realizada de acordo com a norma do M 256 (DNER, 1994b) e a classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT de acordo com a norma CLA 259 (DNER, 1996). A realização do ensaio de Mini-MCV e Perda de massa por imersão permitem a determinação dos coeficientes c' , d' , P_i e e' e a partir deles a classificação do solo, segunda a metodologia MCT. A Figura 4.3 ilustra o ensaio de imersão.



Figura 4.3 – Imersão dos corpos de prova em água.
Autor: Batalione (2010)

4.3.2.2 Ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha

O ensaio de adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha tem a finalidade de determinar os coeficientes de atividade das frações finas dos solos ensaiados. Devido à inexistência de uma norma padronizada pela associação competente, o ensaio foi executado segundo o procedimento descrito por Fabbri (1994). Este ensaio foi realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG.

Este ensaio de adsorção de azul de metileno foi executado segundo as etapas descritas nos itens a seguir. Este ensaio visou determinar o coeficiente de atividade das frações finas dos solos em estudo e também foi usado o gráfico de identificação das argilas. O ensaio foi realizado com o pH normal da suspensão solo + água destilada.

Fabbri (1994) detalhou a listagem dos equipamentos necessários para a realização do experimento. A Figura 4.4 ilustra a maioria destes equipamentos utilizados para a realização do ensaio e sua montagem.

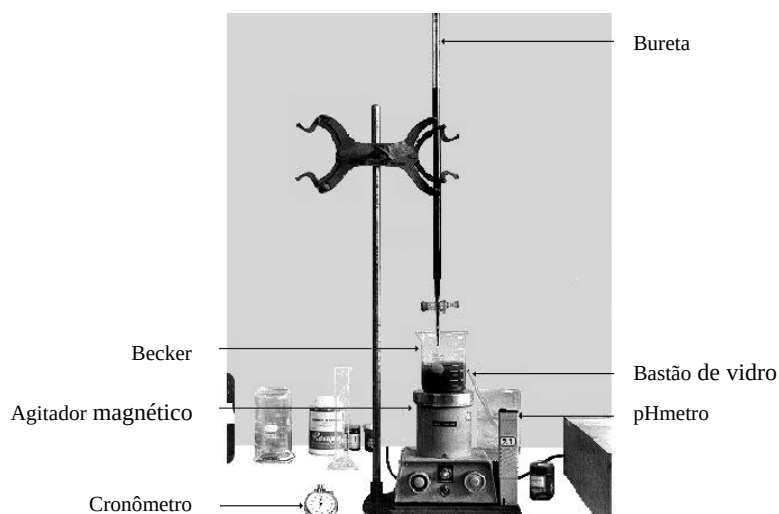


Figura 4.4 – Equipamentos necessários para a execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha. Fonte: Fabbri (1994)

- peneira 0,074 mm (# 200);
- cadinho de porcelana e mão de gral de tamanho adequado ao volume da amostra;
- balança com precisão de 0,01 g;
- bureta de 25 ml de capacidade e com graduação de 0,1 em 0,1 ml;
- suporte metálico para bureta;
- cronômetro com resolução de segundos;
- bastão de vidro, com aproximadamente 8 mm de diâmetro de 250 mm de comprimento;
- agitador magnético para soluções aquosas, com possibilidade de regulação do número de rotações;
- pipetas com capacidade de 10 ml e pipeta volumétrica de 100 ml de capacidade;
- béquer de vidro com 250 ml de capacidade;

- solução-padrão de azul de metileno, com concentração de 1 g de sal anidro por litro de solução;
- papel filtro circular do tipo Reagen – R-42, Whatman ou similar, com diâmetro entre 120 e 150 mm, para micro-cristais, com teor de cinzas inferior a 0,01%;
- água destilada.

Secar o solo ao ar, destorroá-lo e passar na peneira 0,075 mm (# 200).

Logo no início da realização do ensaio determinar a umidade para o cálculo de V_a .

❖ Preparação da solução de azul de metileno

- Determinar a perda de água a 105°C por 18 horas em estufa ventilada
- Tomar uma massa de 1,0 g de azul de metileno seco ao ar e dissolver em 1000 ml de água destilada.

Dentre os cuidados previstos na preparação da solução, Pejon (1994) sugere não secar o azul de metileno em estufa e Chen et al. (1974¹² apud PEJON, 1992), sugerem não utilizar soluções preparadas há mais de 3 dias, devidos aos riscos de polimerização. Quanto ao tempo de validade da solução, Bonini (2005) adotou 2 dias como o tempo máximo de uso após o preparo da solução.

O procedimento para execução do ensaio segue o roteiro desenvolvido por Fabbri (1994):

- pesar 1 g do solo peneirado e colocar em um béquer com 100 ml de água destilada, posicionando-o no agitador magnético, que deverá ser ligado para homogeneização da mistura;
- com auxílio de uma bureta graduada, acrescentar 1 ml da solução-padrão de azul de metileno e agitar por 1 min, para que haja a dispersão da solução água + corante + solo;
- mergulhar o bastão de vidro na mistura, capturar uma gota na suspensão e pingá-la sobre o papel filtro;

¹² CHEN, T.J.; SANTOS, P.S.; FERREIRA, H.C.; CALIL, S.F.; ZANDONADI, A.R.; CAMPOS, L.V. (1974): Determinação da capacidade de troca cátions e da área específica de algumas argilas e caulins cerâmicos brasileiros pelo azul de metileno e sua correlação com algumas propriedades tecnológicas. *Cerâmica*, 79, julho a setembro, pp. 305-326.

- observar a difusão da gota no papel, verificando se há o aparecimento de uma aura verde ou azulada em torno da borda que circula o núcleo, normalmente escuro, de solo. Em caso afirmativo, deixar a solução em agitação por mais 3 min para a confirmação do resultado. Novamente tomar uma gota da suspensão e verificar se há a formação da aura. Caso isso não aconteça, repetir os procedimentos anteriores acrescentando mais 1 ml da solução-padrão até que ocorra a formação da aura;
- analisar cuidadosamente as gotas dispostas no papel filtro e anotar o consumo de azul de metileno correspondente ao ponto de viragem, ou seja, o ponto que houve a formação da aura;
- calcular o valor de azul (V_a) a partir do volume de azul de metileno consumido pela fração fina de solo durante o ensaio.

4.3.2.3 Identificação expedita pelo método das pastilhas

O desenvolvimento deste ensaio seguiu o mesmo procedimento adotado na etapa anterior e foi realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG.

4.3.2.4 Metodologia DRX

Nesta 2ª etapa, as amostras obtidas no perfil de Poços 1 e 3 de profundidade 5,0 m foram analisadas de acordo com o procedimento do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S. A. O equipamento utilizado foi um difratômetro D5000, da marca Siemens, ilustrado na Figura 4.5. Ele foi operado com tubo de cobre, potência do gerador de 40 kV e 30 mA, goniômetro θ e 2θ , passo com início de 3° para amostras integrais e finalização em 70° e para as amostras de argila de 3° a 50°, passo de 0,05° 1s/passos. A partir dos difratogramas, os minerais foram identificados por meio de *software* de análise EVA versão 2009, similares ao usado na primeira etapa.



Figura 4.5 – Difratorômetro de Raios-X. Fonte: Oliveira (2008)

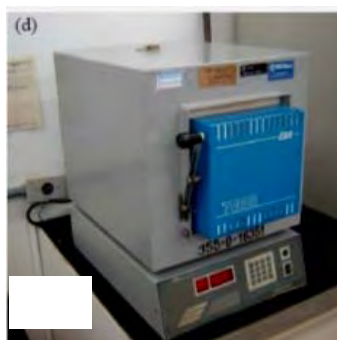
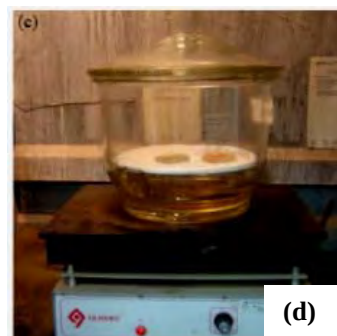


Figura 4.6 – Preparação das amostras para análise de DRX: (a) moinho orbital; (b) sedimentação em coluna; (c) lâminas orientadas; (d) lâminas dentro do dessecador com etileno-glicol; e (e) mufla para calcinação

Fontes: (a), (b) e (c) Rufo (2009); (d) e (e) Oliveira (2008)

As amostras foram submetidas à moagem prévia em moinho orbital até a moagem total, ou seja, 100% passante na peneira 0,0045 mm, para obtenção do material representativo de granulação bem fina. Numa fração deste material foi realizada a análise integral e na restante foi feita a sedimentação em coluna com o uso de hexametáfosfato como defloculante para separação da fração argila. Com o material sedimentado foram preparadas três lâminas com orientação dos cristais, o que é conseguido com o deslizamento de uma lâmina limpa sobre a que contém a fração sedimentada, provocando a orientação.

As determinações da fração argila em termos das análises natural, glicolada e calcinada seguiram praticamente os mesmos procedimentos citados na 1ª etapa. Vale apenas destacar que a temperatura de calcinação no laboratório de Furnas Centrais Elétricas é de 550°C por 3 horas.

4.3.2.5 Análises da composição química do solo

A realização da análise química do perfil dos Poços 1 e 3, nesta 2ª etapa, foi executada no laboratório do Fundo de Fomento à Mineração (FUNMINERAL), e constou da determinação das seguintes substâncias: SiO_2 ; Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 , em porcentagem.

Para a identificação das substâncias listadas foram adotadas as seguintes metodologias:

- Alumínio: a amostra foi aberta com água régia, ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção 1:3, e em seguida dosada no espectrofotômetro de absorção atômica, marca *Perkin Elmer*, modelo *A Analyst*.
- Sílica: a análise foi feita por gravimetria, a partir do resíduo de alumínio, que depois de queimado foi fluorizado.
- Ferro: foi utilizada titulação com dicromato de potássio em meio ácido na presença de bicloreto de mercúrio e indicador difenilamina sulfonato de bário.
- Titânio: foi utilizada a espectrofotometria colorimétrica da amostra fundida em ácido sulfúrico. O equipamento usado foi o espectrofotômetro *Perkin Elmer – Coleman 54B*.

4.3.3 Análise de resistência mecânica e de expansibilidade dos solos

4.3.3.1 Ensaios de compactação, expansão, California Bearing Ratio (CBR)

Os ensaios de compactação, expansão e *California Bearing Ratio* (CBR) foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG. O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986). A energia aplicada, o Proctor Intermediário, foi devido ao fato de se tratarem de amostras que apresentavam características granulométricas de solo fino, visando, de acordo com Batalione (1997), a obtenção de parâmetros melhores de resistência e possível aplicabilidade no subleito dos pavimentos.

Cada amostra de solo foi subdividida em cinco frações, com umidades diferentes e compactadas em moldes apropriados com o número de golpes de acordo com a energia estabelecida. Para cada molde compactado foram determinados a umidade e o peso específico. De posse destes resultados, foi traçada a curva de compactação e a partir dela foram determinados o teor de umidade ótima e peso específico seco máximo (γ_{dmax}).

A etapa seguinte foi o ensaio de expansão, que consiste na imersão dos corpos de prova em água, por quatro dias e a leitura diária do extensômetro para determinação do valor da expansão das amostras ensaiadas. A norma que rege este ensaio é a NBR 9895 (ABNT, 1987).

O último ensaio desta série foi a determinação do (CBR), que consiste na aplicação de um carregamento estático em um corpo de prova sob condição saturada. Este carregamento se dá pela penetração de um pistão de diâmetro padronizado, em velocidade constante, acompanhado de registros de cargas de reação. Estes registros podem ser obtidos por meio de um anel dinamométrico ou células de carga acopladas à prensa. No caso deste trabalho, a determinação do CBR foi feita em prensa automática com taxa de penetração programável. A penetração foi medida através de comparadores eletrônicos de deslocamento e a carga medida através de célula de carga. A determinação do CBR tem o objetivo de avaliar, em laboratório, a possibilidade de aplicação do solo estudado em pavimentos flexíveis.

4.3.3.2 Ensaio de Mini-Proctor (compactação), Mini-CBR e expansão

Os ensaios de compactação Mini-Proctor e Mini-CBR foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG). As amostras analisadas foram a da profundidade 3,0 m dos poços em estudo, 1 e 3. A energia de compactação foi a intermediária considerando que a pretensa jazida pudesse ser usada em base e sub-base de pavimento.

Estes ensaios tiveram os objetivos de obter os valores dos parâmetros de compactação e Mini-CBR e compará-los com os valores obtidos na metodologia convencional. Determinou-se também a relação entre o Mini-CBR: imerso, sem sobrecarga e com sobrecarga para a umidade ótima (RIS) e a Perda de Suporte por Imersão (PSI).

O ensaio de Mini-CBR foi realizado de acordo com os procedimentos descritos no método do ME 254 (DNER, 1997). Este ensaio foi realizado apenas nas amostras de profundidade 3m dos Poços 1 e 3, nos quais foram obtidos os valores mais altos de CBR.

As amostras para a determinação do Mini-CBR, foram compactadas em dois grupos com cinco corpos de prova cada um, praticamente com as mesmas umidades, para a determinação do CBR, com e sem imersão, e da expansão. Um dos grupos, logo após a compactação, foi rompido na prensa Mini-CBR com sobrecarga. O outro grupo foi imerso em água por 24 h para a determinação da expansão e posteriormente, o CBR com imersão e com sobrecarga. Foram determinadas para cada condição, a umidade ótima e o peso específico seco máximo (γ_{dmax}).

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos ensaios de laboratório realizados para a avaliação do comportamento das amostras coletadas nas primeira e segunda etapas. Na primeira etapa foram estudadas sete amostras, ao todo, e após avaliação das melhores condições para o uso em pavimentação foram selecionadas duas áreas para serem analisadas em perfil. Assim, na segunda etapa foram avaliadas amostras em perfil dos Poços 1 e 3.

5.1 RESULTADOS DA 1ª ETAPA

Os resultados da primeira etapa são referentes aos ensaios de pastilhas, análise química por ataque sulfúrico e composição mineralógica por difratometria de Raios-X (DRX) da amostra total.

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o ensaio das pastilhas, sendo que na primeira pode ser vista a fase de contração da amostra e na seguinte a dereabsorção de água.



Figura 5.1 – Ensaio de pastilha na etapa de contração.

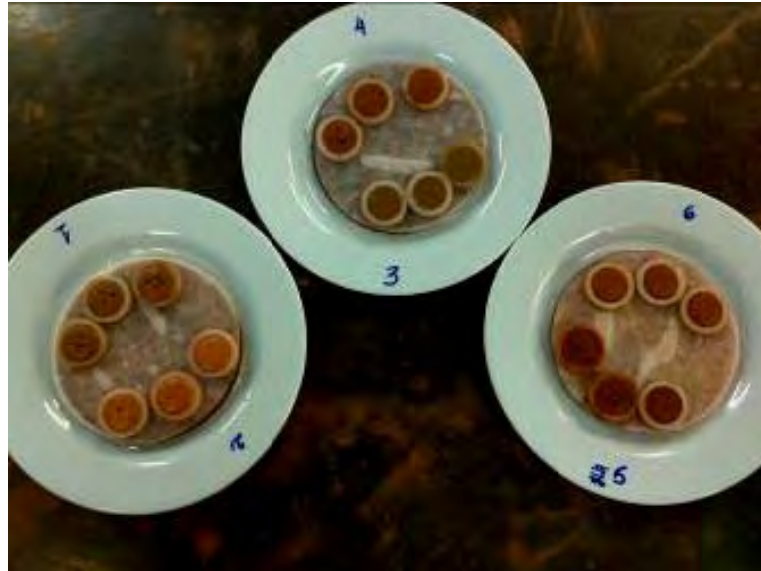


Figura 5.2 – Ensaio da pastilha realizados nos solos dos pontos 1 a 6, na etapa de reabsorção de água

A Figura 5.3 apresenta o ábaco do método das pastilhas e nele estão plotados os resultados obtidos dos Pontos 1 a 6.

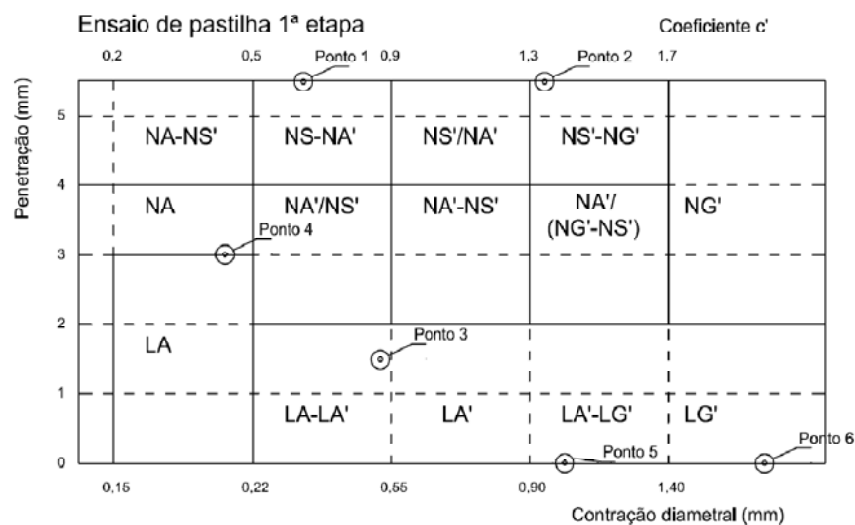


Figura 5.3 – Ábaco do método expedito das Pastilhas com os resultados dos Pontos 1 a 6

Os difratogramas da amostra total dos solos coletados nos Pontos 1 a 6 podem ser vistos nas Figuras 5.4 a 5.9.

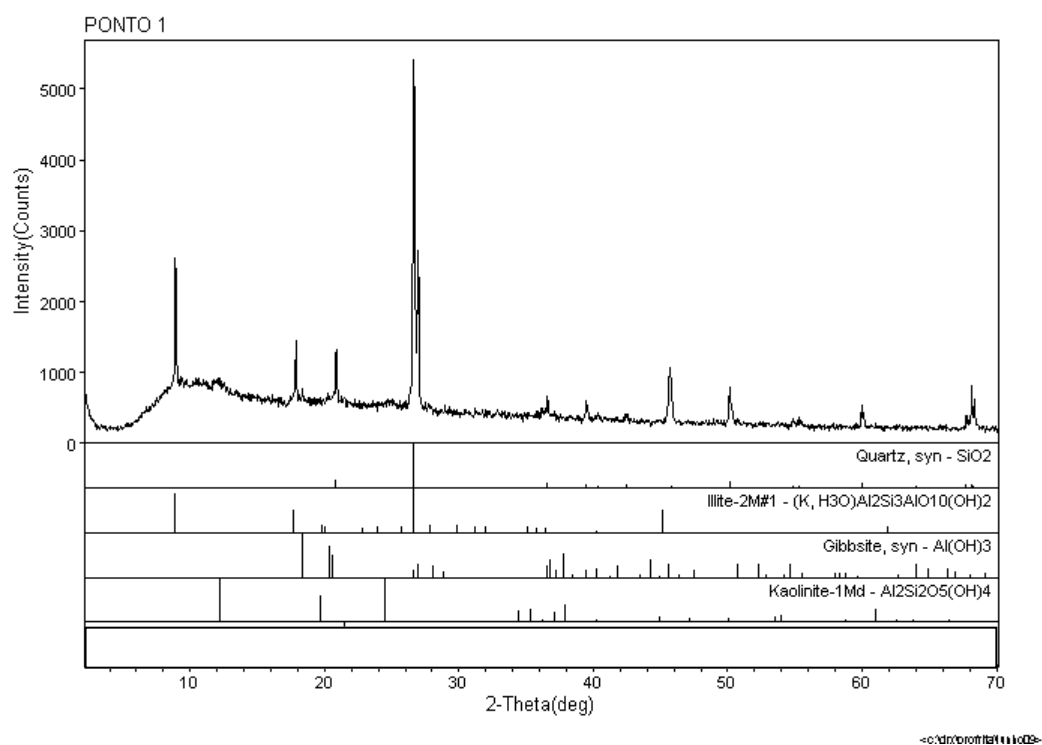


Figura 5.4 – Difratoograma da amostra total do Ponto 1

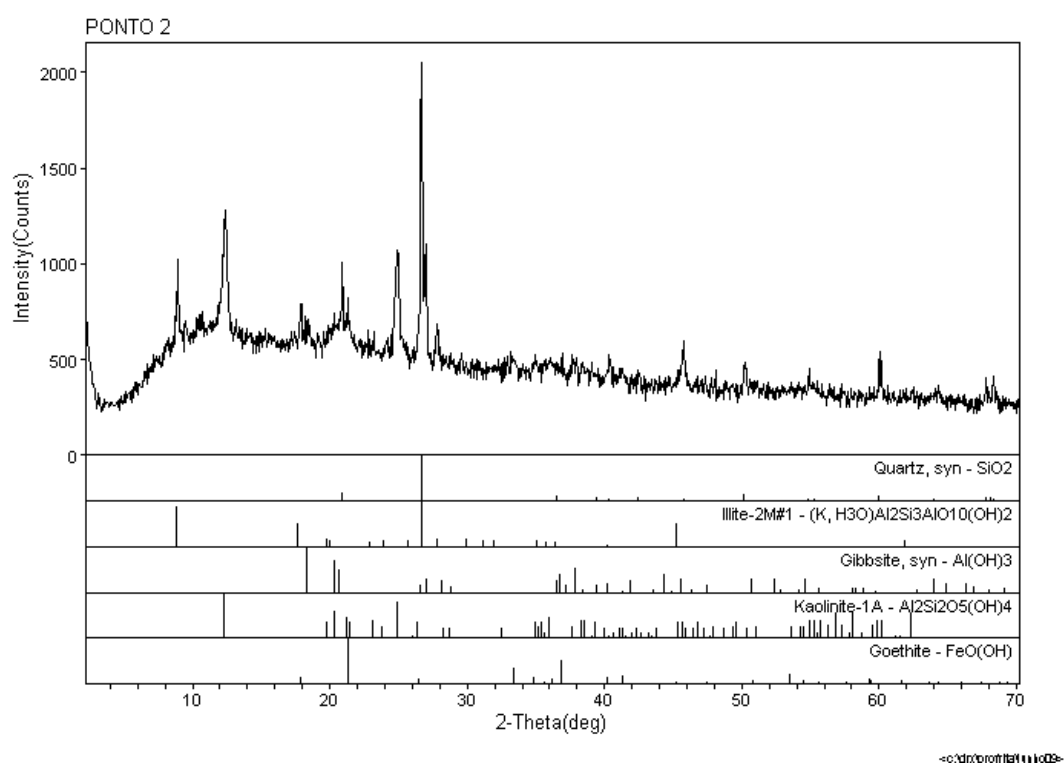


Figura 5.5 – Difratoograma da amostra total do Ponto 2

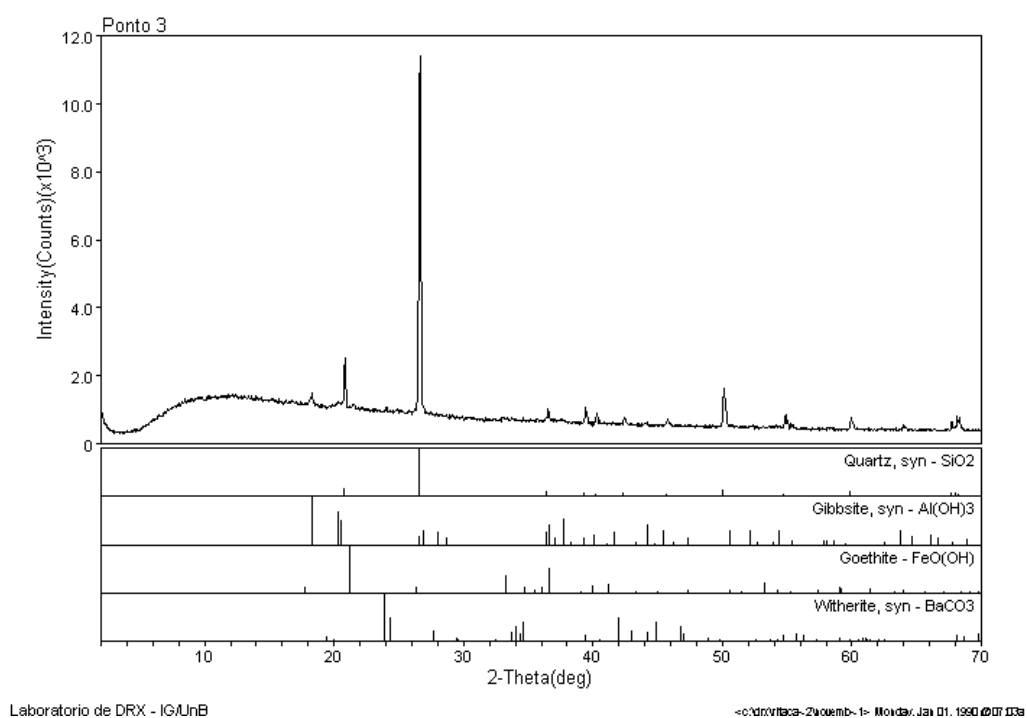


Figura 5.6 – Difratoograma da amostra total do Ponto 3

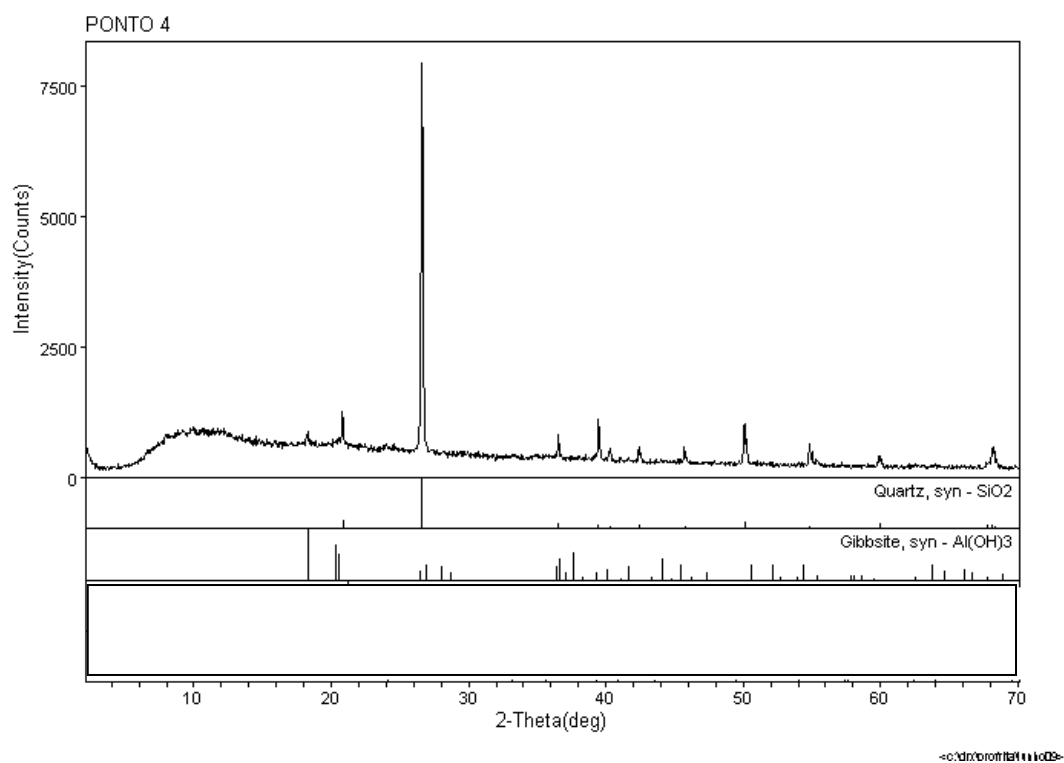


Figura 5.7 – Difratoograma da amostra total do Ponto 4

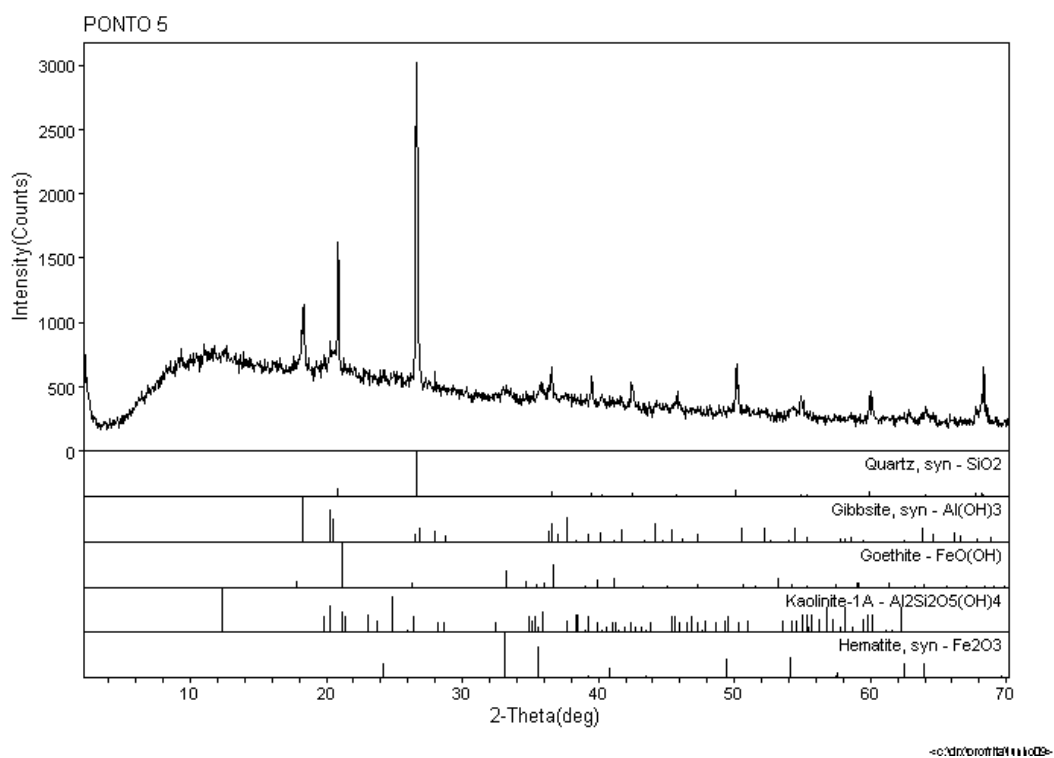


Figura 5.8 – Difratoograma da amostra total do Ponto 5

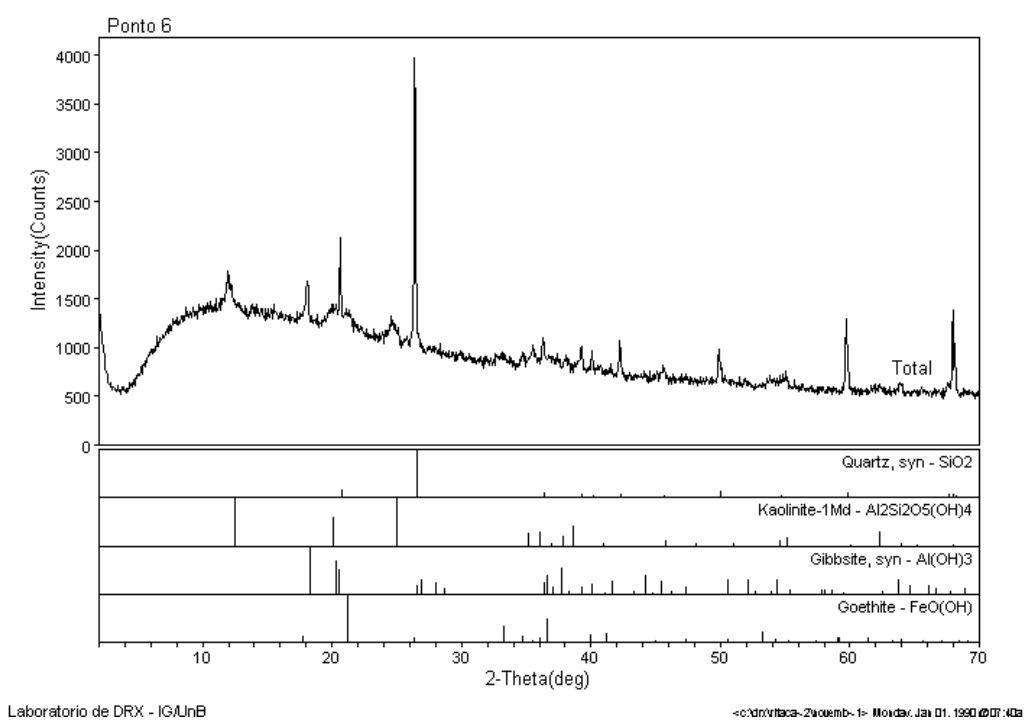


Figura 5.9 – Difratoograma da amostra total do Ponto 6

No Quadro 5.1 é apresentado o resumo do resultado da análise mineralógica por DRX dos seis pontos estudados nesta etapa.

Ponto	AMOSTRA TOTAL						
	Qtz	Cao	Goe	Gib	Vit	Ili	Hem
1	+++	+	---	+	---	++	---
2	+++	++	+	+	---	++	---
3	+++	---	+	++	+	---	---
4	+++	---	---	+	---	---	---
5	+++	+	+	++	---	---	+
6	+++	++	+	++	---	---	---

Onde: Principal: +++; Subordinado: ++ e Traço: +

Qtz = quartzo; Cao = caulinita; Goe = goetita; Gib = gibbsita; Ili = ilita;
Vit = viterita e Hem = hematita.

Quadro 5.1 – Resumo do resultado da análise mineralógica por DRX dos seis pontos estudados

No Quadro 5.2 é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios expedito, pelo método das pastilhas, da composição química por ataque sulfúrico, da composição mineralógica por DRX dos seis pontos estudados.

Identificação Ensaio	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Pastilha	NS'-NA'	NS'-NG	LA-LA'	NA	LA'-LG	LG'
Composição Química						
Quartzo SiO ₂ (%)	4,3	5,1	5,9	5,6	6,9	10,4
Fe ₂ O ₃ (%)	7,1	13,6	6,6	4,0	9,9	11,6
Al ₂ O ₃ (%)	9,1	16,2	15,0	12,0	22,0	24,1
TiO ₂ (%)	0,25	0,30	0,39	0,40	0,55	0,66
Ki	0,90	0,54	0,66	0,79	0,53	0,73
Kr	0,54	0,35	0,51	0,65	0,42	0,56
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	2,01	1,97	3,57	4,71	3,99	3,26
Ki/Kr	1,48	1,54	1,29	1,21	1,26	1,30
DRX	Qtz (P) Ili (S) Gib e Goe (t)	Qtz (P) Ili e Cao (S) Gib e Goe (t)	Qtz (P) Gib (S) Goe e Vit (t)	Qtz (P) Gib (t)	Qtz (P) Gib (S) Goe, Cao e Hem (t)	Qtz (P) Gib e Cao (S) Goe (t)

Onde:

P = Principal; S = Subordinado e t = Traço

Qtz = quartzo; Cao = caulinita; Goe = goetita; Gib = gibbsita; Ili = ilita e Vit = viterita

Quadro 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios da composição mineralógica por DRX, da composição química, da classificação do solo pelo método da pastilha dos seis pontos estudados

A relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ é calculada dividindo cada óxido por seu respectivo peso molecular. No caso do óxido de alumínio, dividindo por 102 e do de ferro por 160.

5.1.1 Análise dos resultados da 1ª etapa

Analizando os resultados dos ensaios realizados nesta etapa, optou-se por avaliá-los de acordo com cada ensaio. A classificação pelo método das pastilhas indicou que os solos dos Pontos 3, 5 e 6 são lateríticos, respectivamente LA-LA', LA'-LG e LG', e os pontos restantes 1, 2 e 4 não lateríticos, a saber: NS'-NA', NS'-NG' e NA.

Quanto aos resultados da análise química, os três pontos com maior teor de alumínio, em ordem decrescente, foram os pontos 6, 5 e 2, com teores variando entre 24,1 e 16,2%. Quanto à relação molecular $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$, tem-se em ordem decrescente os pontos 4, 5, 3, 6, 1 e 2, com valores que variaram de 4,71 a 1,97, na escala de avaliação da intemperização. Com relação aos resultados de Kr, valores inferiores a 2,0 deram indícios de solos bastante intemperizados. No caso deste coeficiente, todos os pontos apresentaram valores inferiores a 2,0; entretanto, os pontos 2 e 5, cujos valores de Kr são 0,35 e 0,42 respectivamente, foram os mais inferiores.

No Quadro 5.3 é apresentado o resumo dos resultados das relações moleculares Ki e Kr e dos argilominerais e sesquióxidos presentes em cada um dos seis pontos estudados.

Ponto	Intervalos de Ki e Kr	Resultado DRX
1	$K_i > 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +); Ili (+ +) e Gib e Cao (+)
2	$K_i < 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +); Cao e Ili (+ +); Gib e Goe (+)
3	$K_i < 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +); Gib (+ +) e Goe e Vit (+)
4	$K_i > 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +) e Gib (+)
5	$K_i < 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +), Gib (+ +) e Cao, Goe e Hem (+)
6	$K_i < 0,75$ e $K_r \leq 0,75$	Qtz (+ + +); Gib e Cao (+ +) e Goe (+)

Onde:

Principal: + + +; Subordinado: + + e Traço: +

Qtz = Quartzo; Cao = Caulinita; Goe = Goetita; Gib = Gibbsita; Ili = Ilita e Vit = Viterita

Quadro 5.3 – Resumo dos resultados da relação sílica-sesquióxido e dos principais componentes minerais obtidos pelo ensaio de DRX da amostra total dos seis pontos estudados

De acordo como informações apresentadas no Quadro 5.3, convém ressaltar que, como o quartzo é o mineral principal em todos os pontos estudados, ele será desconsiderado nesta discussão. Além dele, também a viterita, que apareceu como traço no Ponto 3, será descartada

por não ser um mineral comum em solos da região e provavelmente seja decorrente da contaminação do mesmo.

E ainda pode-se extrair dos resultados de DRX registrados no Quadro 5.3 que:

Ponto 1: a ilita aparece como argilomineral subordinado enquanto que a gibbsita e caulinita apareceram como traços;

Ponto 2: a caulinita e a ilita apareceram como argilominerais subordinados e a gibbsita e goetita como traço;

Ponto 3, a gibbsita apareceu como argilomineral subordinado e goetita como traço;

Pontos 4: a gibbsita ocorreu como fração subordinada;

Ponto 5: a gibbsita apareceu como argilomineral subordinado e a caulinita, goetita e hematita como traço;

Ponto 6: a gibbsita e caulinita como subordinados e goetita como traço.

Quanto aos resultados de DRX da amostra total, os destaques puderam ser dados aos sesquióxidos de Fe e Al e argilominerais na condição subordinada a saber; os solos dos pontos 3, 5 e 6 apresentaram gibbsita na condição subordinada, os solos 2 e 6 apresentaram caulinita e os solos 1 e 2, a ilita, que é um argilomineral 2:1, ou seja, indicando um solo menos intemperizado.

Fazendo uma análise de cada ponto, pode-se abstrair que o ponto 1 foi classificado pelo método das pastilhas como não laterítico. Comparado aos outros pontos, o solo apresentou o segundo maior valor na relação Ki/Kr. Em termos do resultado de DRX, apresentou ilita como argilomineral subordinado e caulinita e gibbsita como traço. A presença de ilita nesta proporção, por ser um argilomineral 2:1, com características expansivas, dá indícios de um solo menos maduro.

O ponto 2 também foi classificado como não laterítico, mas apresentou, comparativamente aos outros solos estudados, a menor relação Al e Fe e o menor valor de Kr. No tocante à relação entre Al e Fe, o solo encontrado neste ponto apresentou coeficientes menores, enquanto no caso de Kr a condição inverteu, ou seja, apresentou maiores valores. Quanto à análise de DRX, neste ponto foram encontrados ilita e caulinita como argilominerais subordinados e goetita e gibbsita como traço. Semelhante ao Ponto 1, a presença de ilita pode comprometer o uso para pavimentação.

No caso do Ponto 3, a classificação pelo método das pastilhas indicou como laterítico arenoso ou areia laterítica. Em termos de relação Al e Fe e do índice Kr, este ponto apresentou, comparativamente, condição intermediária para o uso pretendido. Quanto ao resultado de DRX, apresentou gibbsita como mineral subordinado e goetita como traço. A presença de gibbsita indicou um nível mais avançado de intemperização.

A amostra do Ponto 4 foi classificada como areia não laterítica pelo método das pastilhas, apesar de, ao verificar a Figura 5.3, constatar-se que o resultado está no limite entre o areia laterítica e não laterítica. Nesta amostra percebeu-se, comparada às outras amostras, a mais alta relação Al e Fe e a maior valor de Kr. Em termos da análise de DRX apresentou a gibbsita como mineral traço;

No Ponto 5, a classificação pelo método das pastilhas indicou-o como solo laterítico arenoso ou argila laterítica. Em termos da relação molecular Kr e relação Al e Fe, ele apresentou valores bastante significativos. Quanto à análise de DRX, a detecção de gibbsita como sesquióxido subordinado e a presença de caulinita, hematita e goetita como traço indicaram um nível avançado de intemperização.

No Ponto 6, classificado pelo método das pastilhas como solo laterítico argiloso, apresentou a quarta colocação quanto à relação Al e Fe, a quinta em termos de Kr, e em termos de DRX a presença de gibbsita e caulinita como subordinado e a goetita como sesquióxido traço.

O Quadro 5.4 apresenta uma matriz de interação dos critérios, com a finalidade do uso do material para pavimentação, a partir da classificação pelo método das pastilhas e dos resultados das composições mineralógica e química.

Identificação Ensaio	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Pastilha	(6°)	(6°)	(1°)	(6°)	(1°)	(1°)
Comp. Química						
Al₂O₃ (%)	(6°)	(6°)	(1°)	(6°)	(1°)	(1°)
Kr	(1°)	(1°)	(1°)	(6°)	(1°)	(6°)
Al₂O₃/Fe₂O₃	(6°)	(6°)	(1°)	(1°)	(1°)	(6°)
Ki/Kr	(1°)	(1°)	(6°)	(6°)	(6°)	(1°)
DRX	(6°)	(6°)	(1°)	(6°)	(1°)	(1°)

(°) o número entre parêntesis indica o grau de importância do critério analisado com relação ao uso em pavimentação, sendo o 1° o mais indicado e o 6° o menos indicado.

Quadro 5.4 – Matriz de interação dos critérios a partir dos resultados dos ensaios da composição mineralógica por DRX, da composição química dos pontos 1 a 6

A partir do cruzamento das informações registradas na matriz de interação apresentada no Quadro 5.4, optou-se por desconsiderar os resultados da análise química, com exceção do teor de alumínio, pois nos resultados restantes não foram observadas correlações com os de DRX e do método das pastilhas. Em virtude disso, os dados registrados na referida tabela, dos Pontos 3, 5 e 6 apresentaram um conjunto de condições que justificariam a continuidade do estudo com vistas ao uso em pavimentação. Estes são locais que, de acordo com o resultado do ensaio pelo método das pastilhas, foram classificados como solos de comportamento laterítico, arenoso ou argiloso. Pela composição mineralógica estes três pontos apresentaram gibbsita como mineral com alumínio, indicando comparativamente um nível mais elevado de intemperização. Os Pontos 3 e 5 apresentaram condições semelhantes e a definição por um deles se deveu à acessibilidade ao local para a coleta de amostras. Portanto, para a certificação da melhor escolha, foram selecionados os Pontos 3 e 6 como representativos dos solos lateríticos arenosos e argilosos e neles foram realizados os ensaios de DRX da amostra total, fração argila e solvatada.

5.1.2 Resultados e análise complementares da 1ª etapa

Os resultados apresentados a seguir trazem uma avaliação mais detalhada dos pontos selecionados para a análise mais detalhada. As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os difratogramas dos Pontos 3 e 6 amostrados e no Quadro 5.5 são apresentados os resultados de DRX das frações total e argila dos mesmos pontos e suas respectivas massas específicas.

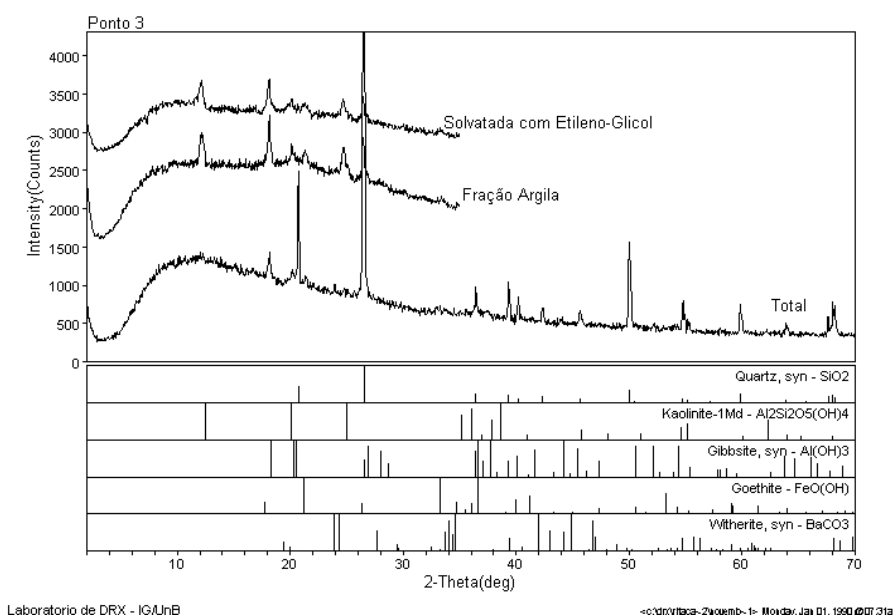


Figura 5.10 – Difratograma da amostra do Ponto 3, análise acumulada

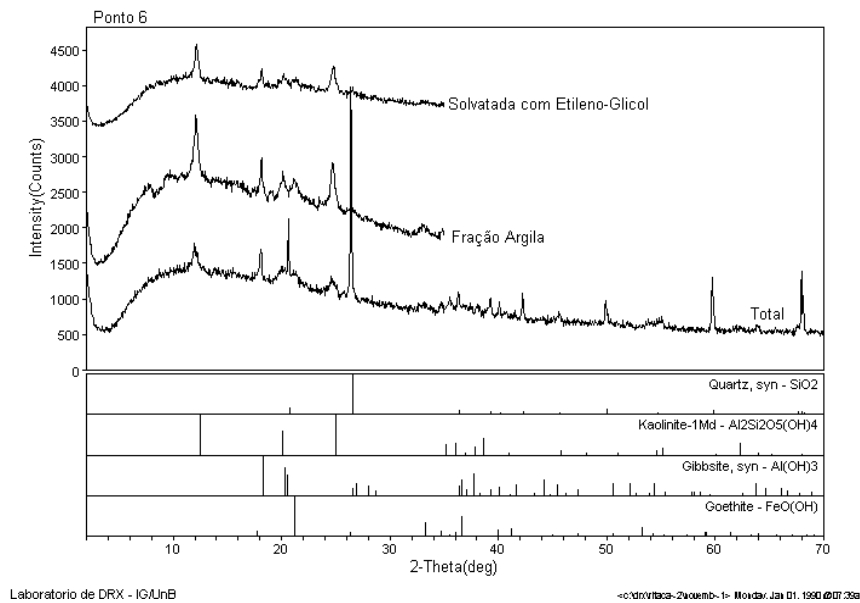


Figura 5.11 – Difratograma da amostra do Ponto 6, análise acumulada.

PONTO	AMOSTRA TOTAL					FRAÇÃO ARGILA			MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
	Qtz	Cao	Goe	Gib	Vit	Cao	Goe	Gib	
3	+++	+	+	++	+	++	+	+++	2711
6	+++	++	+	++	---	+++	+	++	2758

Onde:

Principal: + + +; Subordinado: + + e Traço: +

Qtz = quartzo; Cao = caulinita; Goe = goetita; Gib = gibbsita; Ili = ilita e Vit = viterita

Quadro 5.5 – Resumo da análise mineralógica das frações total e argila dos pontos 3 e 6, determinados por DRX e suas massas específicas

As amostras denominadas Pontos 3 e 6 foram submetidas a ensaios de difração de Raios - X que permitiram a identificação dos minerais formadores do solo. Para uma identificação mais precisa dos argilominerais, estas amostras foram analisadas em termos das frações total e argila e ainda o preparo com da fração argila solvatada com etileno-glicol.

Na análise da fração total, o Ponto 3 apresentou quartzo, goetita, gibbsita e viterita. Não foi detectada presença de caulinita, o que foi confirmado com o ensaio da fração argila. Como comentado no outro ensaio, a viterita encontrada neste solo pode ser uma contaminação por fertilizante já que não é um mineral comumente encontrado em solo. No Ponto 6 foram detectados a presença de caulinita, goetita, quartzo e gibbsita. Proporcionalmente a relação gibbsita/quartzo foi maior do que a apresentada na amostra do Ponto 3.

Na análise da fração argila, no ensaio no Ponto 3 pode ser observada a presença de caulinita, gibbsita e goetita. O quartzo e a viterita já não foram detectados na fração argila e na condição solvatada. O pico intenso do quartzo na fração total impediu que fosse captada a presença de caulinita. A gibbsita apresentou maior destaque em relação à caulinita. No Ponto 6 a caulinita apresentou maior destaque comparada à gibbsita e à goetita. O quartzo, a exemplo da amostra anterior, não apareceu nas frações de argila dos Pontos 3 e 6.

As duas amostras analisadas apresentaram praticamente os mesmos argilominerais. Observou-se nelas a presença preponderante dos minerais de quartzo. A caulinita apresentou maior intensidade no Ponto 6 comparado ao Ponto 3. A presença de gibbsita (hidróxido de alumínio) e goetita (hidróxido de ferro) nos dois solos deu indício de laterização acentuada, resultado da alteração sofrida pelas rochas ao longo do tempo.

As amostras submetidas aos ensaios de difração de Raios-X permitiram a identificação dos minerais formadores do solo e confirmaram o processo de laterização dando segura indicação destes solos serem viáveis para pavimentação. Em virtude disso, os dois pontos selecionados, os Pontos 3 e 6, apresentaram condições adequadas para o aprofundamento das análises na etapa posterior.

Quando foi iniciada a execução dos poços para avaliação em perfil, observou-se pela análise visual que o material recolhido do Poço 2, situado no Ponto 3, não apresentava as características esperadas. Isso exigiu a escolha imediata de um novo local com propriedades adequadas ao estudo pretendido. Por esta razão, foi feita uma nova visita ao local e decidiu-se pelo estudo preliminar de um novo ponto, denominado Ponto 7, cujas coordenadas planas (datum WGS/84) obtidas pelo sistema de navegação *Global Positioning System* (GPS) são em $x = 668.955$ e em $y = 8.148.969$. O ponto escolhido localiza-se no bordo direito da rodovia que liga a cidade de Abadia de Goiás e o povoado de Socorro. A Figura 4.1 ilustra o local onde o Ponto 7 foi pesquisado.

No estudo preliminar do Ponto 7 foram realizados o ensaio de classificação pelo método das pastilhas e o DRX. Nas Figuras 5.12 e 5.13 são apresentados o ábaco do método das Pastilhas e o resultado ensaio de DRX, respectivamente e no Quadro 5.6 o resumo do resultado do ensaio de DRX do Ponto 7.

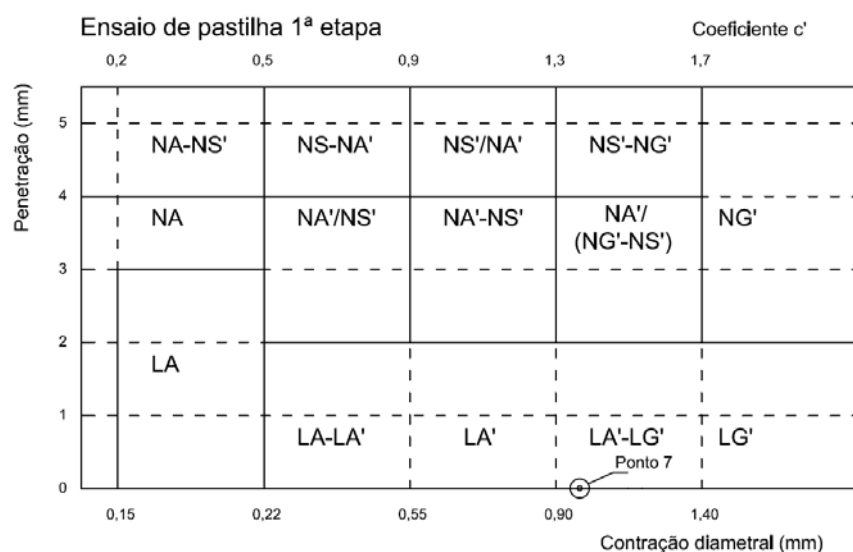


Figura 5.12 – Ábaco do método expedito das Pastilhas com os resultados do Ponto 7

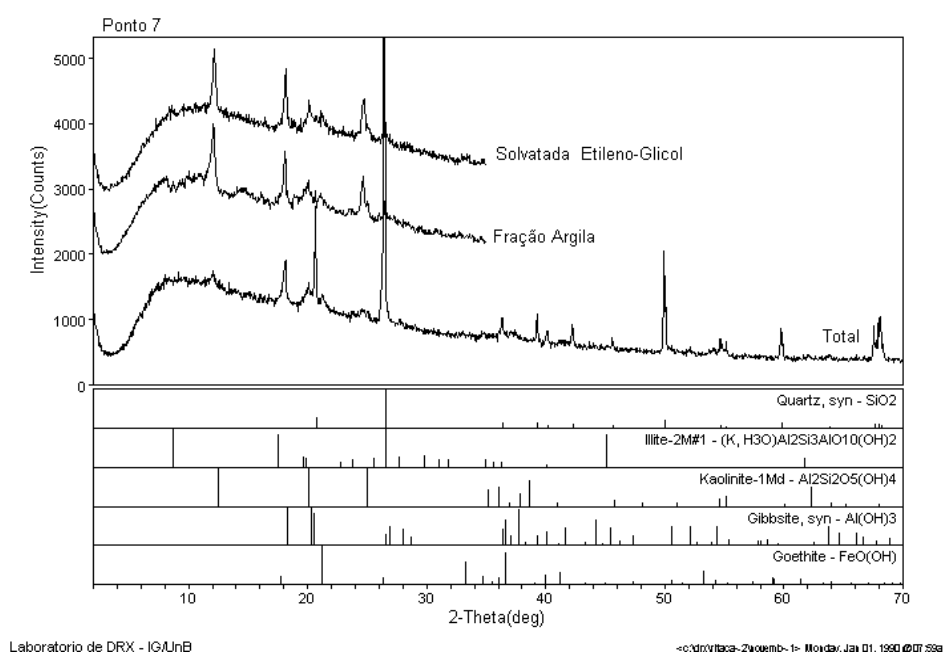


Figura 5.13 – Difratoograma da amostra do Ponto 7, análise acumulada.

Ponto	AMOSTRA TOTAL				FRAÇÃO ARGILA			
	Qtz	Cao	Goe	Gib	Cao	Goe	Gib	Ili
7	+++	+	+	++	+++	+	+++	+

Onde:

Principal: +++; Subordinado: ++ e Traço: +

Qtz = quartzo; Cao = caulinita; Goe = goetita; Gib = gibbsita; Ili = illita

Quadro 5.6 – Resumo da análise mineralógica das frações total e argila do ponto 7, determinados por DRX

Na amostra total do ponto 7 foram detectados caulinita, goetita, quartzo e gibbsita, sendo os dois primeiros em pequena intensidade e a gibbsita em intensidade secundária. Na fração argila foram encontrados a gibbsita, caulinita, illita e goetita, sendo os dois primeiros como componentes principais e a goetita e illita em pequena intensidade.

Os resultados do ensaio de pastilhas e de DRX indicaram que o ponto 7 apresentava condições adequadas para o aprofundamento das análises na etapa posterior, substituindo Ponto 3.

5.2 RESULTADOS DA 2ª ETAPA

Tem-se nesta segunda fase os resultados dos ensaios de caracterização e classificação convencionais pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e pelo *Transportation Research Board* (TRB); classificação pelo método MCT e das pastilhas; ensaio de adsorção de azul de metileno; as análises químicas e por difração de Raios-X e compactação, expansão e *California Bearing Ratio* (CBR) do Poço 1, antigo Ponto 6, e do Poço 3, antigo Ponto 7.

É importante destacar que as duas áreas selecionadas, onde foram escavados os Poços 1 e 3, foram representativas dos dois compartimentos geológicos da região. O Poço 1 está localizado no grupo Complexo Anápolis-Itauçu, que está assentado no substrato rochoso ortogranulítico e o Poço 3, localizado no grupo Araxá, está sobre o substrato de rochas xistosas, conforme pode ser visualizado na Figura 3.4.

5.2.1 Poço 1

Segundo descrito na metodologia, para esta etapa, as análises foram realizadas ao longo do perfil, até a profundidade de 5,0 m tendo em vista a verificação da adequabilidade do material para uso em pavimentação. A Figura 5.14 ilustra os solos estudados de cada profundidade do Poço 1.



Prof. 1,0 m – material destorroado e passado na # 2,0 mm



Prof. 2,0 m – material destorroado e passado na # 4,8 mm



Prof. 3,0 m – material destorroado e passado na # 4,8 mm e composto com a fração pedregulho



Prof. 4,0 m – material natural e seco ao sol



Prof. 5,0 m – material natural e seco ao sol

Figura 5.14 – Fotos das amostras de solo do Poço 1 em todas as profundidades. Autor: Vale (2010)

5.2.1.1 Caracterização e classificação dos solos

Os ensaios de granulometria das amostras de solo do Poço 1 foram realizados por meio de peneiramento e sedimentação com e sem o uso de defloculante nas profundidades de 1,0 a 5,0 m. Na Tabela 5.1 são apresentadas as porcentagens de cada material, obtidas das planilhas dos resultados de peneiramento e sedimentação e obedecendo o critério da NBR 6502

(ABNT, 1995). A Tabela 5.1 apresenta todas as curvas granulométricas das cinco profundidades analisadas do Poço 1, com e sem o uso de defloculante e as Figuras 5.16 e 5.17 apresentam separadamente as curvas granulométricas sem o uso de defloculante e com o uso de defloculante para o perfil, respectivamente. Nas Figuras A.1 a A.5, do Apêndice A, são apresentadas separadamente as curvas granulométricas de cada profundidade, com e sem o uso de defloculante.

Tabela 5.1 – Frações granulométricas das amostras analisadas do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m

Poço 1 Prof. (m)	Com defloculante				Sem defloculante			
	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
1,0	1,14	36,74	19,00	43,12	1,14	53,72	45,14	0,00
2,0	3,21	38,77	15,44	42,58	3,21	53,30	43,49	0,00
3,0	2,94	29,87	27,46	39,73	2,94	47,52	49,54	0,00
4,0	0,59	25,29	51,02	23,10	0,59	34,06	65,35	0,00
5,0	0,36	23,41	58,74	17,49	0,36	35,51	64,13	0,00

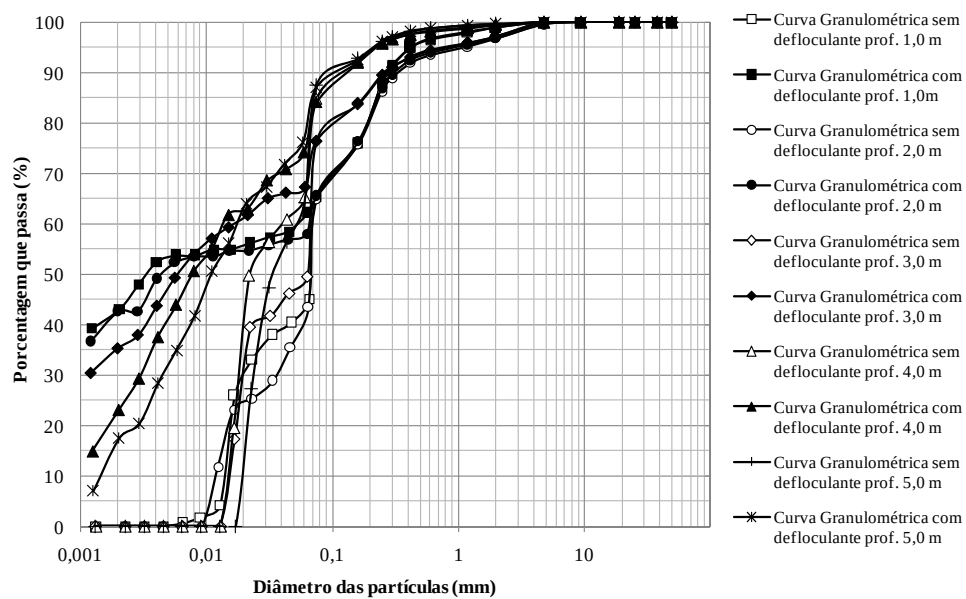


Figura 5.15 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1 nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com e sem o uso de defloculante

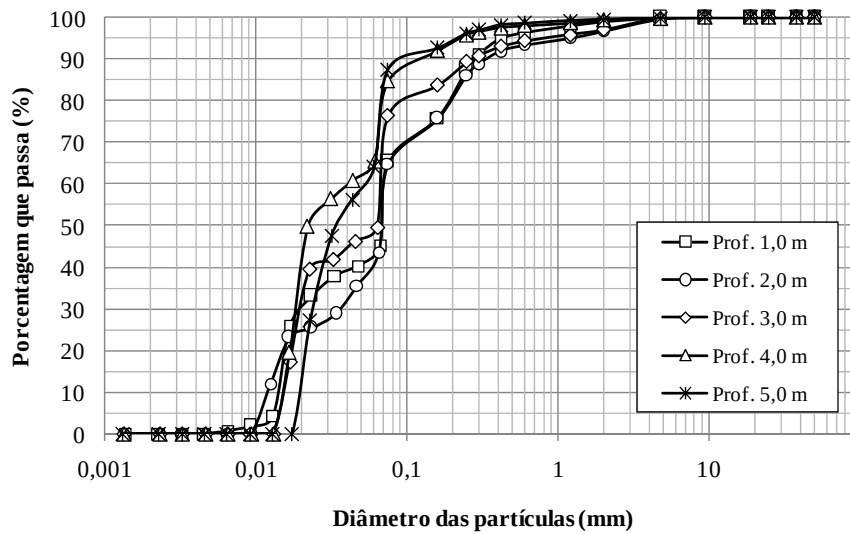


Figura 5.16 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, sem o uso de defloculante

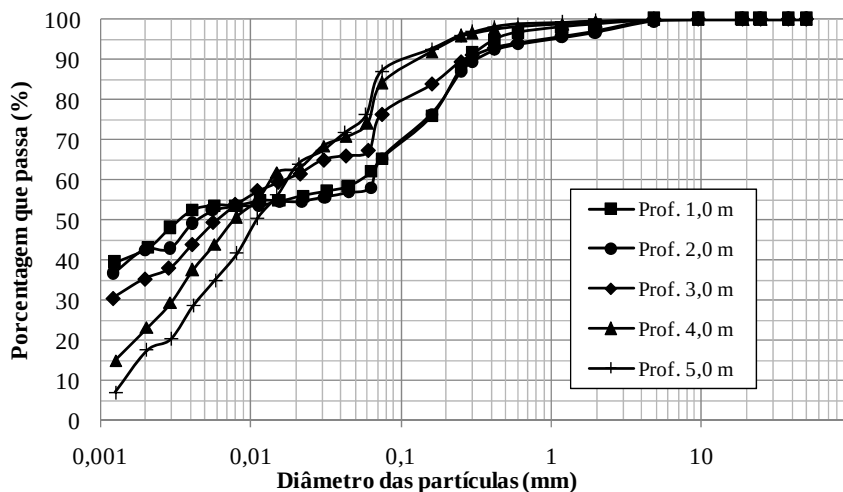


Figura 5.17 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com o uso de defloculante

As amostras de solo do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, quando ensaiadas sem o uso de defloculante não apresentaram frações do tamanho de argila nas suas composições granulométricas, sendo compostas apenas das frações pedregulho, silte e areia. Nas profundidades de 1,0 e 2,0 m, a fração predominante é a de areia e nas demais prevalece a fração silte. Sendo assim, nessa condição tem-se que as amostras possuem granulometrias mais grosseiras.

No entanto, quando as amostras foram ensaiadas com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, todas apresentaram fração argila, sendo que nas três primeiras profundidades esta fração passou a ser predominante concomitante com redução significativa nas frações silte e

areia. Esta variação nos resultados ocorreu devido à atuação do defloculante que desfez os agregados formados provavelmente pela cimentação e/ou presença de pontes de argila das partículas argilosas do solo. Essa é uma característica de um solo tropical maduro, o qual possui agregação na sua estrutura.

Na Figura 5.18 é apresentado o perfil granulométrico do Poço 1. Fazendo uma análise desta figura é possível avaliar a alteração granulométrica ao longo do perfil do solo estudado com e sem o uso de defloculante. Com relação à fração areia, pode-se perceber semelhança na configuração das curvas granulométricas nas duas condições citadas. O uso do defloculante promoveu uma redução significativa, de aproximadamente 17%, na profundidade de 1,0 m, permanecendo praticamente constante nos dois metros seguintes. Isto pode ser explicado quando se observa que a variação da quantidade de areia em relação à fração argila é pequena à medida em que aumenta a profundidade. Já na profundidade de 4,0 m esta redução foi de apenas 9%, mas na profundidade 5,0 m a redução atingiu 12%.

Quanto à fração silte, nos dois primeiros metros o uso de defloculante provocou redução dessa fração em aproximadamente de 27%. Esta variação foi decrescente com a profundidade, indicando um menor teor de agregação na fração silte com a profundidade. Ou seja, para o Poço 1, em profundidades maiores há um aumento real da quantidade de silte. No último metro analisado em profundidade, a redução proporcional da fração silte foi de somente 5%.

No caso da fração argila, o uso do defloculante provocou efeitos mais consideráveis, pois essa fração passou de 0 a 40% nos primeiros três metros e para aproximadamente 20% nas profundidades maiores analisadas.

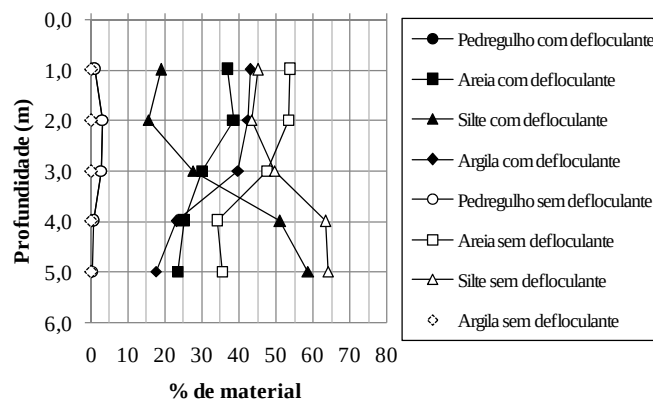


Figura 5.18 – Perfil granulométrico do Poço 1

Nas análises granulométricas sem o uso de defloculante, nota-se que em todo o perfil as frações areia e silte sofreram alterações significativas em relação aos resultados obtidos com o uso de defloculante. Entretanto, coube à fração silte um maior teor de desagregação.

Na Tabela 5.2 registra-se que o percentual de material agregado total está diretamente relacionado ao teor de argila com defloculante, ou seja, as agregações presentes nas outras frações devem ter advindos totalmente da fração argila, que diminui sua porcentagem com a profundidade e consequentemente a porcentagem de agregados totais.

Tabela 5.2 – Porcentagem de argila do Poço 1, com e sem o uso de defloculante, nas cinco profundidades estudadas

Ident.	Prof. (m)	Argila (%)		Agregados Totais (%)	Teor de Agregação
		C/ defloc.	S/ defloc.		
Poço 1	1,0	43,12	0,00	43,12	1,00
	2,0	42,58	0,00	42,58	1,00
	3,0	39,73	0,00	39,73	1,00
	4,0	23,10	0,00	23,10	1,00
	5,0	17,49	0,00	17,49	1,00

Onde:

Agregados totais (%) = Argila com defloculante (%) - Argila sem defloculante (%)

Teor de Agregação = Agregados Totais (%) / Argila com defloculante (%)

A Figura 5.19 apresenta as propriedades de consistência (w_L , w_P e IP) do perfil estudado e a Tabela 5.3 os valores obtidos para a massa específica dos grãos (ρ_s), as propriedades de consistência e as classificações convencionais SUCS e TRB.

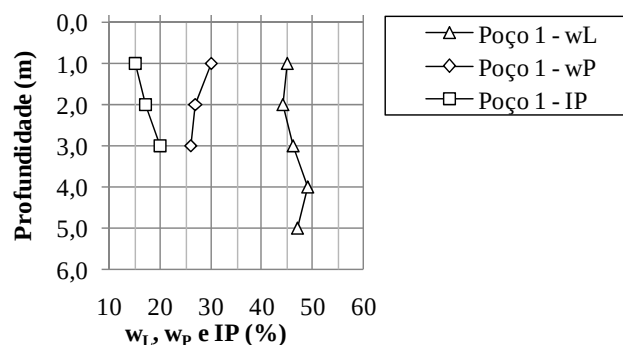


Figura 5.19 – Limites de liquidez e plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras de 1,0 a 5,0 m do Poço 1

Obs.: O resultado dos ensaios do limite de plasticidade das amostras nas profundidades 4,0 e 5,0 m são Não Plásticas.

Tabela 5.3 – Massa específica dos grãos, limites de consistência e classificações das profundidades 1,0 a 5,0m, do Poço 1.

Ident.	Prof. (m)	Propriedades					Classificação	
		ρ_s (kg/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	IP (%)	IG	SUCS	TRB
Poço 1	1,0	2759	45	30	15	9	ML	A-7-5
	2,0	2801	44	27	17	9	ML	A-7-6
	3,0	2824	46	26	20	13	CL	A-7-6
	4,0	2819	49	NP	NP	---	ML	A-5
	5,0	2875	46	NP	NP	---	ML	A-5

Onde:

ρ_s = massa específica dos grãos; w_L = limite de liquidez; w_p = limite de plasticidade;
 IP = índice de plasticidade; IG = Índice de Grupo; SUCS = Sistema Unificado de
 Classificação de Solos; TRB = *Transportation Research Board*; NP = não plástico.

O limite de liquidez apresentou valores que variaram entre 45 e 50% ao longo da profundidade. Quanto à plasticidade, verifica-se que até 3,0 m de profundidade este parâmetro situa-se em torno de 30%. No entanto, a partir de 4,0 m o comportamento do solo passa a ser não plástico, o que pode ser justificado pela presença de silte com porcentagem superior a 60% para estas profundidades, conforme apresentado na Tabela 5.1 e Figura 5.18.

O solo estudado apresentou massa específica dos grãos (ρ_s) variando de 2759 a 2875 kg/m³ ao longo do perfil, sendo considerado praticamente constante. As massas específicas apresentadas neste perfil são superiores às obtidas por Sousa (2010) no estudo das voçorocas do córrego do André e a voçoroca Tingá no município de Quirinópolis - GO, assentadas respectivamente num Latossolo distrófico e num Neossolo Quartzarênico. No entorno destas voçorocas a massa específica dos grãos, a 20 cm de profundidade, foi aproximadamente 2500 kg/m³. Os resultados da massa específica dos grãos obtidos para os solos do perfil estudado estão compatíveis com os registrados para os solos da região.

No Quadro 5.7 é feito um resumo dos resultados de peso específico apresentado por Lambe e Whitman (1969) e Delgado (2007). Fazendo uma comparação entre os resultados obtidos para o perfil do solo estudado, apresentado na Tabela 5.3 e os dados apresentados nesse quadro, constata-se que o solo em estudo apresenta valores mais próximos dos obtidos por Delgado (2007), podendo indicar a presença de caulinita, quartzo e gibbsita.

Fonte	Minerais	ρ_s (kg/m ³)
Lambe e Whitman (1969)	Hematita	5300
	Goetita	5430
	Anatásio	3800 - 3900
	Rutilo	4200 - 5500
Delgado (2007)	Caulinita	2550
	Quartzo	2600
	Gibbsita	2400
	Hematita	5100
	Goetita	4000 - 4200

Onde:

ρ_s = massa específica dos grãos

Quadro 5.7 – Massa específica dos grãos de alguns minerais. Adaptado de Lambe e Whitman (1969) e Delgado (2007).

Também pode ser abstraída da Tabela 5.3, conforme Caputo (1988), é relativa à classificação dos solos de acordo com o Índice de Plasticidade. Para valores de $1 < IP < 7$ os solos são classificados como fracamente plásticos, se $7 < IP < 15$ são medianamente plásticos e se $IP > 15$ os solos são classificados como altamente plásticos. Verifica-se, então que a amostra do Poço 1 na profundidade 1,0 m está no limite entre mediana e altamente plástica e nas profundidades 2,0 e 3,0 m são classificadas como altamente plásticas. Nas profundidades restantes o solo é não plástico.

Com relação à classificação destes solos pelo sistema SUCS, todas as profundidades foram enquadradas como siltes de baixa compressibilidade (ML), com exceção da amostra de solo da profundidade de 3,0 m que foi classificada como argila de baixa compressibilidade (CL). Entretanto, no caso desta amostra, os resultados obtidos, quando plotados na Carta de Plasticidade do ábaco de classificação de solos finos pelo sistema SUCS, indicam que ela está localizada na interface entre silte e argila de baixa compressibilidade. É importante destacar que todos os solos deste Poço estão abaixo da linha A, ou no limite, na carta de Casagrande. A justificativa pode ser encontrada nas constatações de Cardoso (2002) que, ao estudar os solos de Brasília, observou que a presença marcante dos oxi-hidróxidos de ferro afetou marcadamente o comportamento dos solos estudados. E o mais relevante pode ser o fato de o armazenamento de água livre nos poros presentes no interior dos agregados elevarem os limites de liquidez e de plasticidade, mas sem muita interferência no Índice de Plasticidade (IP). Para Cardoso (2002), talvez esta seja a condição que justificaria a localização dos pontos abaixo da linha A.

De acordo com a TRB, a amostra da profundidade de 1,0 m foi classificada como (A-7-5), a da profundidade 2,0 e 3,0 m foram classificadas como solos argilosos (A-7-6) e nas duas últimas profundidades estudadas os solos foram classificados como siltosos (A-5). Nestas duas profundidades, o IG não foi considerado, em virtude da impossibilidade do seu cálculo pois as amostras são não plásticas. Entretanto, isso não compromete a definição da classe do solo já que o IG, na maioria das vezes, é usado apenas para confirmação da classificação.

Comparando as duas classificações, SUCS e TRB, nas profundidades 1,0 e 2,0 m, destaca-se a divergência entre elas, pois na primeira os materiais foram enquadrados siltes de baixa compressibilidade (ML) e na segunda como solos argilosos, A-7-5 e A-7-6, respectivamente. Esta divergência na classificação, particularmente nas camadas mais superiores cujas condições de intemperização são mais intensas, confirma os conceitos correntes de que os sistemas de classificação tradicional não refletem as peculiaridades dos solos tropicais. Peculiaridades em termos de comportamento devido principalmente às suas composições mineralógicas e químicas, que não são levadas em conta na classificação tradicional de solos.

Analisando as duas classificações com vistas à aplicação em pavimentação, pode-se afirmar que pela TRB, os solos deste poço, em todas as profundidades, são considerados de comportamento sofrível a mau para uso em subleito. Pela classificação SUCS, de acordo com Lambe e Whitman (1969), os solos classificados como ML, exceção para a profundidade 3,0 m, não são indicados para uso em revestimento primário. Já o solo da profundidade 3,0 m, classificado como CL, apresenta grau 7 para esta finalidade, numa escala que varia de 1 a 14, sendo o grau 1 o mais satisfatório.

Outro parâmetro que possibilita a análise ou a previsão do solo é a atividade da argila (Ia). Para Bastos (2010), este índice avalia o potencial da fração argila em conferir plasticidade e coesão ao solo, dando indicativo do tipo de argilomineral. De acordo com Skempton, (1953¹³ apud VARGAS, 1978), este índice é definido como a relação entre o seu índice de plasticidade e a porcentagem de argila, ou seja, grãos com diâmetro inferior a 2 μ m, conforme a Equação 5.1.

¹³ Skempton, A. W., "The Colloidal Activity of Clays", Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mec. Found. Eng. Zurich, 1953.

$$I_a = \frac{IP}{\% \phi < 2\mu} \quad (5.1)$$

Onde:

I_a = Índice de Atividade da Argila

IP = índice de plasticidade (%)

ϕ = diâmetro dos grãos

Ainda segundo Skempton (1953 apud VARGAS, 1978), este índice pode ser útil como indicação de menor ou maior influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidal da fração argila nas propriedades geotécnicas do solo argiloso. Solo com atividade normal tem I_a entre 0,75 e 1,25, valores superiores a 1,25 indicam argilas com maior atividade e inferiores a 0,75 são inativas. Segundo Bastos (2010) os solos com I_a inferior a 0,75 inferem argilas 1:1 e maiores que 1,25, argilas 2:1. Portanto, de acordo com este critério as argilas das profundidades de 1,0 a 3,0 m são do tipo 1:1, como por exemplo, a caulinita.

A Tabela 5.4 apresenta as porcentagens de argila, seus valores de IP e de I_a nas cinco profundidades. Segundo estes resultados, como os materiais nas profundidades de 1,0 a 3,0 m apresentaram I_a com valores inferiores a 0,75, pode-se prever que a argila é inativa, ou seja, do tipo 1:1.

Tabela 5.4 – Classificação da atividade da argila nas profundidades 1,0 a 5,0 m do Poço 1

Ident.	Prof. (m)	Argila (%)	IP	I_a	Classificação da atividade da argila
Poço 1	1,0	43	15	0,35	Inativa
	2,0	43	17	0,40	Inativa
	3,0	40	20	0,50	Inativa
	4,0	23	NP	---	---
	5,0	17	NP	---	---

Delgado (2007) vai mais além ao constatar, pelos seus estudos, que este índice não contempla a influência marcante dos oxi-hidróxidos de ferro e do nível de agregação que caracteriza os solos tropicais, em especial os mais intemperizados. Segundo ela, pode-se supor que a agregação que ocorre nos solos tropicais mais intemperizados afeta a plasticidade no tocante à textura e a interação entre as partículas.

5.2.1.2 Classificação e identificação do carácter laterítico dos solos

Neste item são apresentados os resultados da metodologia MCT, método expedito das pastilhas, azul de metileno pelo método da mancha, análise química e difratometria de Raios-X. A análise desses dados focou a identificação ou não do carácter laterítico dos solos estudados.

A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de classificação MCT, método expedito das pastilhas e o ensaio de Azul de Metileno pelo método da mancha. A Figura 5.20 apresenta os resultados do ensaio expedito pelo método das pastilhas e a Figura 5.21 o resultado do ensaio de classificação MCT das amostras do Poço 1 e enquadramento na área de argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos. A Figura 5.22 retrata os resultados do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha.

Tabela 5.5 – Resumo dos resultados de classificação pelo método MCT convencional, método expedito pastilhas e por Adsorção de Azul de Metileno, para o perfil do Poço 1

Prof. (m)	MCT convencional					Expedito (Pastilha)				Azul de Metileno
	c'	d'	Pi (%)	e'	Classif.	ct (mm)	Penet. (mm)	c'	Classif.	
1,0	2,49	49,38	79	1,06	LG'	1,60	0	1,81	LG'	Argilomineral pouco ativo
2,0	2,57	23,62	35	1,06	LG'	1,82	0	1,92	LG'	Argilomineral pouco ativo
3,0	1,48	25,71	107	1,23	NA'	1,57	3	1,79	NG'	Argilomineral pouco ativo
4,0	1,39	11,83	287	1,67	NS'	1,34	5	1,65	NS'-NG'	Argilomineral ativo
5,0	1,35	2,87	302	2,15	NS'	0,91	5	1,40	NS'-NG'	Argilomineral ativo

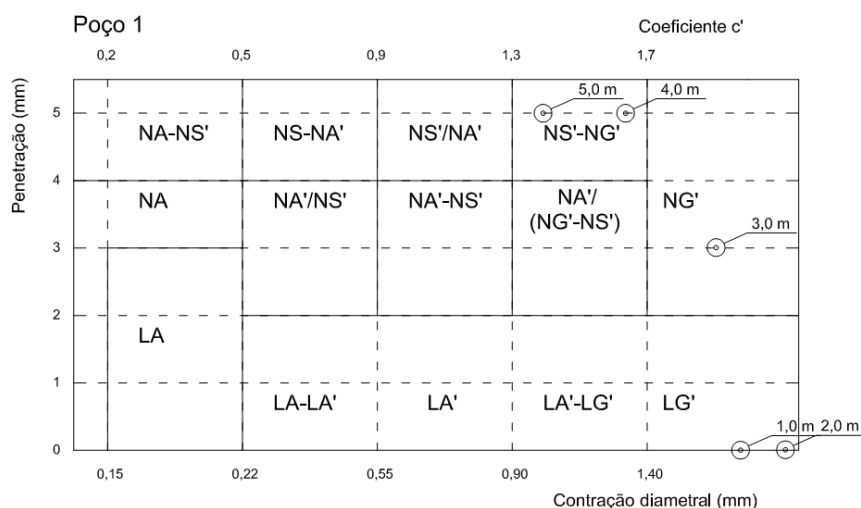


Figura 5.20 – Resultado do ensaio das pastilhas das profundidades de 1,0 a 50 m, do Poço 1

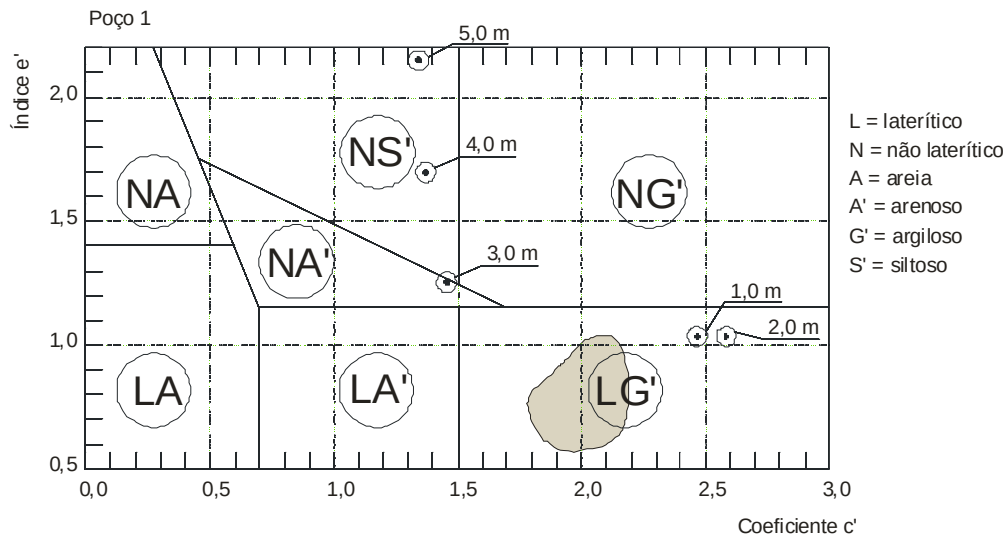


Figura 5.21 – Resultado do ensaio classificação MCT do perfil do Poço 1 e o enquadramento na área de argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos.

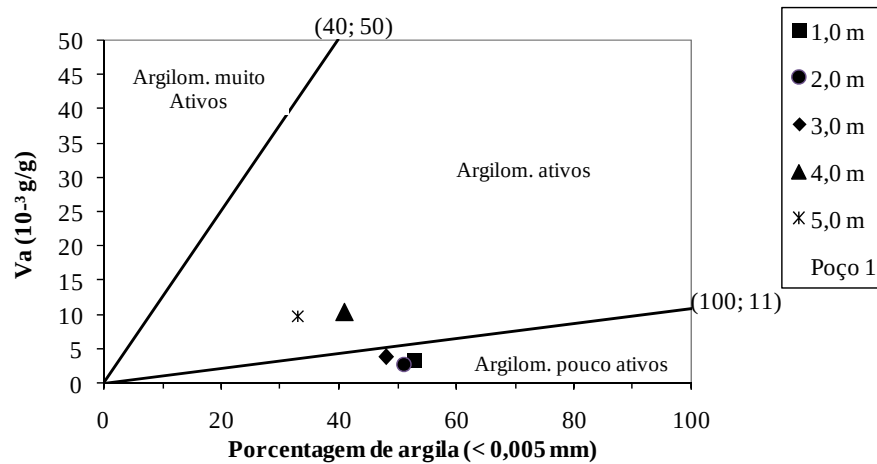


Figura 5.22 – Resultado do ensaio classificação de Azul de Metileno pelo método da mancha, do perfil do Poço 1

Fazendo uma análise mais geral dos resultados obtidos pelos ensaios MCT convencional e expedito apresentados na Tabela 5.5, as amostras de solos nas profundidades 1,0 e 2,0 m foram classificadas como lateríticas argilosas. Quanto ao ensaio de azul de metileno pelo método da mancha, essas amostras foram classificadas com argilomineral pouco ativo, dando indícios de materiais mais intemperizados, como descrito no Quadro 2.8. No caso da profundidade 3,0 m observou-se pela Figura 5.21 que o resultado pelo método convencional MCT situa-se numa zona de transição entre os solos NA', NS' e NG' enquanto que pelo método das pastilhas ele se encontra bem definido como NG'. Pelo ensaio de azul de metileno o resultado desta amostra foi de argilomineral pouco ativo dando indício também de mais intemperizado. Nas profundidades 4,0 e 5,0 m, a classificação pelo método convencional foi NS', pelo método das pastilhas NS'-NG' e pelo método da mancha como argilominerais

ativos, confirmando a condição de não lateríticos. Pelos resultados apresentados pode-se afirmar que houve concordância na classificação dos solos pelas duas metodologias adotadas e confirmação da condição intempérica pelo método de azul de metileno.

Com relação aos coeficientes da metodologia convencional MCT, tem-se que c' é o coeficiente angular da reta assimilável à curva Mini-MCV. Para Nogami e Villibor (1995) este coeficiente está diretamente relacionado às diferentes granulometrias, conforme é apresentado no Quadro 2.4. Comparando os valores apresentados na Tabela 5.5 aos estabelecidos por Nogami e Villibor na Quadro 2.4, constata-se que nas profundidades 1,0 e 2,0 m os valores de c' foram superiores a 1,5 indicando argilas e solos argilosos. Na profundidade 3,0 m, o valor foi bem próximo de 1,5 podendo ser enquadrado numa zona de transição entre solos do tipo argilas e solos argilosos e solos de vários tipos granulométricos. Já nas duas últimas profundidades estudadas, elas foram claramente inseridas nos solos de vários tipos de granulometria.

Quanto ao coeficiente d' , associando os resultados registrados na Tabela 5.5 aos apresentados no Quadro 2.5, pode-se concluir que os solos das profundidades de 1,0 a 3,0 m foram enquadrados como argilas lateríticas enquanto que na profundidade 5,0 m foi classificado com solo siltoso, micáceo ou caulínítico. Entretanto na profundidade 4,0 m os valores apresentados na referida tabela não possibilitam um enquadramento preciso. Vale ressaltar não há um consenso entre Nogami e Villibor (1995) e Barroso (2002) com relação aos índices c' .

❖ Análise Química

Dando continuidade à identificação do caráter laterítico do solo, são analisados neste tópico os resultados do ensaio da análise química. A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos resultados da análise química, pelo método do ataque sulfúrico, de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , os parâmetros K_i e K_r e a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ de todas as profundidades do Poço 1.

Tabela 5.6 – Quadro resumo da análise química do perfil do Poço 1

Ident.	Prof. (m)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	K_i	K_r	K_i/K_r	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (*)
Poço 1	1,0	43,2	12,7	20,2	2,62	3,64	2,60	1,40	2,50
	2,0	44,5	13,7	19,2	2,90	3,94	2,71	1,46	2,20
	3,0	44,1	14,5	21,2	2,59	3,54	2,46	1,44	2,29
	4,0	43,9	11,7	24,0	4,03	3,11	2,37	1,31	3,22
	5,0	39,4	13,0	24,1	2,87	2,78	2,07	1,34	2,91

* Dividido pela massa molecular de cada mineral

Pela Tabela 5.6, observa-se que os teores de sílica são altos e constantes nas profundidades de 1,0 a 4,0 m, com valor aproximado de 44%, reduzindo para 39% na profundidade 5,0 m. Estes valores elevados se justificam dada a alta porcentagem de areia registrada nas curvas granulométrica, nos ensaios com e sem defloculante. Os teores de óxido de ferro apresentaram pequena variação, com valores em torno de 13%. Com relação aos teores de óxidos de alumínio, os valores foram crescentes ao longo da profundidade, iniciando em 20% no primeiro metro a 24% no último metro estudado. O acréscimo deste teor pode ser devido à contribuição da rocha de origem. Quanto ao óxido de titânio, os valores variaram de 2,62% na profundidade 1,0 m a 4,03% na profundidade 4,0 m. Entretanto, no caso deste óxido não foi percebida tendência de aumento ou diminuição dos teores com a profundidade.

Quanto aos valores de K_i e K_r , pode-se observar pela Tabela 5.6, que ambos os coeficientes foram maior que 2,0 em todas as profundidades. Enquadrando os resultados registrados naquela tabela com os do Quadro 2.7 avalia-se que, de acordo com a classificação de Resende e Santana (1988), os solos em todo o perfil são caulíníticos, pois $K_i > 0,75$ e $K_r > 0,75$; de acordo com Fookes (1997), como o K_r de todas as profundidades são superiores a 2,0, todos os solos foram classificados como fersialíticos e ferruginosos e por fim atendendo à classificação apresentada pelo IBGE (2005) estes solos em todas as profundidades são classificados como pouco intemperizados. Para comprovação desta avaliação, o ideal parece ser avaliar em comum acordo com os resultados de difratometria de Raios-X.

Não foi verificada uma diferenciação clara dos valores dos parâmetros K_i relacionada a alterações de comportamento laterítico/não laterítico, identificados pela classificação MCT, para as profundidades 1,0 e 2,0 m. Já para as profundidades 3,0 a 5,0 m pode-se perceber correlação entre os resultados da metodologia MCT e análise química, indicando solos menos intemperizados.

No caso do estudo de Marangon (2004), os valores de K_i e K_r baixos para os solos da região da Zona Metalúrgica e Campos das Vertentes foram associados à natureza geológica da região, sugerindo que estes valores podem não expressar o grau de intemperismo destes solos, e sim a sua gênese.

❖ Composição Mineralógica

Os resultados de difratometria de Raios-X também foram usados para avaliação do caráter laterítico das amostras deste poço. O Quadro 5.8 apresenta o resultado de DRX da amostra total e da fração argila do perfil do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m.

MINERAL	Fração	Poço 1 - PROFUNDIDADE (m)				
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Anatásio	Total	---	---	---	++	++
	Argila	---	---	---	---	---
Biotita	Total	++	+	++	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Caulinita	Total	++	++	+++	+++	+++
	Argila	+++	+++	+++	+++	+++
Cristobalita	Total	---	---	---	---	+
	Argila	---	---	---	---	---
Diásporo	Total	+	+	+	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Gibbsita	Total	+++	++	+	---	---
	Argila	++	++	+	+	---
Gipsita	Total	---	---	+	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Goetita	Total	+	++	+	++	+
	Argila	+	+	+	+	+
Hematita	Total	++	+	+	+	+
	Argila	+	+	+	+	+
Horneblenda	Total	---	+	+	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Ilita	Total	---	---	---	---	---
	Argila	+	+	+	+	+
Ilmenita	Total	++	---	---	+	++
	Argila	---	---	---	---	---
Montmorilonita	Total	---	---	---	---	---
	Argila	---	---	---	---	+
Quartzo	Total	+++	+++	+++	+++	+++
	Argila	---	---	---	---	---
Rutilo	Total	---	++	---	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Vermiculita	Total	---	---	---	---	---
	Argila	---	+	+	---	---

Onde:

Principal: +++; Subordinado: ++ e Traço: +

Quadro 5.8 – Minerais constituintes da amostra total e fração argila do Poço 1, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, obtidos pelo ensaio de DRX

Analisando individualmente cada profundidade percebe-se que os minerais predominantes na amostra total na profundidade 1,0 m em ordem decrescente de predominância são: quartzo, gibbsita, caulinita, goetita, mica e hematita. Pela análise do pico do teor de gibbsita na Figura B.1, do Apêndice B, ele é praticamente dobro do pico da caulinita. Quanto à fração argila tem-se em ordem decrescente de predominância: caulinita como argilomineral principal, a gibbsita na condição subordinada e a goetita, ilita e hematita como traços.

Na profundidade 2,0 m no ensaio da amostra total observou-se a proporção decrescente de quartzo, caulinita, gibbsita, goetita, rutilo, diásporo e mica. Pode-se destacar que neste ensaio o quartzo permaneceu praticamente na mesma proporção comparado à da profundidade anterior. Entretanto, a diferença da proporção de quartzo em relação à gibbsita aumentou e do quartzo em relação à caulinita diminuiu, indicando o aumento do teor de caulinita em relação à gibbsita. Na fração argila a caulinita apareceu como argilomineral principal, a gibbsita como mineral subordinado e como traços apareceram goetita, ilita, vermiculita e hematita.

Na profundidade 3,0 m, analisando os componentes minerais na amostra total tem-se: quartzo e caulinita como componentes principais, em proporção subordinada tem-se a biotita (grupo das micas) e na condição traço foram encontrados a gibbsita, gipsita, goetita, hematita, hornblenda e biotita. Detectou-se uma redução considerável do teor de gibbsita, mas menos evidentes foram as reduções dos teores de hematita e goetita, comparadas à profundidade anterior. A presença da hornblenda, que é um silicato bastante comum em rochas básicas mesmo na condição traço, pode ser indicador de solos menos maduros. De acordo com Frascá e Sartori (1998), a hornblenda por intemperismo altera-se em argilominerais e óxidos de ferro. Ainda não se tem explicação para a presença de gipsita nesta profundidade, podendo ser função da rocha de origem. Com relação à fração argila foi percebido um crescimento acentuado de caulinita, na condição principal, e na condição traço foram encontrados gibbsita, goetita, ilita, vermiculita e hematita.

Na profundidade 4,0 m os componentes minerais da amostra total em ordem decrescente são: caulinita, quartzo, anatásio, goetita e hematita. A presença de anatásio como mineral subordinado é confirmada com o resultado da análise química, pois nela o teor de óxido de titânio apresentou o teor mais elevado. Pode-se perceber pela Figura B.4, do Apêndice B, que o teor de caulinita é superior ao do quartzo em praticamente uma vez e meia. Na fração argila, a caulinita apareceu como parcela principal e a ilita, gibbsita, goetita e hematita como subordinados.

Por fim, na profundidade 5,0 m na amostra total há uma redução marcante do teor quartzo em contrapartida ao aumento considerável de caulinita. Em ordem decrescente podem ser citados caulinita, quartzo e hematita. Na condição subordinada estão ilmenita, anatásio, hematita e cristobalita. Na fração argila a caulinita foi o argilomineral principal enquanto que a montmorilonita, goetita e ilita foram registrados como traço.

Fazendo uma análise mais global do perfil do Poço 1 em estudo, tem-se as seguintes observações:

- o quartzo foi o mineral principal em todas as profundidades na amostra total, mas em virtude da dimensão da partícula ele foi inexistente na fração argila;
- a gibbsita apareceu como um óxido principal na amostra total e decresceu até desaparecer na profundidade 4,0 m. Já na fração argila o mineral apareceu como subordinado nos dois primeiros metros e passou a traço nas profundidades 4,0 e 5,0 m;
- destaca-se a presença de biotita na amostra total nas três primeiras profundidades, no primeiro e terceiro metro como mineral subordinado e na profundidade de 2 m, como traço;
- a caulinita foi o argilomineral presente em todas as profundidades tanto na amostra total quanto na fração argila. Importante destacar o crescimento marcante deste argilomineral com a profundidade. Supõe-se que a gibbsita tenha sido originada da caulinita, já que se percebeu o acréscimo do teor de caulinita com a profundidade, em detrimento do decréscimo de gibbsita. De acordo com Cardoso (2002), deve ser ressaltado que, para que isso aconteça, são necessárias boas condições de drenagem e altas temperaturas. ;
- a hematita foi um mineral presente em todas as profundidades na amostra total, como subordinado na profundidade 1,0 m e nas restantes apareceu como traço. A quantidade maior na amostra total do que na fração argila talvez seja indicação de ser granular e mineral primário;
- observou-se a presença de ilita em termos de traço na fração argila em todo o perfil;
- observou-se ainda a presença de goetita na condição traço nas profundidades 1,0, 3,0 e 5,0 m, enquanto que nas profundidades restantes este óxido metálico apresentou-se como subordinado;
- a vermiculita apareceu nas profundidades 2,0 e 3,0 m e a montmorilonita em 5,0 m de profundidade, ambos na fração argila e em condição traço;
- em relação à composição química, tem-se evidência de óxido de titânio por causa da presença de anatásio e comprovado pelo ensaio químico em especial na profundidade 4,0 m, quando esse óxido apresentou o teor mais elevado no perfil. Também se pode correlacionar a presença de ferro e alumínio pela ocorrência de ilmenita. No caso da porcentagem de alumínio, minerais como diásporo e gibbsita podem responder por esta composição. E como minerais de ferro tem-se a goetita e hematita;

- há indícios de que a coloração mais avermelhada nos três primeiros metros seja resultante da presença de hematita, em condição subordinada no primeiro metro estudado.

5.2.1.3 Análise de resistência mecânica e de expansibilidade dos solos

Neste item são apresentados os resultados de compactação, expansão e CBR pelo método tradicional e o da metodologia MCT, Mini-Proctor, expansão e Mini-CBR. Na Tabela 5.7 estão resumidos os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação na energia Proctor intermediário, expansão e *California Bearing Ratio* (CBR) das cinco amostras do perfil do Poço 1. As Figuras 5.23 a 5.25 apresentam, respectivamente, as curvas de compactação, de CBR e expansão, por umidade, para todas as profundidades do Poço 1.

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de compactação, expansão e CBR das profundidades de 1,0 a 5,0 m do Poço 1

Ident.	Prof. (m)	Propriedades			
		w _{ot} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	Exp. (%)	CBR (%)
Poço 1	1,0	21,4	16,80	0,1	19
	2,0	21,2	16,90	0,0	19
	3,0	19,8	17,50	0,4	25
	4,0	19,5	17,00	4,8	6
	5,0	20,0	16,85	4,5	4

Obs.:

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

Exp. = expansão e CBR = *California Bearing Ratio*.

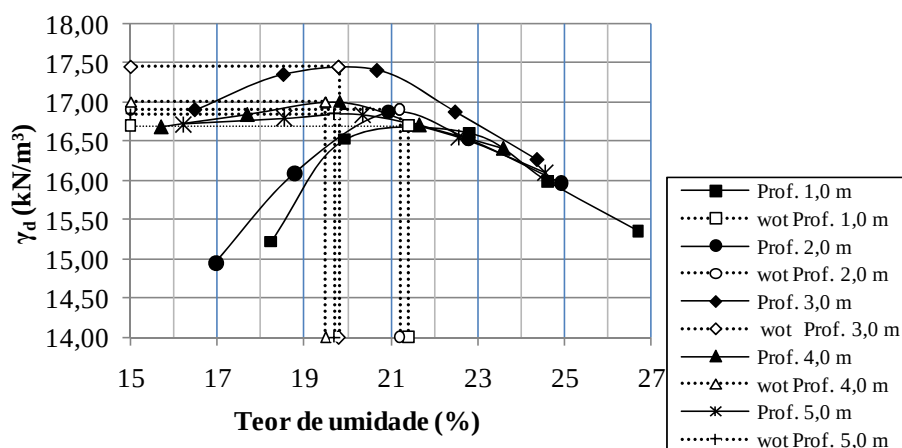


Figura 5.23 – Curvas de compactação e de umidade ótimas nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 1

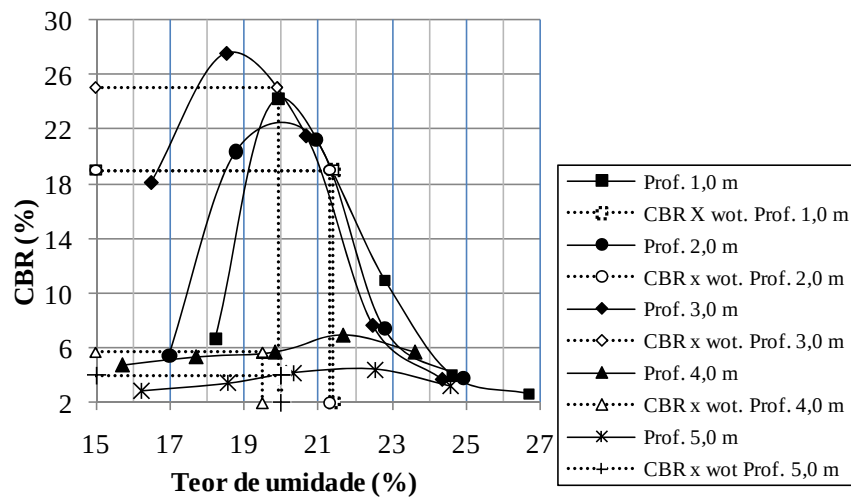


Figura 5.24 – Curvas de CBR por umidade e CBR por umidade ótima nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 1

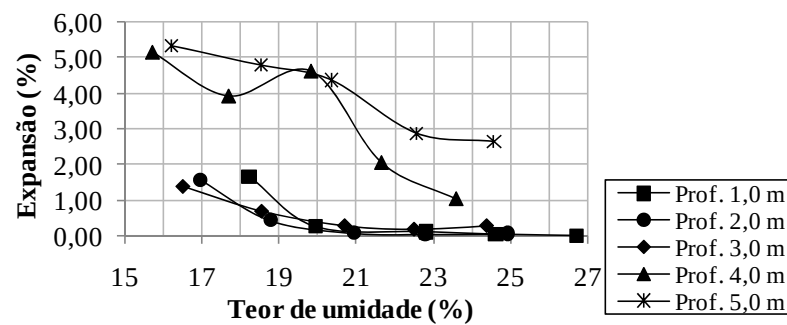


Figura 5.25 – Curvas de expansão por umidade das amostras do Poço 1

Considerando as especificações tradicionais para a construção de pavimentos asfálticos com relação ao CBR e expansão, apresentadas no Quadro 5.9, têm-se que, das amostras estudadas, apenas a da profundidade 3,0 m poderia ser utilizada como camada de sub-base. As amostras mais superficiais (1,0 e 2,0 m) seriam aplicadas apenas como reforço do subleito. As demais, na prática, não deveriam ser utilizadas por estarem em camadas mais profundas e por terem apresentado valores de CBR baixos e de expansão elevados, acima do estabelecido pelo Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT, 2006).

Local	CBR (%)	Expansão (%)
Subleito	≥ 2	≤ 2
Reforço do subleito	$\geq$ subleito	≤ 1
Sub-base	20	≤ 1
Base	80	$\leq 0,5$

Quadro 5.9 – Quadro-resumo das especificações tradicionais para a construção de pavimentos asfálticos. Adaptado do DNIT, 2006

Fazendo uma análise geral dos resultados apresentados na Tabela 5.7, observa-se que os valores do teor de umidade ótima variaram entre 19,8 a 21,4% e peso específico seco máximo entre 16,80 a 17,50 kN/m³, podendo, ambos os parâmetros, serem considerados valores próximos ou seja, com pequenas variações. No caso das umidades ótimas, os valores encontrados são muito comuns para solos com características siltosas ou argilosas compactadas na energia do Proctor intermediário.

Pormenorizando um pouco mais os resultados da Figura 5.23, com vistas à investigação do processo intempérico, percebe-se que as curvas de compactação dos três primeiros metros apresentaram uma configuração bem definida, podendo indicar, pelo formato, areia siltosa, conforme sugere Pinto (2006). Já as curvas de compactação nas profundidades 4,0 e 5,0 m foram bem mais abatidas, e com valores bastante próximos, não sendo possível estabelecer alguma relação entre as suas características. Também nos três primeiros metros podem ser registrados valores crescentes de peso específico seco máximo, enquanto que as umidades ótimas decrescem nesta faixa de profundidade. Vale registrar que as alterações nos valores dos parâmetros citados são discretos.

Quanto ao comportamento expansivo das amostras nas profundidades de 4,0 e 5,0 m, isto pode ser explicado pela alto do teor de silte, também classificado como solos não lateríticos siltosos caulíníticos, em função da composição química e da classificação MCT convencional. Os argilominerais são minerais constituintes das argilas e as caulinitas estão entre os grandes grupos de argilominerais. Entretanto, com base em Machado et al. [s. a.] nos solos saprolíticos é comum a ocorrência de macrocristais de caulinita ou mica na fração silte, podendo impor comportamento geotécnico peculiar. De acordo Nogami e Villibor (1995), os solos siltosos apresentam elevada expansibilidade, ou seja, superior a 3%, porém com baixa pressão de expansão. Este comportamento pôde ser percebido neste trabalho no ensaio de pastilha. Na profundidade 5,0 m foi encontrada a montmorilonita que também pode ter sido responsável pela elevada expansão observada.

A avaliação de todas estas condições poderia dar indicação de uma intemperização menos intensa à medida que se aprofunda no perfil.

As Figuras 5.26 a 5.30 apresentam os resultados de compactação, CBR e expansão por umidade, para cada profundidade.

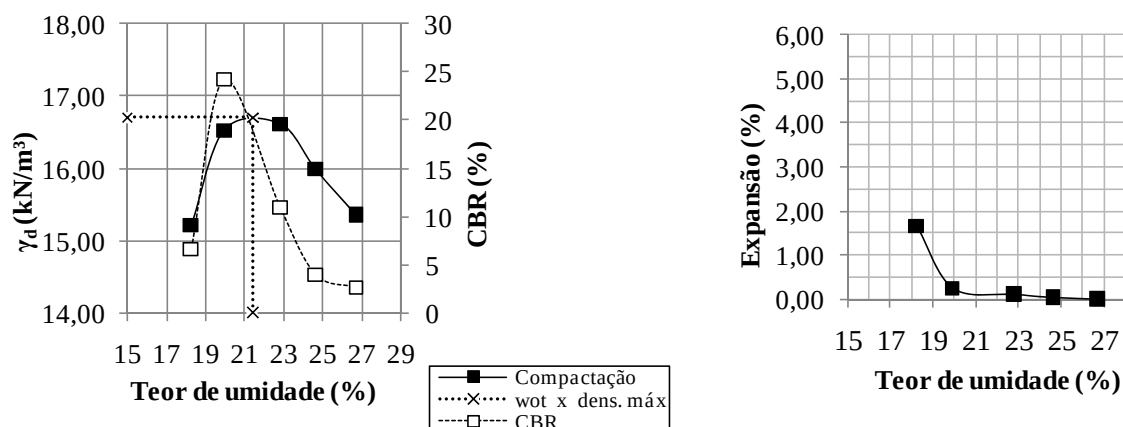


Figura 5.26 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 1,0 m

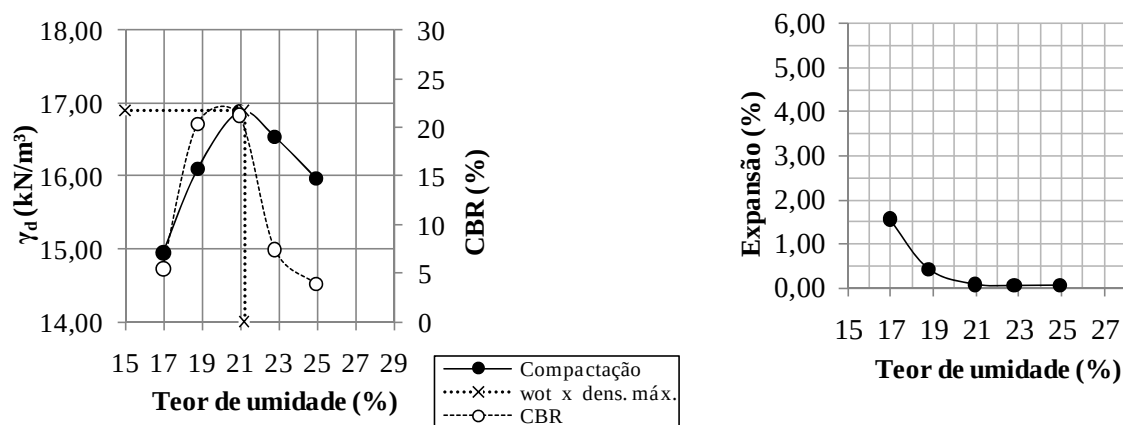


Figura 5.27 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 2,0 m

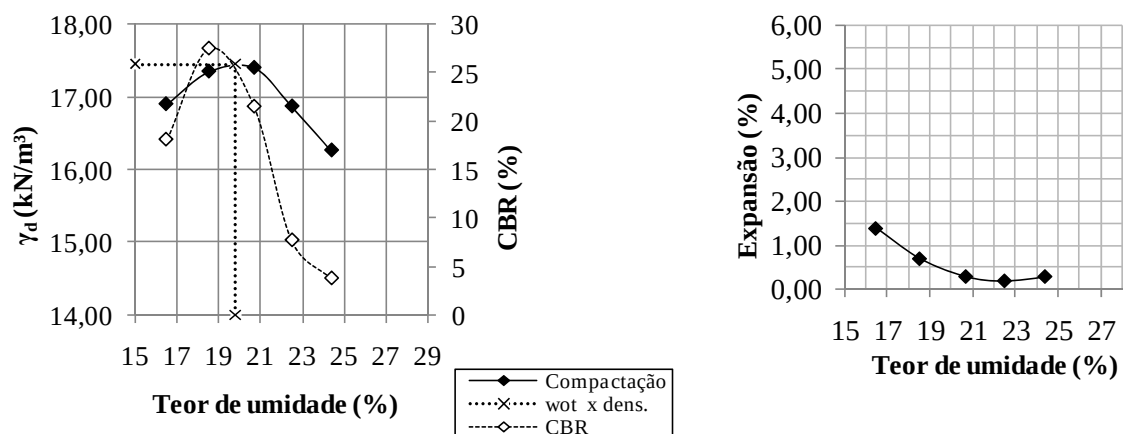


Figura 5.28 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 3,0 m

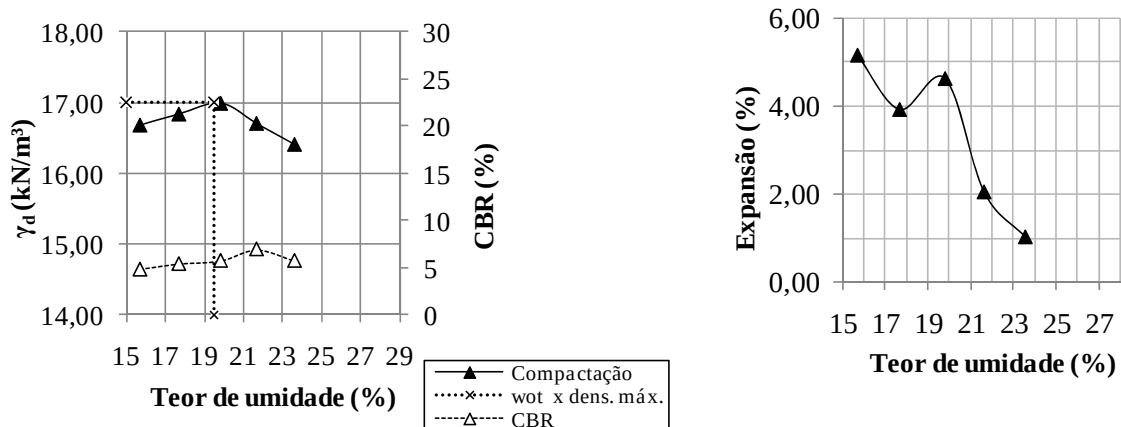


Figura 5.29 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 4,0 m

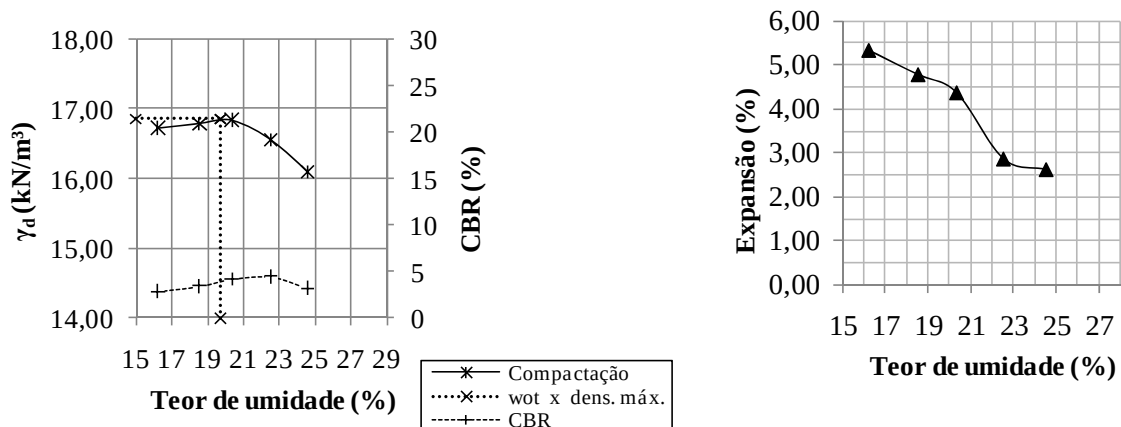


Figura 5.30– Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 1, na profundidade 5,0 m

Pode-se avaliar ainda o uso dessas amostras em pavimentação asfáltica com base nas normas estabelecidas pelo DNIT (2006). Este órgão estabeleceu que um solo para ser usado como base estabilizada granulometricamente deve apresentar $w_L < 25\%$ e $IP < 6\%$. Caso os limites destes parâmetros não sejam atendidos, a amostra poderá ser usada desde que apresente $CBR \geq 60\%$ para qualquer tipo de tráfego, expansão máxima inferior a 0,5% e a granulometria se enquadre numa das faixas estabelecidas pelo órgão.

No caso dos solos avaliados no Poço 1, o w_L e IP de todas as profundidades apresentaram valores superiores ao preconizado pelo DNIT (2006). Partindo para a possibilidade compensatória, em virtude do não atendimento destes parâmetros, observou-se que o maior de todos os CBR foi de 25% aos 3,0 m de profundidade, bem inferior aos 60%. Com relação às faixas granulométricas, os solos coletados neste poço não se enquadraram em qualquer das

faixas estabelecidas. Quanto aos valores de expansão, apenas nos três primeiros metros apresentaram resultados considerados adequados de acordo com os critérios convencionais.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) fornece uma alternativa para classificação dos solos finos para uso em pavimentação considerando a impossibilidade de determinação do módulo de resiliência. Esta classificação é determinada indiretamente graças aos valores de percentagem de silte que passa na peneira nº 200, denominada S%, e do CBR.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.7 e enquadrando com os dados apresentados na tabela do DNIT (2006), pode-se concluir que nas profundidades de 1,0 a 3,0 m os solos foram classificados como solo do tipo I, ou seja, são solos de bom comportamento resiliente como subleito e reforço do subleito, podendo também ser usado como camada de sub-base. O solo da profundidade 4,0 m foi classificado como solo do tipo II e pela tabela do DNIT (2006) é avaliado como solo de comportamento regular quanto à resiliência como subleito e reforço de subleito. Por fim o solo da profundidade 5,0 m foi classificado como solo do tipo III que é um solo de comportamento ruim sob o aspecto de resiliência, sendo vedado seu uso em camadas de pavimento e no caso de uso em subleito há exigência de cuidados especiais.

Em resumo, avaliando este solo com vistas à aplicação em base de pavimentos asfálticos, de acordo com os critérios convencionais, pode-se afirmar que os solos do Poço 1 não atenderam às exigências estabelecidas pelo DNIT (2006). No caso da aplicação como camada de sub-base, dessas amostras estudadas apenas a da profundidade 3,0 m poderia ser indicada.

Neste item serão analisados os resultados do ensaio de resistência através dos ensaios da metodologia MCT, de acordo com os dados Mini-Proctor, Mini-CBR e expansão.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados dos ensaios de resistência da metodologia MCT, do Poço 1 na profundidade 3,0 m. A energia de compactação adotada foi Proctor Intermediário, considerando que a análise visa o uso do solos em pavimentação. A Figura 5.31 retrata as curvas de compactação com sobrecarga e Mini-CBR com sobrecarga, com e sem imersão.

De acordo com a Tabela 5.8, o resultado do teor de umidade ótima obtido no ensaio de compactação Mini-Proctor foi 17% e o peso específico seco máximo foi 19,00 kN/m³.

Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios de compactação Mini-Proctor, Mini-CBR, expansão, RIS e PSI do Poço 1 na profundidade 3,0 m

COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR E MINI-CBR					RIS (%)	PSI (%)
ENERGIA INTERMEDIÁRIA						
Compactação (Sobrecarga)		Mini-CBR (Sobrecarga)	Mini-CBR (Sobrecarga e imersão)	Exp. (%)		
w _{ot} (%)	γ _{dmáx} (kN/m³)	(%)	(%)			
17	19,00	48	21	1,2	44	56

Onde:

w_{ot} = umidade ótima; $\gamma_{dmáx}$ = peso específico seco máximo; Exp. = Expansão;
 RIS = produto da razão do Mini-CBR com imersão pelo Mini-CBR com imersão multiplicado por 100 (%) e PSI = 100 – RIS

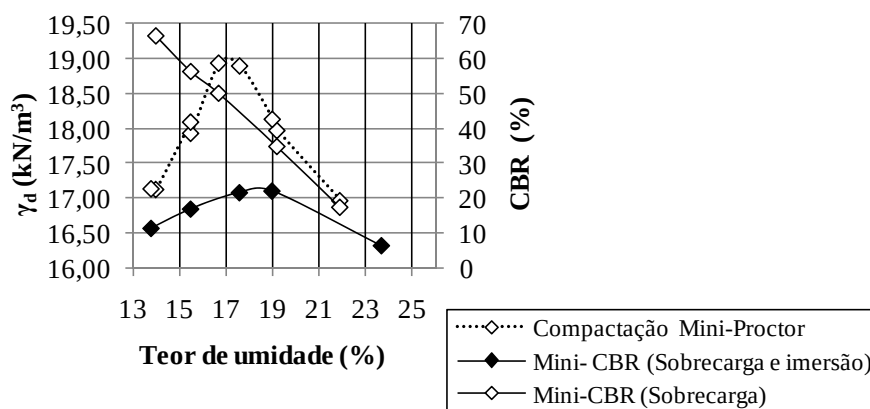


Figura 5.31 – Curva de compactação Mini-Proctor e Mini-CBR com sobrecarga e com e sem imersão da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m

Villibor et al. (2000) estabeleceram que os intervalos das propriedades mecânicas e hídricas admissíveis, na energia intermediária Mini-Proctor, para o comportamento considerado satisfatório das bases de pavimentos. Alguns destes parâmetros são: Mini-CBR sem imersão $\geq 40\%$; Perda de suporte por Imersão (PSI) $\leq 50\%$ e expansão sem sobrecarga $< 0,3\%$. Quanto a estes intervalos propostos, os autores consideram, com relação à capacidade suporte, que o ensaio seja sem sobrecarga, pois os pavimentos econômicos não recebem camadas espessas de revestimento. Na amostra estudada os valores de Mini-CBR foram 48 e 21% para a condição sem imersão e com imersão, respectivamente. Quanto à expansão, o resultado da única amostra estudada foi de 1,2%, bem superior ao preconizado por Villibor et al. (2000) que é de, no máximo, 0,3%.

Outra determinação importante é o RIS que mede o caráter laterítico de um solo. De acordo com Nogami e Villibor (2009), o RIS é determinado pela relação entre o Mini-CBR na condição imersa e no teor de umidade ótima. Valores de RIS superiores a 50 indicam solos de

comportamento laterítico e menores que 50, solos de comportamento não laterítico. Considerando este limite a amostra estudada se comporta como não laterítica.

Importante também é a avaliação da perda de suporte por imersão do Mini-CBR na umidade de moldagem. De acordo com Nogami e Villibor (2009), a relação PSI indica o valor em porcentagem, da perda da capacidade suporte do Mini-CBR na umidade ótima com imersão em água por 24 horas, em relação ao valor inicial. No caso da amostra estudada, a perda da capacidade suporte foi de 56%, superior ao estabelecido por Villibor et al. (2000).

A Tabela 5.9 apresenta a comparação dos resultados dos ensaios de compactação e CBR executados de acordo com a metodologia convencional e MCT da amostra de solo na profundidade 3,0 m do Poço 1. Na Figura 5.32 são retratadas as curvas de compactação convencional e Mini-Proctor da amostra estudada. É necessário destacar que, como foram moldados dois conjuntos compactados com o intuito de determinar o Mini-CBR com e sem imersão, os dados obtidos foram agrupados num único gráfico fazendo parte da figura indicada.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de compactação convencional e Mini-Proctor, expansão e Mini-CBR, ambos com e sem imersão do Poço 1 na profundidade 3,0 m

Parâmetro	w_{ot} (%)	γ_{dMax} (kN/m ³)	Expansão (%)	Mini-CBR c/ imersão (%)	Mini-CBR s/ imersão (%)	CBR (%)
Compactação Mini-Proctor	17,0	19,0	1,20	21	48	---
Compactação Convencional	19,8	17,5	0,40	---	---	25

Onde:

w_{ot} = umidade ótima; γ_{dmax} = peso específico seco máximo e CBR = *California Bearing Ratio*.

Analisando os dados apresentados na Figura 5.32, observa-se que a umidade ótima da compactação convencional foi maior do que os da compactação Mini-Proctor. Considerando que o ensaio de Mini-Proctor é realizado com o material passado na peneira 2 mm e o ensaio convencional é executado com o material passado na peneira 4,8 mm, era de se esperar que a umidade ótima, no caso do ensaio da metodologia MCT, pelo fato do solo ser mais fino, apresentasse valores maiores quando comparados ao ensaio da metodologia convencional. Entretanto, como a porcentagem de solo que passa na peneira 2 mm é de aproximadamente 97%, e o pedregulho contribuiu com apenas 3%, provavelmente isto não justifica o valor da umidade ótima no ensaio convencional ser superior ao do ensaio Mini-Proctor. Contradizendo

os resultados obtidos neste trabalho, Souza (2007) estudou, dentre outras, a correlação entre os teores de umidades ótimas no ensaio de Proctor Normal e no ensaio Mini-CBR e obteve coeficiente $R^2 = 0,99$, ou seja, bastante elevados.

Os resultados do ensaio convencional apresentaram menor peso específico seco máximo, menor expansão e CBR ligeiramente superior na mesma condição, ou seja, com imersão, conforme era a expectativa. O que não era esperado é que, no caso do peso específico seco máximo e expansão estes valores fossem significativamente maiores, considerando pouca diferença na granulometria do material ensaiado.

A Figura 5.32 apresenta as curvas de compactação convencional e Mini-Proctor do Poço 1 na profundidade 3,0 m.

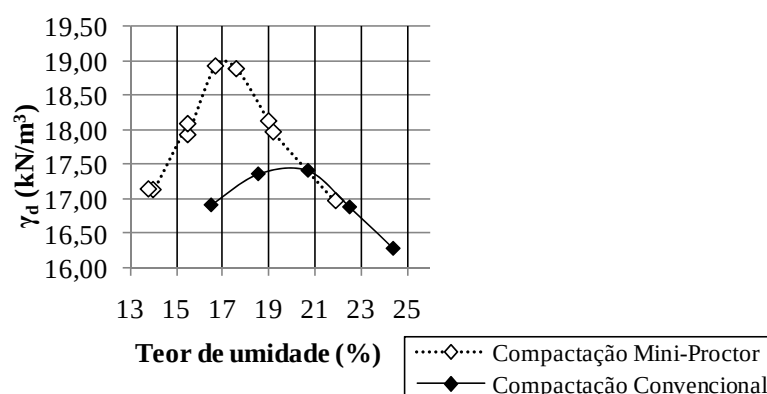


Figura 5.32 – Curvas de compactação convencional e Mini-Proctor do Poço 1 na profundidade 3,0 m

Analisando o formato das curvas da Figura 5.32, levando em consideração que Sousa Pinto (2000) e Vargas (1977) fazem uma relação entre o formato da curva e o tipo de material, observa-se que as curvas apresentaram configurações diferentes. Para aqueles autores, curvas de compactação executadas com a metodologia convencional, se mais pontiagudas dão indícios de solo arenoso e se mais achatadas, são solos mais argilosos. Marangon (2004) observou que as areias argilosas bem graduadas apresentam curvas de compactação com picos e ramos secos retilíneos mais acentuados quando a argila é laterítica. Levando em conta a informação apresentada no parágrafo anterior relativa à granulometria do material nos dois ensaios, a expectativa era que as curvas apresentassem o mesmo formato, o que não ocorreu. Poder-se-ia pensar também no ajuste da curva, já que no caso da curva de compactação Mini-Proctor um dos pontos de umidade ensaiado coincidiu com o da umidade ótima, mas mesmo com esta consideração, percebe-se que as curvas apresentaram formatos diferentes.

Outro aspecto a considerar é a expectativa de correlação entre os resultados de CBR e Mini-CBR. Nogami (1972¹⁴ apud BARROSO, 2002), ensaiou treze solos considerados típicos do estado de São Paulo e estabeleceu uma correlação entre os valores de Mini-CBR e CBR para a energia de compactação normal. Posteriormente, a mesma correlação foi estendida para a energia intermediária. Barroso (2002) estudou sessenta solos da Região Metropolitana de Fortaleza que tinha, dentre outros objetivos, confirmar ou estabelecer alguma correlação entre os valores de CBR e Mini-CBR. O estudo desenvolvido não conseguiu estabelecer qualquer correlação entre estes dois ensaios, seja pelo estabelecimento da umidade ótima em cada um dos ensaios ou por meio da classe pedológica. Conclusão semelhante foi obtida comparando os resultados de expansão nos teores de umidade ótima, para as energias normal e intermediária, para os ensaios de CBR e Mini-CBR. Vieira e Prates (2002) estudaram 51 amostras de solos, 3 de cada um dos 17 locais do estado do Mato Grosso, ao longo da BR-153, e obtiveram valores de Mini-CBR 30% mais elevados do que o CBR. Com objetivo similar, Souza (2007) estudou amostras de solos de oito unidades geotécnicas do município de Uberlândia e dentre os ensaios estavam os de resistência pelo método convencional e pela metodologia MCT. Ele também não conseguiu estabelecer uma relação clara entre os resultados dos valores de CBR e Mini-CBR, independente da origem do solo, da classificação MCT e da forma de ensaio.

Um aspecto importante é com relação à energia aplicada em ambos os ensaios, pois Pinto (1966¹⁵ apud COSTA, 2006) e também Nogami (1972 apud COSTA, 2006), afirmaram que a energia aplicada nos ensaios de Mini-Proctor, com o soquete de seção plena, produz o mesmo efeito compactador (mesma densidade nas mesmas condições de umidade) que o ensaio convencional. Costa (2006) supõe tratar-se na verdade de uma energia aproximada, uma vez que não se tem o volume fixo na determinação da massa específica seca máxima. Outra consideração que pode ser feita é que a aplicação dos golpes no ensaio convencional é de certa forma distribuída na superfície que está sendo compactada e não atinge toda a superfície de uma única vez. O mesmo não acontece com o ensaio Mini-Proctor, pois o soquete cai atingindo toda a área que está sendo compactada. Além disso, o ensaio da metodologia MCT prevê que a amostra seja compactada com metade dos golpes numa das faces e o restante na

¹⁴ Nogami, J. S. (1972) Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamento de dimensões reduzidas (ensaio mini-CBR). In: Reunião das Administrações Rodoviárias, 2. Brasília, Distrito Federal.

¹⁵ PINTO, C. S., 1966, "Equipamento Reduzido para Moldagem de Corpos-de-Prova de Solo-Aditivo", Public. 87 – GTM-65-01, IPR, Rio de Janeiro/RJ.

outra face, o que pode provocar alguma diferença nos resultados, podendo dar indício de alteração na energia de compactação.

O Quadro 5.10 apresenta as principais características geotécnicas do perfil do Poço 1.

Poço 1 ($\varnothing = 0,70\text{m}$)	
Prof. 1,0m	• Pedregulho: 1,14%; Areia: 53,72%; Silte: 45,14% • $w_L = 45\%$; $w_P = 30\%$; $IP = 15\%$; $\rho_s = 2759 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: ML (silte de baixa compressibilidade); TRB: A-7-5 • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LG' • CBR = 19%; Exp. = 0,1% • Utilização em pavimentação: reforço de subleito.
Prof. 2,0m	• Pedregulho: 3,21%; Areia: 53,30%; Silte: 43,49% • $w_L = 44\%$; $w_P = 27\%$; $IP = 17\%$; $\rho_s = 2801 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: ML (silte de baixa compressibilidade); TRB: A-7-6 • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LG' • CBR = 19%; Exp. = 0,0% • Utilização em pavimentação: reforço de subleito.
Prof. 3,0m	• Pedregulho: 2,94%; Areia: 47,52%; Silte: 49,54% • $w_L = 46\%$; $w_P = 26\%$; $IP = 20\%$; $\rho_s = 2824 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: CL (argila de baixa compressibilidade); TRB: A-7-6 • MCT convencional: NA'; MCT expedito: NG' • CBR = 25%; Exp. = 0,4% • Utilização em pavimentação: camada de sub-base.
Prof. 4,0m	• Pedregulho: 0,59%; Areia: 34,06%; Silte: 49,54% • $w_L = 49\%$; $w_P = \text{NP}$; $IP = \text{NP}$; $\rho_s = 2819 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: ML (silte de baixa compressibilidade); TRB: A-5 • MCT convencional: 'NS'; MCT expedito: NS'-NG' • CBR = 6%; Exp. = 4,8% • Utilização em pavimentação: não indicada.
Prof. 5,0m	• Pedregulho: 0,36%; Areia: 35,51%; Silte: 64,13% • $w_L = 46\%$; $w_P = \text{NP}$; $IP = \text{NP}$; $\rho_s = 2875 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: ML (silte de baixa compressibilidade); TRB: A-5 • MCT convencional: 'NS'; MCT expedito: NS'-NG • CBR = 4%; Exp. = 4,5% • Utilização em pavimentação: não indicada.

Quadro 5.10 – Resumo das principais características geotécnicas do Poço 1.

5.2.2 Poço 3

Conforme descrito na metodologia, neste item serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m como intuito de verificar o uso potencial em pavimentação. A Figura 5.33 apresenta os solos estudados de cada profundidade do Poço 3.



Prof. 1,0 m – material passado na # 2,0 mm



Prof. 2,0 m – material natural e seco ao sol



Prof. 3,0 m – material natural e seco ao sol



Prof. 4,0 m – material natural e seco ao sol



Prof. 5,0 m – material natural e seco ao sol

Figura 5.33 – Fotos das amostras de solo do Poço 3 em todas as profundidades. Autor: Vale (2010)

5.2.2.1 Caracterização e classificação dos solos

Os ensaios de granulometria das amostras de solo do Poço 3 foram realizados por meio de peneiramento e sedimentação com e sem o uso de defloculante para as profundidades de 1,0 a 5,0 m. A Tabela 5.10 apresenta as porcentagens de cada material obtidas das planilhas dos resultados de peneiramento e sedimentação e obedecendo o critério da NBR 6502 (ABNT,

1995). A Figura 5.34 apresenta todas as curvas granulométricas de todas as profundidades do Poço 3, com e sem o uso de defloculante. Já as Figuras 5.35 e 5.36 apresentam, separadamente, as curvas granulométricas do mesmo poço, com e sem o uso de defloculante, enquanto que as Figuras A.6 a A.10, do Apêndice A, apresentam as curvas granulométricas de cada profundidade, com e sem o uso de defloculante.

Tabela 5.10 – Frações granulométricas das amostras analisadas do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m

Poço 3 Prof. (m)	Com defloculante				Sem defloculante			
	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
1,0	1,55	53,45	12,00	33,00	1,55	77,45	21,00	0,00
2,0	5,16	50,84	11,00	33,00	5,16	66,84	28,00	0,00
3,0	6,20	53,80	17,00	23,00	6,20	63,80	30,00	0,00
4,0	0,00	63,00	16,00	21,00	0,00	68,00	32,00	0,00
5,0	0,00	65,00	12,00	23,00	0,00	77,00	23,00	0,00

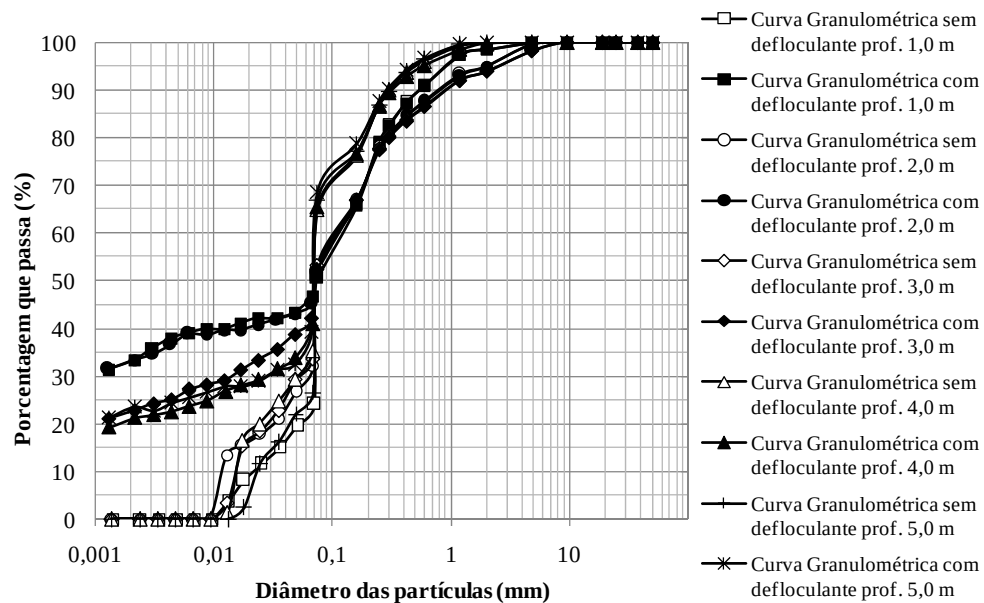


Figura 5.34 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com e sem o uso de defloculante

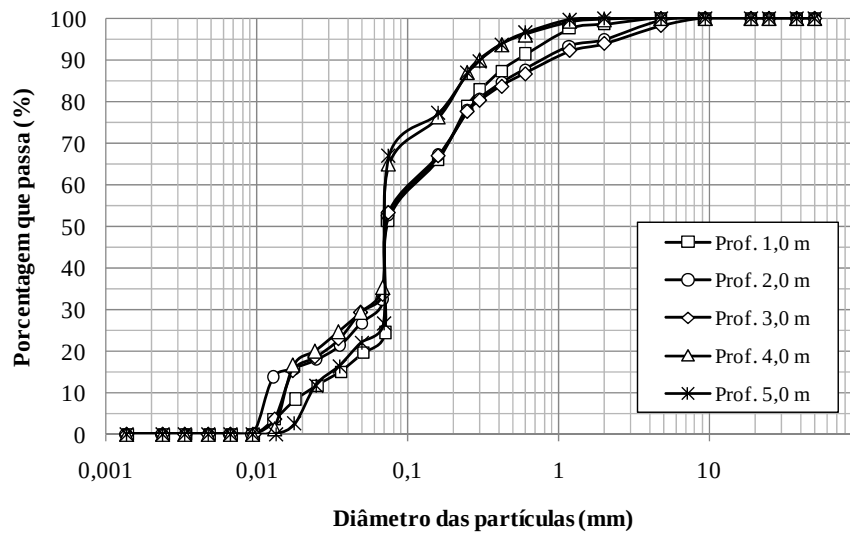


Figura 5.35 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, sem o uso de defloculante

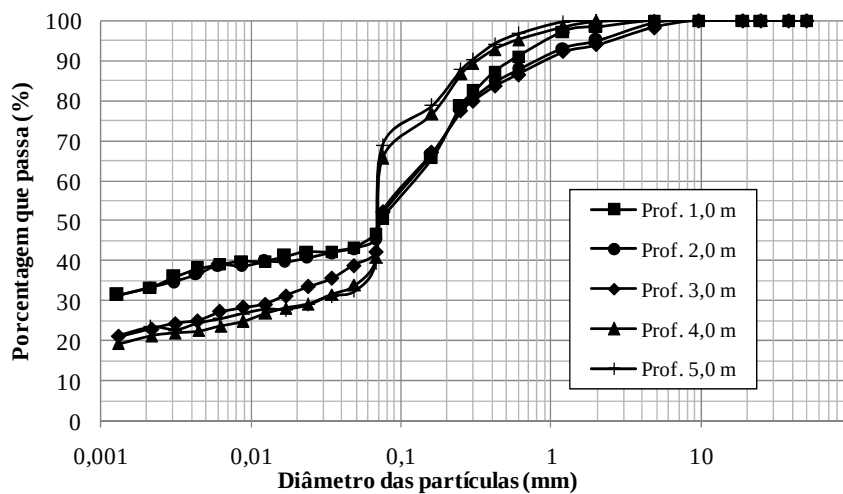


Figura 5.36 – Curvas granulométricas das amostras do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, com o uso de defloculante

Como ocorreu no Poço 1, as amostras de solo do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, quando ensaiadas sem o uso de defloculante não apresentaram fração do tipo argila na sua composição granulométrica, sendo compostas apenas das frações pedregulho, silte e areia. Neste caso, em todas as profundidades predominou a fração areia, indicando que as amostras em todo o perfil possuíam granulometria grosseira.

No entanto, quando as amostras foram ensaiadas com o uso hexametáfosfato de sódio para a defloculação do material, todas apresentaram fração argila. A areia continuou sendo a fração

predominante, apesar da sua redução considerável, além da redução do silte, que também foi considerável comparada a sua a redução da porcentagem.

Analisando a Figura 5.37, que traça a distribuição das frações do solo no perfil, é possível avaliar a alteração granulométrica ao longo da profundidade, com e sem o uso de defloculante. Desta figura percebe-se que a fração areia com o uso de defloculante teve uma redução significativa, de 24% na profundidade 1,0 m e foi decrescendo até que a diferença atingisse 5% em 4,0 m. Mas aos 5,0 m está diferença voltou a crescer atingindo 12%. Observa-se que a variação da quantidade de areia em relação a variação da quantidade de argila é grande e decresce com o aumento da profundidade.

Quanto à fração silte, o uso do defloculante provocou uma redução cada vez maior, mas não homogênea, nos quatro primeiros metros, tendo valor máximo na profundidade 2,0 m que foi de 17%. Entretanto, na profundidade 5,0 m esta diferença diminuiu para 11%. Esta variação foi crescente com a profundidade, indicando maior teor de agregação com a profundidade. Para este poço em estudo, nas profundidades até 4,0 m há uma diminuição real da quantidade de silte.

Na fração argila, o uso do defloculante provocou efeitos mais consideráveis, pois essa fração apresentou um acréscimo de aproximadamente 30% nos dois primeiros metros de profundidade, mas foi um acréscimo cada vez menor com a profundidade, chegando a 23% em 5,0 m.

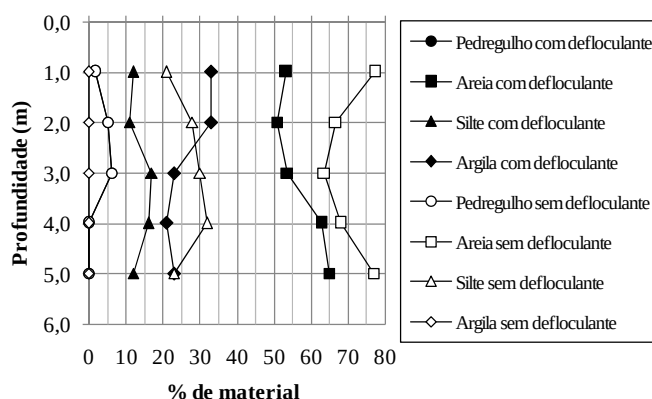


Figura 5.37 – Perfil granulométrico do Poço 3

Avaliando granulometricamente as frações silte e argila com e sem o uso de defloculante no primeiro metro, a fração areia sofreu maior interferência do defloculante comparado à fração silte, cabendo nos 2,0 e 3,0 m participação percentual praticamente igual. Já no quarto metro a

fração silte contribui com uma percentagem maior no teor de agregação e voltam a participações praticamente iguais no último metro estudado.

A Tabela 5.11 apresenta a percentagem de argila do Poço 3 em todas as profundidades. Nela pode ser percebida que, como no Poço 1, o teor de material agregado total está diretamente relacionado ao teor de argila com defloculante, ou seja, as agregações presentes nas frações silte e areia foram fruto da agregação da fração argila.

Tabela 5.11 – Percentagem de argila do Poço 3, com e sem o uso de defloculante, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m

Ident.	Prof. (m)	Argila (%)		Agregados Totais (%)	Teor de Agregação
		C/ defloc.	S/ defloc.		
Poço 3	1,0	33,00	0,00	33,00	100
	2,0	33,00	0,00	33,00	100
	3,0	23,00	0,00	23,00	100
	4,0	21,00	0,00	21,00	100
	5,0	23,00	0,00	23,00	100

Onde:

Agregados totais (%) = Argila com defloculante (%) - Argila sem defloculante (%)

Teor de Agregação = Agregados Totais (%) / Argila com defloculante (%)

A Figura 5.38 apresenta as propriedades de consistência (w_L , w_P e IP) das profundidades estudadas do Poço 3. A Tabela 5.12 apresenta os valores de massa específica dos grãos (ρ_s), as propriedades de consistência e as classificações convencionais SUCS e TRB.

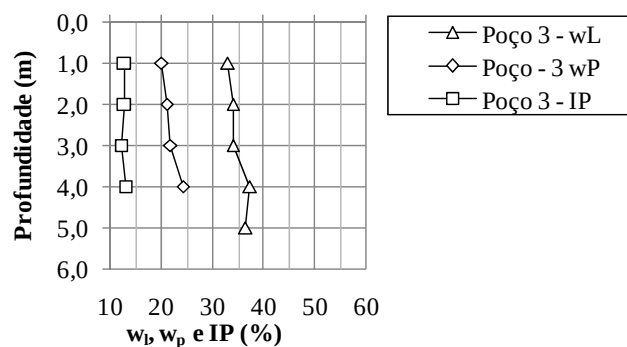


Figura 5.38 – Limites de liquidez e plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras de 1,0 a 5,0 m do Poço 3

Obs.: O resultado do ensaio de limite de plasticidade da amostra de solo na profundidade 5,0 m é Não Plástica.

Tabela 5.12 – Massa específica dos grãos, limites de consistência e classificações.

Ident.	Prof. (m)	Propriedades					Classificação	
		ρ_s (kg/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	IP (%)	IG	SUCS	TRB
Poço 3	1,0	2672	33	20	13	4	CL	A-6
	2,0	2689	34	21	13	4	CL	A-6
	3,0	2711	34	22	12	4	CL	A-6
	4,0	2727	37	24	13	7	CL	A-6
	5,0	2738	36	NP	NP	---	ML	A-4

Onde:

ρ_s = massa específica dos grãos; w_L = limite de liquidez; w_p = limite de plasticidade;
 IP = índice de plasticidade; IG = Índice de Grupo; SUCS = Sistema Unificado de
 Classificação de Solos; TRB = *Transportation Research Board*; NP = não plástico.

Pelos dados apresentados na Tabela 5.12, observa-se que o limite de liquidez apresentou valores que variaram de 33 a 37% ao longo da profundidade. Quanto ao limite de plasticidade, os valores variaram entre 20 e 24% nas profundidades de 1,0 a 4,0 m. Na profundidade 5,0 m o solo apresentou comportamento não plástico, entretanto a fração silte não serve para justificar este comportamento. Observa-se que os limites de consistência das amostras deste poço são inferiores ao do Poço 1.

Quanto à massa específica dos grãos, os valores obtidos variaram entre 2672 a 2738 kg/m³ ao longo do perfil, podendo ser considerado constante. É interessante destacar que as massas específicas das amostras de todas as profundidades foram inferiores às do Poço 1. Estas são massas específicas que se aproximam das do quartzo, caulinita e gibbsita.

Quanto à classificação destes solos pelo sistema SUCS, nas profundidades de 1,0 a 4,0 m foram definidos como argilas de baixa compressibilidade (argilas inorgânicas de mediana plasticidade) (CL), enquanto que a amostra da profundidade 5,0 m foi classificada com silte de baixa compressibilidade (ML).

Com relação à classificação TRB, as amostras das profundidades de 1,0 a 4,0 m foram classificadas como solos argilosos (A-6). No caso das profundidades 4,0 m, em virtude do material ser não plástico, não foi possível determinar o Índice de Grupo (IG). Portanto, a classificação foi feita baseando-se na fração passante na # n° 200, no w_L e na consideração de IG ser inferior a 10. Em razão disso, os solos destas duas últimas profundidades foram classificados como solos siltosos (A-4). Comparando as duas classificações, SUCS e TRB, em todas as profundidades não houve divergência entre os sistemas de classificação. Ou seja, nos

quatro primeiros metros os solos foram classificados com argilosos pelos dois sistemas e na profundidade 5,0 m como solo siltoso.

Analisando todas as amostras com vistas à aplicação em pavimentação, pode-se afirmar que pela classificação TRB, os solos deste poço, em todas as profundidades são considerados de sofrível a mau para uso em subleito. Pela classificação SUCS, a exemplo do Poço 1, as amostras das profundidades de 1,0 a 4,0 m, classificadas como CL, são indicadas para uso em revestimento primário num grau 7, numa escala que varia de 1 a 14, sendo o grau 1 o mais satisfatório.

Outro parâmetro que possibilita a análise ou a previsão do solo é a atividade da argila (Ia). Este índice, conforme já apresentado anteriormente, mede o potencial da fração argila em conferir plasticidade e coesão ao solo, além de inferir o tipo de argilomineral presente. A Tabela 5.13 apresenta as porcentagens de argila, seus valores de IP e de Índice de Atividade (Ia) nas cinco profundidades.

Tabela 5.13 – Classificação da atividade da argila nas profundidades 1,0 a 5,0 m do Poço 3

Ident.	Prof. (m)	Argila (%)	IP	Ia	Classificação da atividade da argila
Poço 3	1,0	33	13	0,39	Inativa
	2,0	34	13	0,38	Inativa
	3,0	34	12	0,35	Inativa
	4,0	37	13	0,35	Inativa
	5,0	36	NP	---	---

Abstrai-se da Tabela 5.13 que nas profundidades de 1,0 a 4,0 m os valores do Ia foram inferiores a 0,75, indicando argila de baixa atividade. Desta informação pode-se prever a possibilidade da existência de argilomineral 1:1. Esta mesma tabela possibilita a avaliação dos solos de acordo com o Índice de Plasticidade, conforme também analisado no Poço 1. No caso do Poço 3 em estudo, nas profundidades de 1,0 a 4,0 m o valor de IP está na faixa entre 7 e 15, o que os classifica como medianamente plásticos.

5.2.2.2 Classificação e identificação do caráter laterítico dos solos

Similar à análise desenvolvida no Poço 1, neste item são apresentados os resultados da metodologia MCT, método expedito das pastilhas, azul de metileno pelo método da mancha,

análise química e difratometria de Raios-X, cujo objetivo é identificar o caráter laterítico das amostras estudadas em perfil do Poço 3.

A Tabela 5.14 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de classificação MCT, método expedito das pastilhas e o ensaio de Azul de Metileno pelo método da mancha. A Figura 5.39 apresenta os resultados do ensaio expedito pelo método das pastilhas, a Figura 5.40 apresenta o resultado do ensaio de classificação MCT e o enquadramento na área onde estabelecida para argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos. A Figura 5.41 ilustra os resultados do ensaio do método da mancha.

Tabela 5.14 – Resumo dos resultados de classificação pelo método MCT convencional, método expedito pastilhas e por Adsorção de Azul de metileno, para o perfil do Poço 3

Prof. (m)	MCT convencional					Expedito (Pastilha)				Azul de metileno
	c'	d'	Pi (%)	e'	Classif.	ct (mm)	Penet. (mm)	c'	Classif.	
1,0	2,10	109,24	36	0,82	LG'	1,10	0	1,48	LA-LG'	Argilomineral pouco ativo
2,0	1,80	106,76	0,05	0,57	LG'	1,23	0	1,58	LA-LG'	Argilomineral pouco ativo
3,0	2,02	33,38	44,41	1,01	LG'	1,04	0	1,43	LA-LG'	Argilomineral pouco ativo
4,0	1,98	60,84	90	107	LG'	1,05	0	1,44	LA-LG'	Argilomineral ativo
5,0	2,15	43,24	115	1,16	NG'	0,93	0	1,34	LA-LG'	Argilomineral ativo

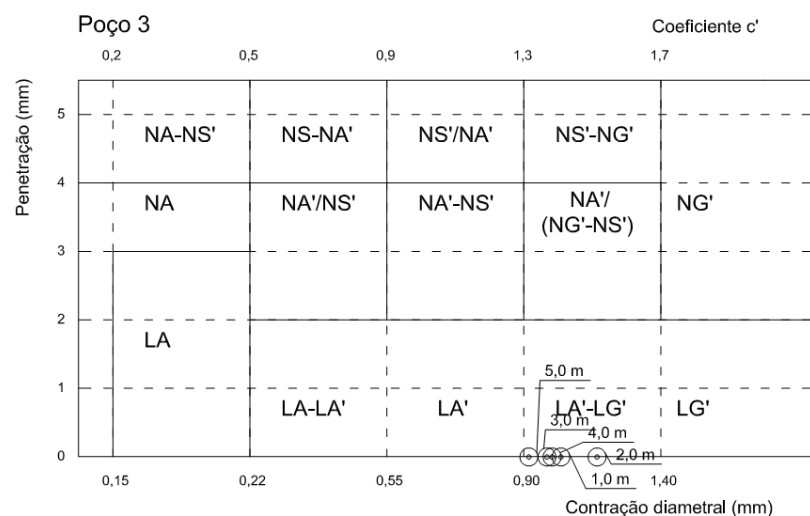


Figura 5.39 – Resultado do ensaio de pastilha do perfil do Poço 3

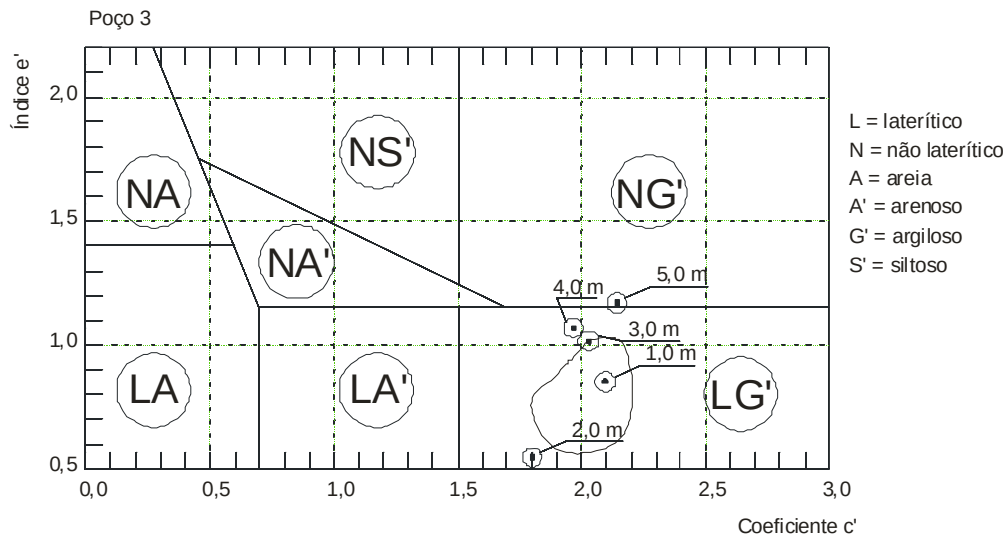


Figura 5.40 – Resultado do ensaio de classificação MCT do perfil do Poço 3 e enquadramento na área de argilas lateríticas adequadas ao uso em base de pavimentos.

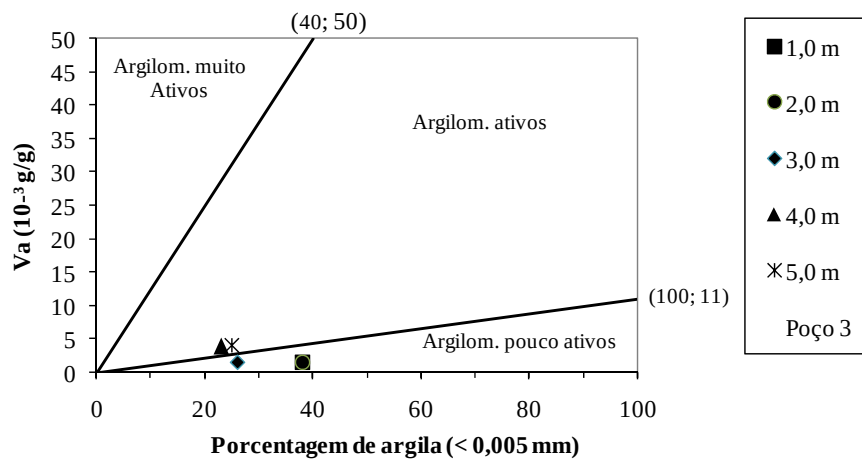


Figura 5.41 – Resultado do ensaio de classificação de Azul de Metileno pelo método da mancha, do perfil do Poço 3

De acordo com a Tabela 5.14, os resultados obtidos pelo ensaio MCT convencional indicaram que as amostras nas profundidades de 1,0 a 4,0 m foram classificadas como lateríticas argilosas e na profundidade 5,0 m foi classificada como não laterítica argilosa. Analisando a classificação pela metodologia expedita, em todas as profundidades os solos foram classificados como solos lateríticos argilosos ou arenosos. Quanto ao resultado do ensaio de azul de metileno pelo método da mancha, as amostras das profundidades de 1,0 a 3,0 m foram consideradas como argilominerais pouco ativos e as dos dois metros mais profundos como argilominerais ativos indicando materiais menos maduros.

No caso dos resultados registrados na Figura 5.39, para a amostra da profundidade 5,0 m o resultado ficou localizado muito próximo da linha divisória entre o solo de comportamento

laterítico arenoso e o solo de laterítico argiloso e laterítico arenoso. Já para a mesma profundidade, pelo ensaio convencional MCT, conforme a Figura 5.40, o resultado do solo neste caso ficou localizado próximo da linha divisória entre o solo de comportamento laterítico argiloso e não laterítico argiloso. Em ambos os métodos a condição de transição não permite uma definição clara. Já pelo ensaio de azul de metileno, registrado pela Figura 5.41 as amostras das profundidades entre 3,0 e 5,0 m estão também numa condição de transição, ou seja, no limiar entre argilominerais pouco ativos e ativos. A avaliação integrada destes métodos indica uma concordância parcial no caso do resultado nas profundidades 1,0 a 3,0 m, enquanto que nas profundidades restantes são necessários outros ensaios para a confirmação da classificação.

Quanto aos coeficientes da classificação MCT, tem-se que o coeficiente c' de todas as profundidades deste poço foram superiores a 1,5 caracterizando, de acordo com Nogami e Villibor (2009), como argilas ou solos argilosos. Com relação ao coeficiente d' , em todas as profundidades, foram superiores a 20 em todas as profundidades, indicando argilas lateríticas, entretanto nas profundidades 1,0 e 2,0 m foram bem mais altas, superiores a 100 dando indicação de areias finas argilosas, conforme o Quadro 2.5.

❖ Análise Química

A análise química do solo possibilita importantes informações sobre o solo podendo contribuir no entendimento do seu comportamento, em especial sobre o seu processo de intemperismo. A Tabela 5.15 apresenta-se o resumo dos resultados da análise química pelo método do ataque sulfúrico, de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , os parâmetros Ki e Kr e a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ de todas as profundidades do Poço 3.

Tabela 5.15 – Resumo da análise química do perfil do Poço 3

Ident.	Prof. (m)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	Ki	Kr	Ki/Kr	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (*)
Poço 3	1,0	56,5	6,73	19,7	2,92	4,88	4,00	1,22	4,59
	2,0	45,0	7,98	19,8	3,03	3,86	3,07	1,26	3,89
	3,0	45,3	11,0	23,2	2,23	3,32	2,55	1,30	3,31
	4,0	61,3	5,74	21,2	1,93	4,92	4,19	1,17	5,79
	5,0	37,7	5,20	20,8	0,41	3,08	2,66	1,16	6,27

* Dividido pela massa molecular de cada mineral

Pela Tabela 5.15, observa-se que os teores de sílica foram elevados iniciando em 56%, em 1,0 m de profundidade e atingindo 45% na profundidade 3,0 m. Entretanto atingiu a

porcentagem máxima em 4,0 m, voltando a atingir valor menor em 5,0 m. Estas altas porcentagens de SiO_2 se justificam em virtude da alta porcentagem de areia registrada nas curvas granulométricas, nos ensaios com e sem defloculante. No entanto, vale destacar que, comparativamente, este poço apresentou maiores teores de areia comparado aos do Poço 1.

Quanto aos teores de óxido de ferro, estes foram crescentes e variaram de aproximadamente 5% a 11%, sendo que a porcentagem máxima ocorreu na profundidade 3,0 m. Destaca-se que no caso destes óxidos determinados neste poço foram inferiores ao do Poço 1. Com relação aos teores de óxidos de alumínio o teor de Al_2O_3 iniciou em aproximadamente 20% no primeiro metro, atingiu 23% aos 3,0 m e reduziu para 21% no último metro estudado. Comparando com os resultados do Poço 1, os teores se assemelharam, apesar de possuírem comportamentos distintos. Quanto ao óxido de titânio, os valores variaram ao longo do perfil, de 2,92% a 0,41 % na profundidade 5,0 m, sendo nitidamente decrescente, apenas com um valor de 3% em 2,0 m.

No tocante aos valores de K_i e K_r , pode-se observar pela referida tabela que ambos os coeficientes foram maiores que 2,0 em todas as profundidades. Comparando os resultados registrados da Tabela 5.15 com os do Quadro 2.7 avalia-se que, de acordo com a classificação de Resende e Santana (1988), os solos em todo o perfil são cauliníticos, pois $K_i > 0,75$ e $K_r > 0,75$; de acordo com Fookes (1997), como o K_r de todas as profundidades são superiores a 2,0, todos os solos foram classificados como fersialíticos e ferruginosos. E quanto à classificação apresentada pelo IBGE (2005), de acordo com o Quadro 2.7, as amostras de todas as profundidades foram classificadas como pouco intemperizadas. A confirmação desta classificação depende então do confronto com os resultados apresentados na difratometria de Raios-X.

Neste poço a confirmação da classificação apresentada pela metodologia MCT, convencional e expedita, não foi verificada a partir dos valores do índice K_i para as profundidades de 1,0 a 4,0 m. A correlação ocorreu apenas para a profundidade 5,0 m, em que foi perceptível entre os resultados da metodologia MCT e análise química, a indicação de solos menos intemperizados.

❖ Análise mineralógica

Neste item são apresentados e discutidos os resultados de mais um método para avaliação do carácter laterítico dos solos por meio dos ensaios de difratometria de Raios-X. O Quadro 5.11 apresenta o resultado de DRX da amostra total e da fração argila do perfil do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m. Os difratogramas da análise total e acumulada de cada uma das profundidades estudadas estão ilustrados nas Figuras B. 11 a B.20, do Apêndice B, em anexo. Também para o Poço 3, seguiu-se a mesma rotina de análise desenvolvida para o Poço 1, ou seja uma avaliação individual de cada profundidade.

MINERAL	Fração	Poço 3 - PROFUNDIDADE (m)				
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Anatásio	Total	+	++	+	+	++
	Argila	---	---	---	---	---
Biotita	Total	---	---	---	---	+
	Argila	---	---	---	---	---
Caulinita	Total	++	++	++	+++	+++
	Argila	+++	+++	+++	+++	+++
Espinélio	Total	+	+	+	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Gibbsita	Total	+++	+++	+++	+	---
	Argila	+++	+++	+++	+	---
Hematita	Total	---	+	+	+	+
	Argila	---	---	---	---	---
Ilita	Total	---	---	---	---	---
	Argila	---	---	---	+	+
Ilmenita	Total	---	+	+	+	+
	Argila	---	---	---	+	+
Muscovita	Total	+	---	---	---	---
	Argila	---	---	---	---	---
Quartzo	Total	+++	+++	+++	++	+++
	Argila	---	---	---	---	---
Rutilo	Total	+	++	---	---	+
	Argila	---	---	---	---	---
Vermiculita	Total	++	---	---	---	---
	Argila	+	+	---	---	---

Onde:

Principal: +++; Subordinado: ++ e Traço: +

Quadro 5.11 – Minerais constituintes da amostra total e fração argila do Poço 3, nas profundidades de 1,0 a 5,0 m, obtidos com o ensaio de DRX

Foram registrados na amostra total da profundidade 1,0 m, a gibbsita e o quartzo como minerais principais, a caulinita e a vermiculita na condição subordinada e o anatásio, rutilo, espinélio, e mica como traços. Nesta análise, o teor de gibbsita é aproximadamente o dobro do teor de quartzo conforme observado na Figura B.6, do Apêndice B, em anexo. Na fração

argila a caulinita e a gibbsita foram principais e apresentaram praticamente a mesma proporção e a vermiculita é traço.

Na profundidade 2,0 m no ensaio da amostra total observou-se a presença de quartzo e gibbsita como minerais principais, a caulinita e o rutilo como minerais subordinados e o espinélio, ilmenita, hematita como traço. Da observação do difratograma das Figuras B.13 e B.14, do Apêndice B em anexo, destaca-se nesta profundidade que o quartzo suplanta ligeiramente a gibbsita e a caulinita apresenta aproximadamente a mesma proporção do primeiro metro. Mesmo estando ambos os minerais na condição principal, o teor de gibbsita apresenta proporcionalmente o dobro do de caulinita. Na fração argila a caulinita também a gibbsita apareceram como minerais principais, sendo que o teor de caulinita foi ligeiramente superior ao da gibbsita e a vermiculita apareceu como argilomineral traço até esta profundidade.

Na profundidade 3,0 m, analisando os componentes minerais na amostra total tem-se quartzo e a gibbsita como componentes principais. Na fração subordinada tem-se a caulinita e anatásio e na condição traço foram encontrados a espinélio, ilmenita e hematita. Detectou-se um aumento considerável no teor de quartzo e uma redução no teor de gibbsita, resultando no teor de quartzo aproximadamente o dobro do teor de gibbsita. Como na profundidade anterior, o teor de gibbsita é aproximadamente o dobro do teor de caulinita. Na fração argila foram detectados apenas caulinita e gibbsita na condição principal, sendo que a primeira é o dobro do teor da segunda.

Na profundidade 4,0 m os componentes minerais da amostra total foram a caulinita na condição principal, o quartzo e o anatásio na condição subordinada e a gibbsita, a ilmenita e a hematita como traço. Nesta análise o rutilo não foi detectado, o quartzo e a gibbsita reduziram consideravelmente ao contrário da caulinita que cresceu bastante, praticamente dobrando em relação ao teor da profundidade anterior. Na fração argila a caulinita apareceu como parcela principal e a ilita e gibbsita como traço.

Os minerais da profundidade 5,0 m na amostra total, são o quartzo e a caulinita como mineral principal, o anatásio como subordinados e o rutilo, ilmenita, hematita e a biotita como minerais traço. A gibbsita não foi detectada nesta profundidade e a caulinita permaneceu praticamente com a mesma proporção da profundidade anterior. O quartzo teve um aumento

considerável nesta profundidade. Na fração argila foram encontrados apenas a caulinita como argilomineral principal e ilita como traço.

Fazendo uma análise mais global do perfil do Poço 3 em estudo, tem-se as seguintes observações:

- há uma pequena diversidade de minerais neste poço quando comparado com o Poço 1;
- o quartzo foi o mineral principal nos três primeiros metros da amostra total e passou à condição de subordinado no quarto e quinto metro. Em virtude da dimensão da partícula, ele não ocorreu na fração argila;
- a gibbsita foi um óxido principal, tanto na fração argila quanto na amostra total, nos três primeiros metros e decresceu até desaparecer na profundidade 5,0 m;
- a caulinita apresentou uma condição subordinada nos três primeiros metros da análise total e teve um aumento, atingindo a condição principal. Na fração argila apresentou condição principal em todas as profundidades estudadas. Ressalta-se o crescimento marcante deste argilomineral com a profundidade;
- a hematita foi um mineral presente, como traço, a partir do segundo metro de profundidade e não foi detectado na fração argila;
- a ilita ocorreu apenas em termos de traço na fração argila nos dois últimos metros;
- a mica (muscovita) ocorreu na amostra total como traço apenas no primeiro metro;
- a vermiculita apareceu na condição subordinada no primeiro metro no ensaio de análise total e como traço na fração argila, nas profundidades de 1,0 e 2,0 m;
- As vermiculitas apresentam uma forte atração entre as lâminas devido à fixação do potássio, tornando-as menos expansivas quando comparadas às montmorilonitas. De acordo Resende et al. (2005), a presença de traços de vermiculita é comum em Latossolos com altos teores de alumínio no horizonte B. Neste caso, a vermiculita apresenta hidróxi entre as camadas o que diminui substancialmente a atividade da fração argila. A determinação da expansão realizada no ensaio CBR convencional apresentou baixos valores, donde avalia-se que não houve interferência da vermiculita.

5.2.2.3 Análise de resistência mecânica e de expansibilidade dos solos

Neste item são apresentados os resultados de resistência dos solos por meio dos ensaios de compactação convencional e da metodologia MCT. Primeiramente são analisados os

resultados dos ensaios convencionais. A Tabela 5.16 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação na energia Proctor intermediário, expansão e CBR das amostras de solo do Poço 3, nas cinco profundidades estudadas.

Tabela 5.16 – Resultados do ensaio de compactação, expansão e CBR das profundidades de 1,0 a 5,0 m, do Poço 3

Ident.	Prof. (m)	Propriedades			
		w _{ot} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	Exp. (%)	CBR (%)
Poço 3	1,0	17,0	17,50	0,1	18
	2,0	16,4	18,25	0,0	17
	3,0	18,4	17,30	0,1	30
	4,0	20,7	16,60	0,1	20
	5,0	22,8	16,50	0,3	23

Onde:

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

Exp. = expansão e CBR = *California Bearing Ratio*.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 5.16 às especificações tradicionais para a construção de pavimentos asfálticos resumidos no Quadro 5.9, constata-se que as profundidades 3,0 a 5,0 m apresentaram características que permitiriam ser usadas como sub-base, em virtude dos valores de CBR serem superiores a 20% e as expansões inferiores a 1%.

Outra possibilidade de avaliação dessas amostras em pavimentação asfáltica é baseada nas normas estabelecidas pelo Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infra-Estruturas de Transportes (DNIT, 2006), observando as faixas para w_L e IP. Mesmo com o não atendimento dos valores estabelecidos, ainda há a possibilidade de ser compensado com os valores de CBR, expansão e granulometria para utilização dos materiais como camada de base estabilizada granulometricamente.

Avaliando as amostras, observando-se as exigências apresentadas pelo DNIT (2006) registradas no Quadro 5.9, todas as profundidades apresentaram valores superiores aos limites máximos preconizados pelo referido órgão. Partindo para a possibilidade compensatória, em virtude do não atendimento destes parâmetros, observou-se que o maior de todos os CBR foi de 30% aos 3,0 m de profundidade, bem inferior aos 60% exigido pela norma. Com relação às faixas granulométricas, os solos coletados neste poço não se enquadraram em qualquer das faixas estabelecidas, entretanto os valores de expansão apresentaram, em todas as profundidades, resultados considerados adequados de acordo com os critérios convencionais.

Outra alternativa é a classificação de solos finos para uso em pavimentação por meio da correlação entre o teor do silte e CBR. Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.10 e enquadrando com os dados apresentados na tabela do DNIT (2006), pode-se concluir que em todas as profundidades os solos foram classificados como solo do tipo I, ou seja, são solos de bom comportamento resiliente como subleito e reforço do subleito, podendo também ser usado como camada de sub-base. Isto porque em todas as profundidades, a porcentagem de silte com defloculante é inferior a 35% e o CBR superior a 10%.

A Figura 5.42 apresenta os resultados dos ensaios de compactação por umidade, incluindo a umidade ótima, para todas as profundidades.

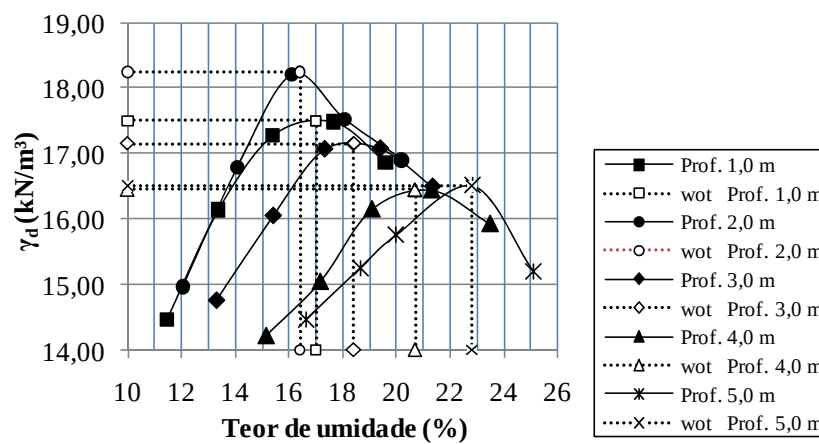


Figura 5.42 – Curvas de compactação do Poço 3, nas profundidades 1,0 a 5,0 m

Fazendo uma análise geral dos resultados apresentados nesta figura, observa-se que os valores das umidades ótimas variaram entre 16,4 a 22,8% e o peso específico seco máximo entre 16,50 e 18,25 kN/m^3 . A variação da umidade ótima foi alta e a do peso específico, apesar de numericamente pequeno, pode ser significativo.

A Figura 5.43 apresenta os resultados dos ensaios de compactação por umidade, incluindo a umidade ótima, para todas as profundidades e a Figura 5.44 apresenta as curvas de expansão por umidade para todas as profundidades.

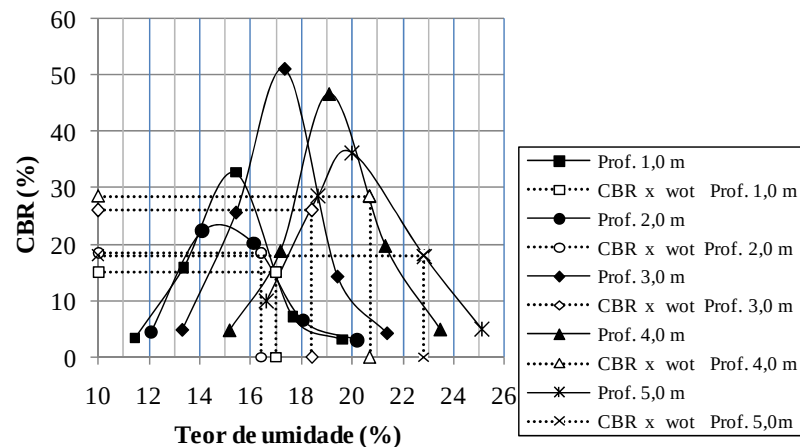


Figura 5.43 – Curvas de CBR do Poço 3, nas profundidades 1,0 a 5,0 m

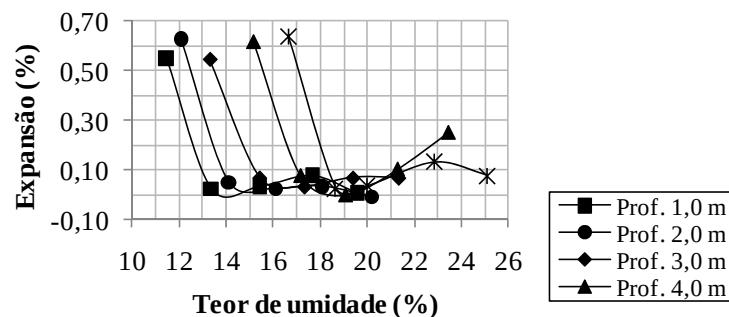


Figura 5.44 – Curvas de expansão por umidade das amostras do Poço 3

As Figuras 5.45 a 5.49 apresentam os resultados dos ensaios de peso específico seco máximo, CBR e expansão por umidade, para cada profundidade estudada. Com relação aos valores de expansão, observa-se na Figura 5.44 e nas Figuras 5.45 a 5.49 que o maior valor deste parâmetro foi 0,30% na profundidade 5,0 m, ou seja, os valores foram bastante baixos ao longo do perfil.

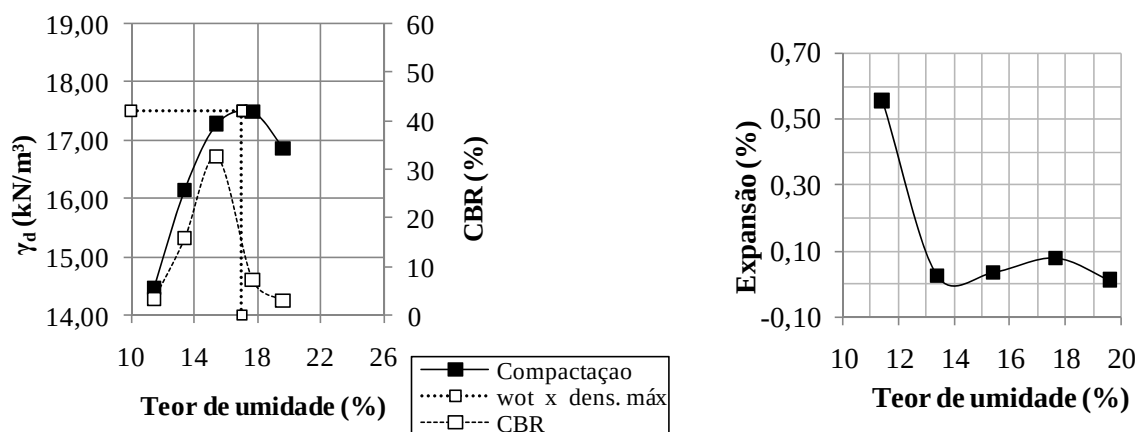


Figura 5.45 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 1,0 m

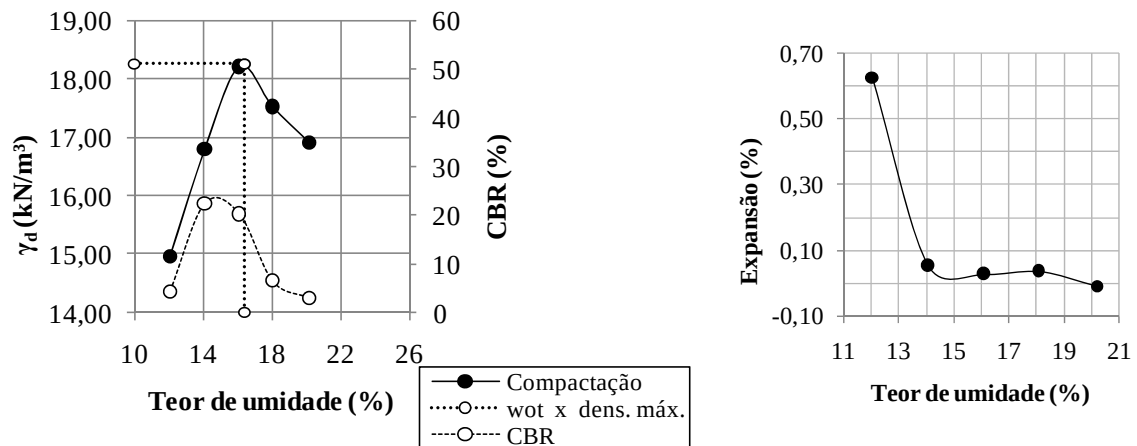


Figura 5.46 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 2,0 m

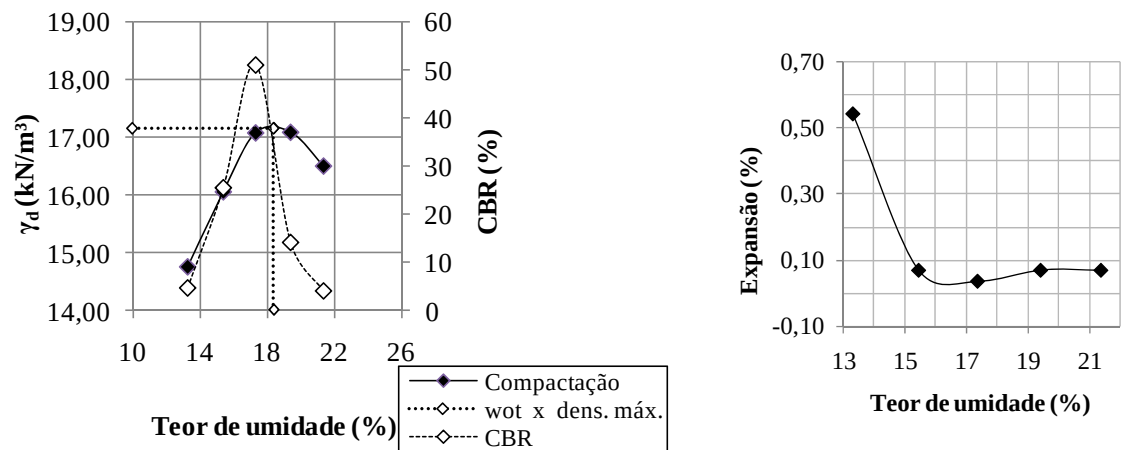


Figura 5.47 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 3,0 m

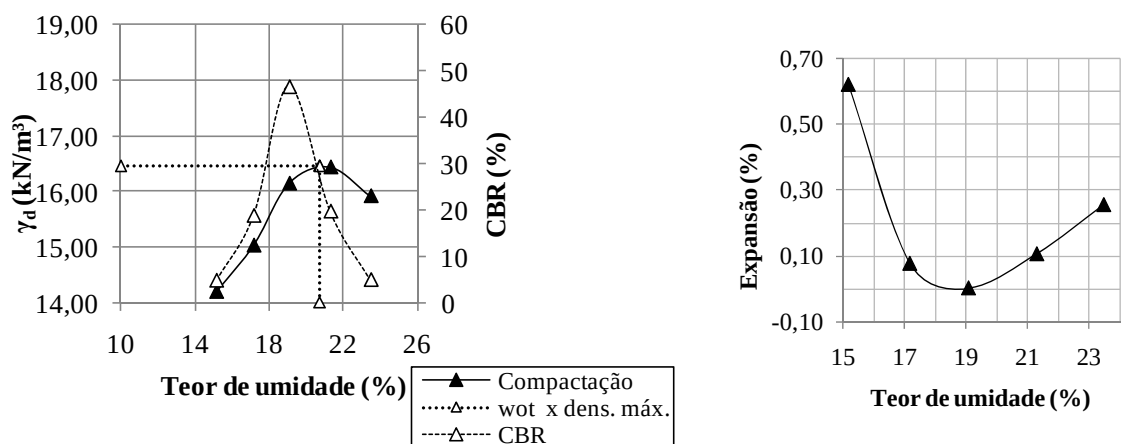


Figura 5.48 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 4,0 m

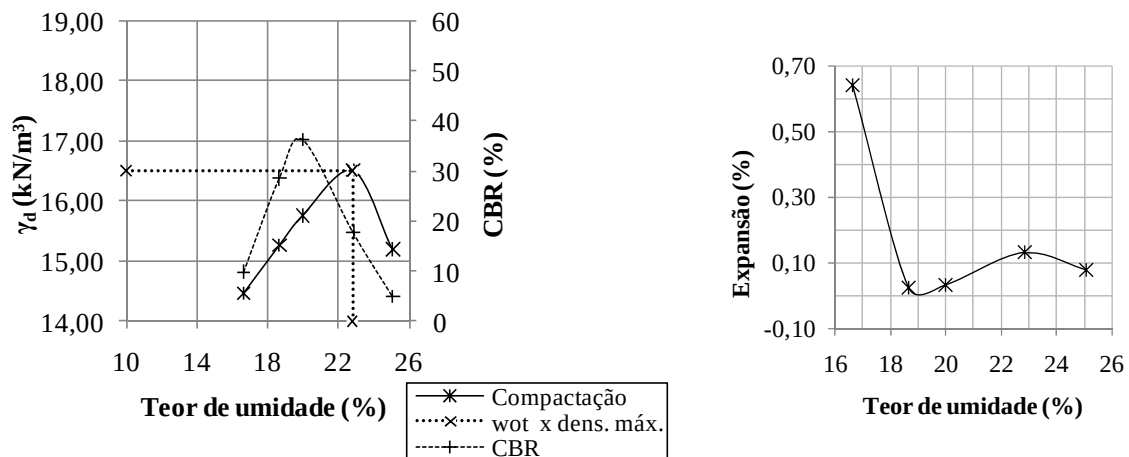


Figura 5.49 – Curvas de compactação, CBR e expansão pelo método convencional do Poço 3, na profundidade 5,0 m

A seguir são analisados os resultados do ensaio de resistência por meio dos ensaios da metodologia MCT, de acordo com os dados Mini-Proctor, Mini-CBR e expansão.

A Tabela 5.17 apresenta os resultados dos ensaios da metodologia MCT, do Poço 3 na profundidade 3,0 m. A energia de compactação adotada foi Proctor Intermediário, considerando que a análise visa o uso do solos em pavimentação. A Figura 5.50 retrata a curvas de compactação com sobrecarga e Mini-CBR por umidade, nas condições imersa e sem imersão. Ressalta-se que o mesmo procedimento adotado para a montagem da curva do Poço 1 na profundidade 3,0 m foi também estabelecida para esta amostra.

Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios de compactação Mini-Proctor, Mini-CBR, expansão, RIS e PSI do Poço 3 na profundidade 3,0 m

COMPACTAÇÃO MINI-PROCTOR E MINI-CBR ENERGIA INTERMEDIÁRIA					
Compactação c/ sobrecarga		Mini- CBR	Mini-CBR (Sobrecarga e imersão)	Exp.	
w_{ot} (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m^3)	(Sobrec.) (%)	(%)	(%)	
16,5	18,30	48	30	0,10	
					RIS (%) PSI (%)
					62 38

Onde:

w_{ot} = umidade ótima; $\gamma_{dmáx}$ = peso específico seco máximo; Exp. = Expansão;
RIS = produto da razão do Mini-CBR com imersão pelo Mini-CBR com imersão multiplicado por 100 (%); PSI = 100 – RIS.

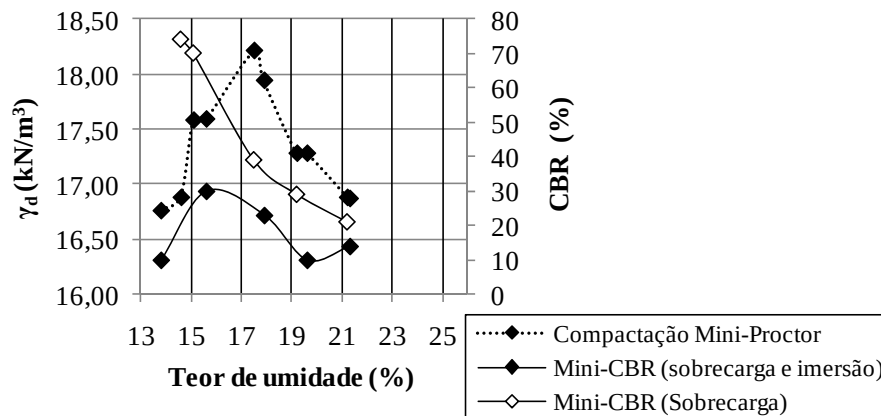


Figura 5.50 – Curvas de compactação com sobrecarga e Mini-CBR com e sem imersão

Reportando novamente a Villibor et al. (2000), listam-se algumas propriedades consideradas satisfatórias para a utilização de solos finos em base de pavimentos, na condição de energia intermediária, a saber: Mini-CBR sem imersão $\geq 40\%$; Perda de suporte por Imersão (PSI) $\leq 50\%$ e expansão sem sobrecarga $< 0,3\%$. Quanto a estes intervalos propostos, os autores consideram, com relação à capacidade suporte, que o ensaio seja sem sobrecarga, pois os pavimentos econômicos não recebem camadas espessas de revestimento. Na amostra estudada os valores de Mini-CBR foram de 48 e 30% para a condição sem imersão e com imersão, respectivamente. Quanto à expansão, o resultado da única amostra estudada foi de 0,1%, inferior ao limite máximo estabelecido por Villibor et al. (2000) que é de, no mínimo, 0,3%. Na amostra estudada o RIS foi 62%, indicando solo de comportamento laterítico e PSI foi 38%, valor inferior a 50%, sendo considerado satisfatório.

A Tabela 5.18 apresenta a comparação dos resultados dos ensaios de compactação e CBR executados de acordo com a metodologia convencional e MCT da amostra de solo na profundidade 3,0 m do Poço 3.

Analisando os dados apresentados na Tabela 5.18 observa-se que a umidade ótima da compactação convencional foi maior do que as umidades da compactação Mini-Proctor. Os resultados do ensaio convencional apresentaram menor peso específico seco máximo, conforme era esperado e resultados semelhantes, de expansão e de CBR, comparado ao de Mini-CBR. Vale ressaltar que nesta única amostra analisada deste poço, em termos de capacidade suporte, os valores de CBR e Mini-CBR, ambos com imersão, apresentaram o mesmo valor.

Tabela 5.18 – Resultados dos ensaios de compactação convencional e Mini-Proctor, expansão e Mini-CBR, ambos com e sem imersão do Poço 3 na profundidade 3,0 m

Parâmetro	w_{ot} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	Expansão (%)	Mini-CBR c/ imersão (%)	Mini-CBR s/ imersão (%)	CBR (%)
Compactação Mini-Proctor	16,50	18,40	0,10	30	48	---
Compactação Convencional	18,40	17,30	0,07	---	---	30

Onde:

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

Fazendo uma análise mais geral do Poço 3, em termos de capacidade suporte, pode-se concluir que, de acordo com as especificações tradicionais, as profundidades 3,0 a 5,0 m poderiam ser usadas como material para sub-base, pois apresentaram valores de CBR $\geq 20\%$ e expansões inferiores a 1%. Levando-se em conta esses valores relativos aos ensaios de capacidade suporte convencionais, as amostras referentes a todas as profundidades analisadas para o Poço 3 poderiam ser utilizadas como reforço do subleito. Quanto à especificação estabelecida pela metodologia MCT, a única amostra estudada de acordo com estes critérios, foi a da profundidade 3,0 m e ela atendeu aos critérios de Mini-CBR, expansão e PSI para ser usada como base de pavimentos econômicos. Quanto à classificação alternativa pelo módulo resiliente, os solos foram classificados de bom comportamento resiliente como subleito e reforço do subleito, podendo também ser usado como camada de sub-base. Entretanto, deve ser levado em conta que, na prática, o uso do solo das profundidades de 3,0 a 5,0 m pode encarecer o serviço de pavimentação.

A Figura 5.51 apresenta as curvas de compactação convencional e Mini-Proctor para a profundidade em estudo.

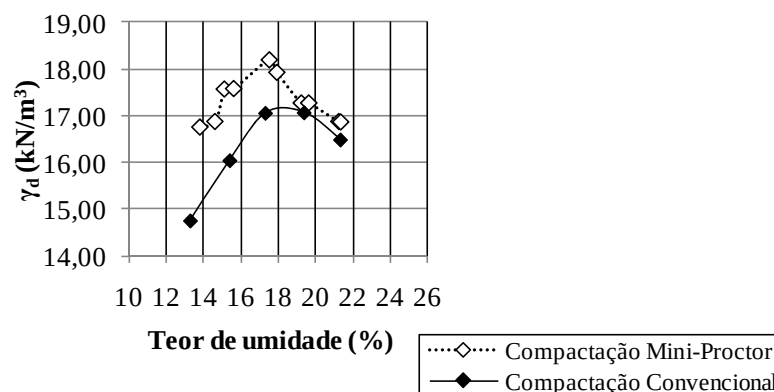


Figura 5.51 – Curva de compactação convencional e Mini-Proctor do Poço 3 na profundidade 3,0 m

Analisando o formato das curvas da Figura 5.51, observa-se que elas apresentaram configurações semelhantes. Ambas são ponteadas, o que no caso da compactação convencional dá indício de solo arenoso. Segundo Marangon (2004), para as areias argilosas bem graduadas, as curvas de compactação têm picos bem acentuados e ramo seco retilíneo, sendo mais acentuada a inclinação quando a argila é laterítica.

O Quadro 5.12 apresenta as principais características geotécnicas do Poço 3.

Poço 3 ($\varnothing = 0,70\text{m}$)

Prof. 1,0m	• Pedregulho: 1,55%; Areia: 77,45%; Silte: 21,00% • $w_L = 33$; $w_p = 20$; $IP = 13$; $\rho_s = 2672 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: CL (argila de baixa compressibilidade); TRB: A-6; • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LA-LG' • CBR = 18%; Exp. = 0,1% • Utilização em pavimentação: reforço de subleito.
Prof. 2,0m	• Pedregulho: 5,16%; Areia: 66,84%; Silte: 28,00% • $w_L = 34$; $w_p = 21$; $IP = 13$; $\rho_s = 2689 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: CL (argila de baixa compressibilidade); TRB: A-6 • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LA-LG' • CBR = 19; Exp. = 0,0 • Utilização em pavimentação: reforço de subleito.
Prof. 3,0m	• Pedregulho: 6,20; Areia: 63,80; Silte: 30,00 • $w_L = 34$; $w_p = 22$; $IP = 12$; $\rho_s = 2711 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: CL (argila de baixa compressibilidade); TRB: A-6 • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LA-LG' • CBR = 30; Exp. = 0,1 • Utilização em pavimentação: material para sub-base.
Prof. 4,0m	• Areia: 68,00; Silte: 32,00 • $w_L = 37$; $w_p = 24$; $IP = 13$; $\rho_s = 2727 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: CL (argila de baixa compressibilidade); TRB: A-6 • MCT convencional: LG'; MCT expedito: LA-LG' • CBR = 20; Exp. = 0,1 • Utilização em pavimentação: material para sub-base.
Prof. 5,0m	• Areia: 77,00; Silte: 23,00 • $w_L = 36$; $w_p = NP$; $IP = NP$; $\rho_s = 2738 \text{ kg/m}^3$ • SUCS: ML (silte de baixa compressibilidade); TRB: A-4 • MCT convencional: NG'; MCT expedito: LA-LG' • CBR = 23; Exp. = 0,3 • Utilização em pavimentação: material para sub-base.

Quadro 5.12 – Resumo das principais características geotécnicas do Poço 3.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do mapeamento existente e a observação do conhecimento prévio em relação aos aspectos pedológicos auxiliaram na definição mais acertada da possível localização de jazidas de solos tropicais para uso em pavimentação. Desta forma, pode ser comprovada a importância de se compilar e analisar as informações disponíveis.

Foi confirmado também que o procedimento expedito é mais rápido, fácil e barato para classificação dos solos tropicais, permitindo a identificação do solo e a escolha de pontos para serem analisados em profundidade quanto à aplicação em pavimentação.

❖ **É possível destacar as seguintes conclusões com relação aos componentes mineralógicos do Poço 1.**

- Crescimento marcante da caulinita com a profundidade, em detrimento do decréscimo da gibbsita até os 3 m, dando indícios deste mineral ter sido formado a partir da caulinita, na fração total relativa às amostras.
- A oscilação entre a existência de goetita e hematita ao longo do perfil pode ter sido em decorrência de molhagem e ressecamento na evolução pedológica, ocorrendo provavelmente mais hematita na superfície por causa do contato com as condições atmosféricas.
- A presença de biotita e da hornblenda na profundidade 3,0 e 4,0 m indicaram que no perfil o grau de intemperismo não é tão intenso, resultado da baixa estabilidade dos silicatos ferromagnesianos ao intemperismo. Apesar de ser classificado como Latossolo, com ocorrência de caulinita e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, o solo apresentou ainda a ocorrência de minerais do tipo 2:1 como a ilita, vermiculita e montmorilonita.
- A ocorrência de ilita como traço não interferiu no comportamento do solo ao longo de todo o perfil analisado.
- Não foi observada interferência da composição química no peso específico, em relação à ocorrência dos óxidos e hidróxidos.

- Quanto ao comportamento expansivo das amostras nas profundidades de 4,0 e 5,0 m, isto pode ser explicado pelo alto teor de silte. A partir da descrição mineralógica por Raios-X, provavelmente a maioria desta faixa granulométrica do tamanho silte é composta por macrocristais de caulinita e micas. A existência de montmorilonita na profundidade 5,0 m também pode ter contribuído para a alta expansão observada.

❖ **Quanto às análises mineralógicas realizadas no poço 3, é possível destacar as conclusões a seguir**

- No que se refere à composição mineralógica, no ensaio de Raios-X, destaca-se na fração total, que a vermiculita apareceu na condição subordinada no primeiro metro e como traço na fração argila nas profundidades de 1,0 e 2,0 m. A presença deste mineral poderia levar a prever solos expansivos. Entretanto, como a vermiculita nos Latossolos com alto teor de alumínio é descrita apresentando hidróxi entre as camadas, isso as torna menos ativas. Portanto, a presença de vermiculita na condição subordinada no primeiro metro aparentemente não influenciou nos valores de expansão, medidos no ensaio de CBR convencional.
- Outro aspecto a ser levado em conta é a presença de vermiculita neste poço no primeiro metro, dando indícios de solos menos intemperizados. No entanto, como o restante do perfil apresentou evidências de intenso processo de intemperização, dada a presença de gibbsita e hematita, a ocorrência daquele mineral no primeiro metro não foi conclusiva.

❖ **Aspectos gerais dos poços estudados:**

- A análise granulométrica com e sem o uso de defloculante foi considerada importante na avaliação do teor de agregação das partículas.
- É possível concluir com relação à composição mineralógica das porções mais alteradas dos perfis de solo analisados que, como indicado na literatura, os Latossolos apresentaram para os dois poços, com exceção dos minerais pouco alteráveis, quartzo e minerais primários resistentes ao intemperismo, condições bem marcantes. Constatou-se intensa alteração dos minerais menos resistentes e dos minerais de argila 2:1, no caso do Poço 3; seguida de concentração residual de sesquióxidos de ferro e de alumínio, como foram observados com a presença dos minerais goethita, hematita no

Poço 1 e gibbsita e hematita no Poço 3 e a existência de minerais de argila do tipo 1:1, como detectada principalmente a caulinita nos dois poços.

- Com relação aos índices Ki e Kr, constata-se que eles não auxiliaram na definição do caráter laterítico dos solos em questão, quando comparados à metodologia MCT.
- Para os casos estudados observou-se relação entre a configuração da superfície e tipo de solo, principalmente nas propriedades referentes ao grau de intemperismo. Essas evidências possibilitaram a confirmação dos indícios de serem os Latossolos, em geral, apropriados para o uso em pavimentos principalmente quando se tratam de solos mais intemperizados, como é o caso do Poço 3.
- A identificação de minerais por Raios-X, em correlação com a composição mineralógica e por consequência com a atividade da fração argila, auxiliou no esclarecimento quanto ao caráter expansivo do solo, essencial no entendimento do comportamento do solo se aplicado em pavimentos.

❖ **Foi possível concluir o que se segue, quantos aos ensaios de composições química e mineralógica e de resistência mecânica:**

- Quanto aos ensaios de determinação da composição química, o fato de terem sido realizados por empresas diferentes, em amostras e etapas também diferentes, pode ter levado a discrepância dos resultados. Este fato foi observado principalmente na determinação de Ki e Kr. Entretanto, a quantificação dos óxidos de Alumínio, Ferro e Titânio apresentaram resultados mais concordantes, para o Ponto 6, na primeira etapa, e Poço 1 na segunda, nas profundidade próxima à superfície na primeira etapa e a 1,0 m na segunda.
- A classificação dos solos pelas duas metodologias adotadas para identificação do comportamento laterítico, metodologia convencional MCT e método expedito das pastilhas, foram concordantes nos dois primeiros metros do Poço 1 e nos quatro primeiros metros do Poço 3. Avaliou-se que nas profundidades mais superficiais, portanto mais intemperizadas, a classificação foi mais concordante.
- A realização do ensaio de Mini-CBR nos dois poços, a profundidades predefinidas a partir dos ensaios de CBR, contribuiu para o cálculo do RIS e PSI (perda de suporte por imersão), os quais foram considerados relevantes na definição do uso, se em base, sub-base, leito, sub-leito ou ainda reforço do sub-leito no caso dos solos analisados ao longo do perfil. Ainda quanto aos ensaios CBR e Mini-CBR, a comparação entre as

curvas de ambos não apresentou correlação, principalmente para o Poço 1, na profundidade analisada.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que, para trabalhos futuros, sejam desenvolvidos os seguintes estudos:

- Quantificação e especificação das propriedades geológico-geotécnicas para os solos da região;
- Compilação das informações dos órgãos relacionados quanto ao tipo de material e desempenho das rodovias;
- Definição das características de uma jazida para a região;
- Atualização da metodologia para a determinação de K_i e K_r ;
- Análise da repetitividade e reprodutividade do ensaio de pastilha de identificação expedita segundo a metodologia MCT;
- Análise da erodibilidade dos solos tropicais a partir da metodologia MCT;
- Elaboração de um manual de investigação de jazidas de solos tropicais;
- Avaliar os resultados da aplicação do solo estudado em um trecho experimental;
- Realização do ensaio Mini-Proctor com sobrecarga.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B. **Desenvolvimento da metodologia de preparação de amostras para análise difratométrica de argilominerais no centro de pesquisas da Petrobrás**. Boletim de Geociências. Rio de Janeiro: Petrobrás, ago./dez. 198. v. 1, n. 2. p. 157-175,.
- ARAKI, M. S. **Aspectos relativos às propriedades dos solos colapsíveis do Distrito Federal**. 1997. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a.
- ABNT_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.
- ABNT_____. **NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c.
- ABNT_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984d.
- ABNT_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT_____. **NBR 9895**: Solo – Índice Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT_____. **NBR 6502**: Rochas e Solos – Rio de Janeiro, 1995.
- BARROSO, S. H. A. **Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. 2002. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- BASTOS, C. Plasticidade dos Solos. <http://www.fag.edu.br/professores/deboraf/Mec%E2nica%20dos%20Solos/2%20bimestre/PLASTICIDADE.pdf>. Acesso em 28 jul. 2010. (Slides de aulas de Mecânica dos Solos, DMC/FURG).
- BASTOS, C. A. B.; SCHMITT, L. A.; VASCONCELLOS, S. M.; RABASSA, C. M.; SOUZA, E. W. Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 12, p. 59-67, 2008.
- BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- BONINI, A. O. **Proposta de um método de ensaio para determinação do volume de azul de metileno adsorvido pela fração final de solos tropicais**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Infra-estrutura em Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- CALDERANO, S. B.; DUARTE, M. N.; GREGORIS, G. **Análise mineralógica das frações finas do solo por difratometria de raios-X**. Revisão e atualização da metodologia e critérios usados na Embrapa Solos. Embrapa. Comunicado Técnico 53. Rio de Janeiro: jan. 2009.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Método de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Instituto Agronômico. Boletim Técnico 106. Campinas: nov. 2009.

CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; MAGALHÃES, L. F.; SÁ, M. A. M. **Diagnóstico hidrogeológico da região de Goiânia**. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 2003, 125 p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**: fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.v. 1. 239 p.

CARDOSO, F. B. F. **Propriedades e comportamento mecânico dos solos do Planalto Central Brasileiro**, 357 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (FT), Universidade de Brasília, 2002.

CASSETI, V. **Geomorfologia do município de Goiânia – GO**. Boletim Goiano de Geografia, 12(1): 65-85, jan./dez. 1992.

CASTRO, B. A. C. de. **Caracterização geotécnica de solos da região central de Minas Gerais para aplicação de obras rodoviárias**. 2002. 230 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

COSTA, J. H. **Caracterização geotécnica dos solos finos, da faixa litorânea e tabuleiros costeiros do estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego**. 2006. 318 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil – Área de concentração: Engenharia Geotécnica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

COZZOLINO, V. N. M.; NOGAMI, J. S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 2; p. 77-91, 1993.

CUNHA, T. J. F.; RIBEIRO, L. P.; SANTOS, H. G.; GOMES, I. A.; SANTOS, R. D. **Estudo da correlação de solos para fins de classificação nas regiões do Recôncavo Baiano e microrregião de Irecê-Bahia**. Embrapa, dez. 2000. Rio de Janeiro – RJ. Boletim de Pesquisa nº 9. 59p.

DELGADO, A. K. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso em pavimentação rodoviária**. 2007. 392 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

DERSA – DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S. A. Diretrizes para identificação expedita do solo laterítico – Método da pastilha, São Paulo, s. a.

DER-SP – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Sub-base e base de solo de comportamento laterítico – brita descontínua – SLBD. São Paulo, 2005.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **CLA 259/96**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. (s. l.), 1996.

DNER _____. **ME 258**: Solos compactados com equipamento miniatura – Mini - MCV – Norma Rodoviária. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994a.

DNER _____. **ME 256**: Determinação de perda por imersão – Norma Rodoviária. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994b.

- DNER_____. **ME 030/94:** Solos – determinação das relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos em solos. (s. l.) 1994c.
- DNER_____. **ME 254:** Solos compactados em equipamentos miniatura – Mini-CBR e expansão – Norma Rodoviária. Método de Ensaio. (s. l.), 1997.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2006. 274 p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412 p.
- EMBRAPA. **Manual de métodos da análise de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- FABBRI, G. T. P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno.** 1994. 101 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- FOOKES, P. G. (Ed.) **Tropical residuals soils.** London: Geological Society Professional Handbooks, 1997. 184p.
- FORTES, R. M. **Método expedito de identificação MCT de solos tropicais, para finalidades rodoviárias, utilizando-se anéis de PVC rígido.** 1990. 210 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- FORTES, R. M.; BINOTTO, B. R. Diagnóstico e estudo do tratamento da erosão em núcleos urbanos ao longo da faixa lindeira da rodovia Rio-Santos. *In:* V JORNADA LUSO-BRASILEIRA DE PAVIMENTOS: políticas e tecnologias, 2006, Recife – PE. V JORNADA LUSO-BRASILEIRA DE PAVIMENTOS: políticas e tecnologias, 2006.
- FORTES, R. M. Métodos das pastilhas para identificação expedita do grupo MCT – Miniatura, Compactada, Tropical. 1ª Câmara Permanente de Desenvolvimento Tecnológico. Universidade Mackenzie. São Paulo, 1997.
- FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; ZUPPOLINI NETO, A. Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. *In:* CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 2002, Lisboa. **Anais...**, 2002.
- FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. **Minerais e Rochas.** *In:* SANTOS, A. M.; BRITO, S. N. A.(editores) *Geologia de Engenharia*, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 15-38.
- GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; COUTO, E. G.; ROBERTS, D. A. Estudo das relações entre tipos de solos, alteração, mineralogia e topografia por sensoriamento remoto hiperespectral. *In:* XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis, SC. **Anais ...** São José dos Campos, INPE, 2007. p. 6453-6460.
- GRECO, J. A. S. Classificação dos Solos (texto complementar) http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/TextoComplementar_Classificacao.pdf. Acesso em: 26 fev. 2009.
- GUIMARÃES, E. M. Notas de aula do Curso de Identificação de Argilo-Minerais por difratometria de raios-X. Ministrado aos alunos de Mestrado e Doutorado da UnB (2009).
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. Manuais técnicos em geociências, n. 4. 300 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

Instituto de Planejamento Municipal (IPLAN). **Plano de desenvolvimento integrado de Goiânia**. Goiânia: IPLAN, 1992. v. 1. 112 p.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, S. I. Version. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553p.

MACHADO, C. C.; SANTANNA, G. L.; LIMA, D. C.; PEREIRA, R. S. Utilização de informações de levantamentos de solos em estradas florestais. 7º Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal – SIF, p. 441 – 462.

MAHALINGA-IYER, U.; WILLIAMS, D. J. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. **Engineering Geology**, London, v. 46, p. 71 – 80, 1997.

MARANGON, M. **Proposição de estruturas típicas de pavimentos para a região de Minas Gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e resiliência**. 2004. 442 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARTINS, A. P. S. **Estudo da influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico de dois solos tropicais do município de Ouro Preto – MG**. 2005. 321 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Área de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais**. In: 10º COBRAMSEF, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: ABMS, 1994. v. 4, p. 1293-1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 1. ed. São Paulo: Villibor, 1995. 213 p.

NUNES, F. C. **Pedologia**. 2. ed. FTC EaD, 2008. 95 p. (Material didático)

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.) **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. 589 p.

OLIVEIRA, L. A. G. **Desenvolvimento econômico de Goiânia: o debate que não houve nas últimas eleições**. <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/conj/conj3/03.htm>> Acesso em 10 ago. 2010.

OLIVEIRA, R. B. **Análise de uma mistura de dois solos com comportamentos diferentes de CBR e expansão**. 2008. 107 f. Monografia (Conclusão de curso superior de tecnologia em infra-estrutura de vias) – Coordenação da Área de Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás CEFET - GO, Goiânia, 2008.

PADULA, R. **Infra-Estrutura I: transportes – fundamentos e propostas para o Brasil**. 1.ed. (Pensar o Brasil – Construir o futuro da nação). Brasília: Confea, 2008. 215 p.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba – SP (escala 1:100.000): estudo dos aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. 213 f, v. 1. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Área de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. Oficina de Textos. 2006. São Paulo, 247 p.

PLANO DIRETOR DE GOIÂNIA.
<http://www.goiania.go.gov.br/download/legislacao/PLANO_DIRETOR_DO_MUNICIPIO_DE_GOIANIA_2007.pdf> Acesso em: 10 ago. 2010.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P. **Uso das relações Ki e Kr na estimativa da mineralogia para classificação de latossolos**. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988.

RESENDE, M.; CURY, N.; KERR, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros**: interpretação e aplicações. Lavras: UFLA, 2005. 192 p.

RODRIGUES, C. **Avaliação de dispersantes químicos e pré-tratamentos na determinação de argila de solos de mineralogia distintas**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Área de Concentração: Solo e água, Goiânia, 2008.

RUFO, R. C. **Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Goiânia, 2009.

SANTOS, L. V.; POLIVANOV, H.; ALAMINO, R. C. J.; SILVA, V. H. G. Adsorção de cloreto e potássio em solos tropicais. Anuário do Instituto de Geociências, RJ, vol. 29-2, 2006, págs. 101-121

SILVA, E. R. **A economia goiana no contexto nacional: 1970 – 2000**. 2002. Dissertação. 198 f. (Mestrado em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente – Área de concentração: Economia Regional e Urbana) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SILVA, H. H. A. B. **Caracterização mineralógica e filiação da vermiculita da mina Cerrado III – Sanclerlândia**. 2006. 63 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Área de Concentração: Mineralogia e Petrologia, Brasília, 2006.

SOUSA, A. T. **Evolução de voçorocas em bordas de relevo residual tabular em Quirinópolis – GO**. 2010. Tese. 169 f. (Doutorado em Agronomia) Universidade Federal de Goiás, Área de Concentração: Solo e Água, 2010.

SOUSA, M. L. de. **Pavimentação rodoviária**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.

SOUZA, R. A. **Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para os solos de Uberlândia-MG**. 2007. 113.f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil – Área de concentração: Engenharia Urbana) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. 2006. Tese. 199 f. (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Ed. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1978. 510p.

VIEIRA, A.; PRATES, M. de C. Considerações sobre a correlação entre o ensaio de Mini-CBR e o ensaio de CBR. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Porto Alegre, 2002.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, S. J.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. São Paulo: Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) e Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 138 p.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos**: tecnologia do uso de solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

**APÊNDICE A – Curvas granulométrica dos Poços 1 e 3,
nas profundidades de 1,0 a 5,0 m**

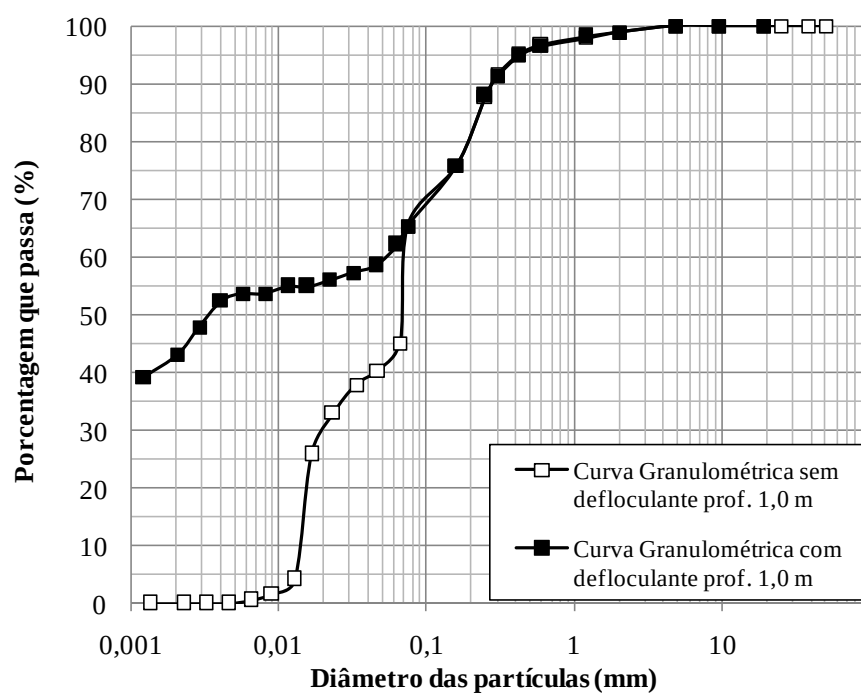


Figura A.1 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade de 1,0 m, com e sem o uso de defloculante

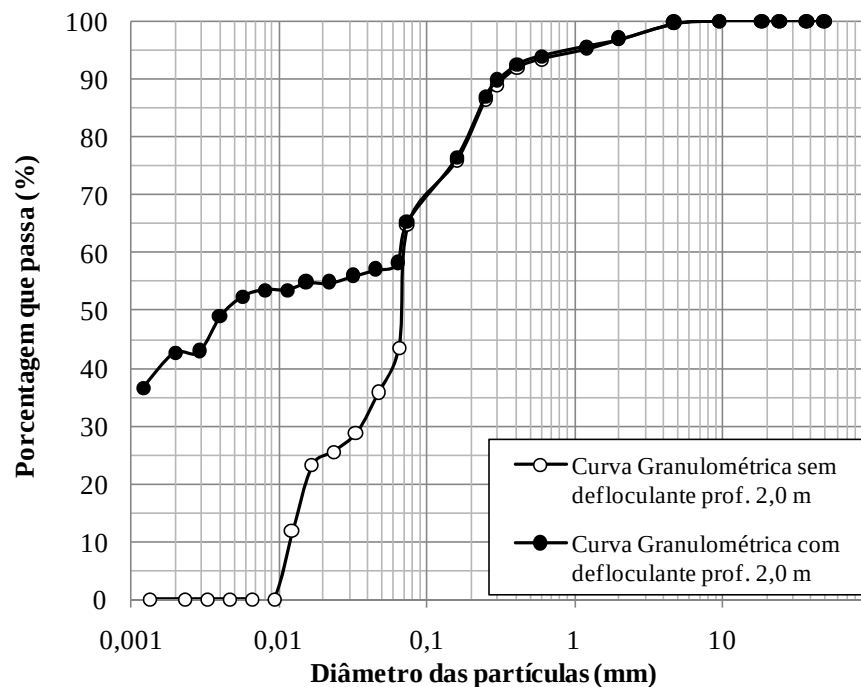


Figura A.2 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m, com e sem o uso de defloculante

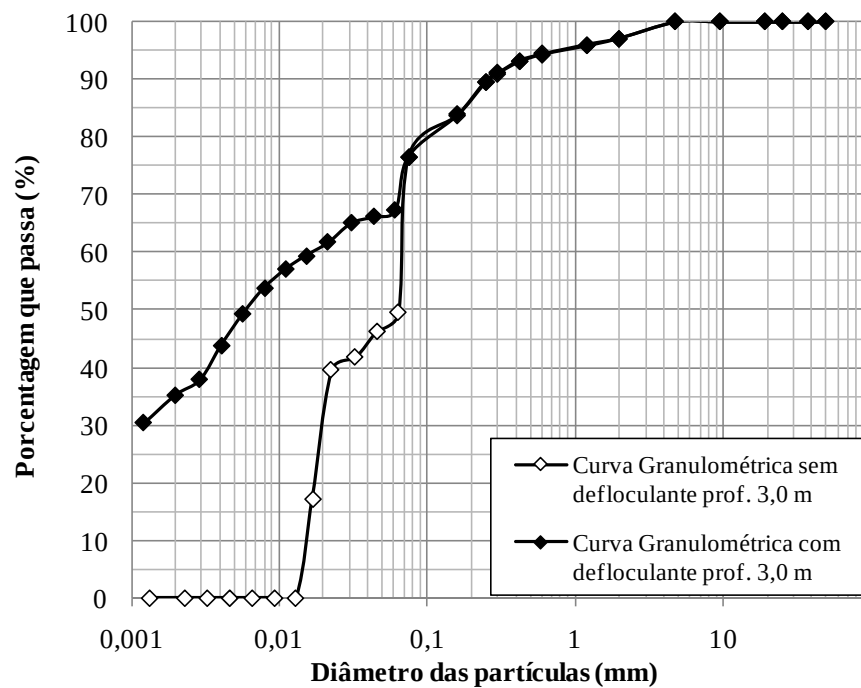


Figura A.3 – Curvas granulométricas da amostrado Poço 1, na profundidade 3,0 m, com e sem o uso de defloculante

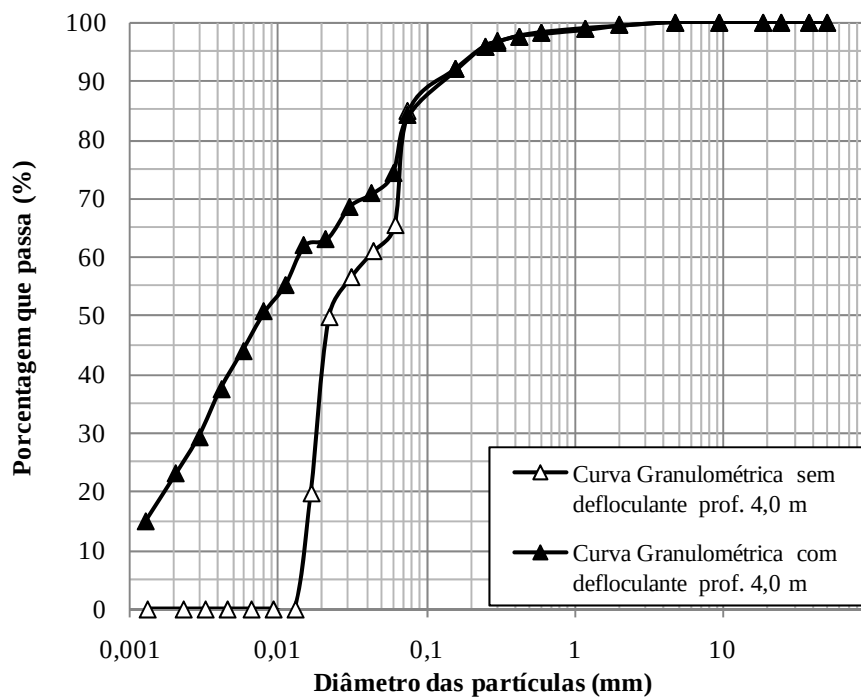


Figura A.4 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m, com e sem o uso de defloculante

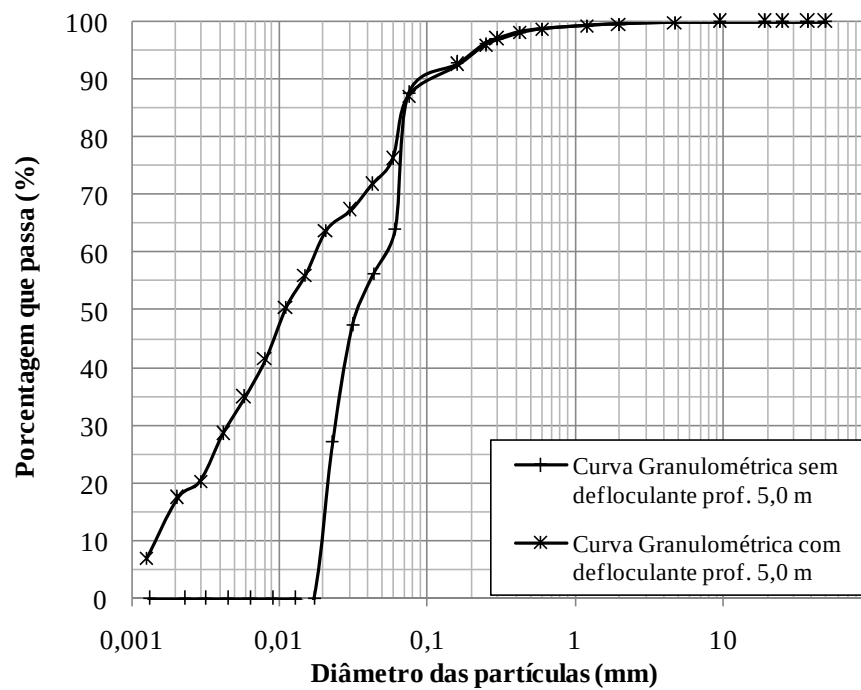


Figura A.5 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 1, na profundidade de 5,0 m, com e sem o uso de defloculante

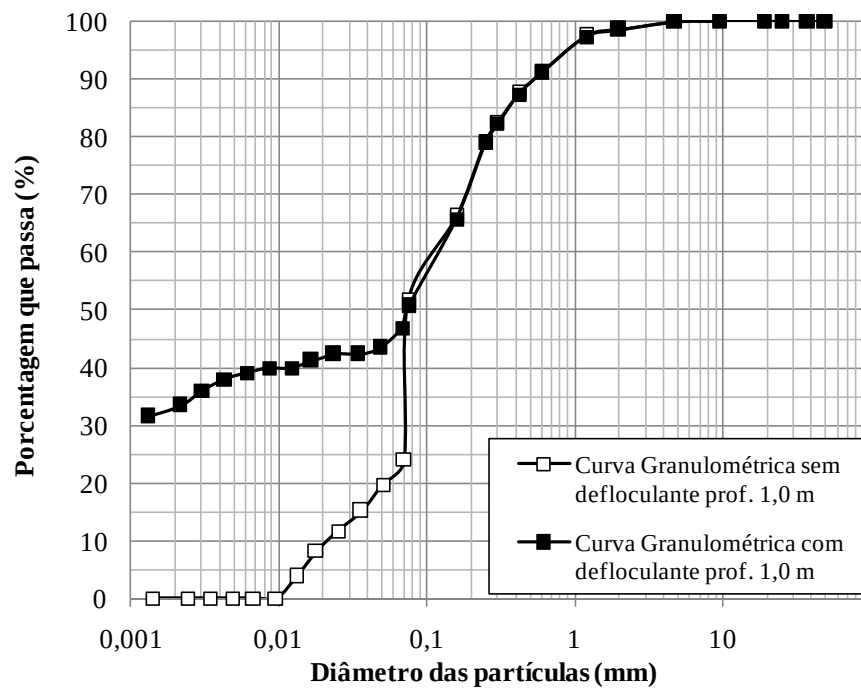


Figura A.6 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 1,0 m, com e sem o uso de defloculante

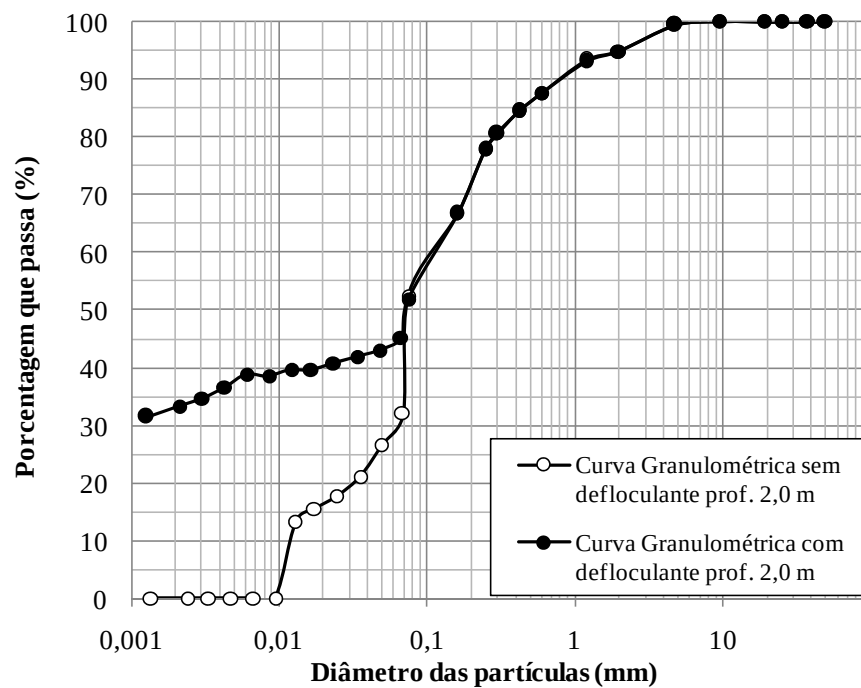


Figura A.7 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 2,0 m, com e sem o uso de defloculante

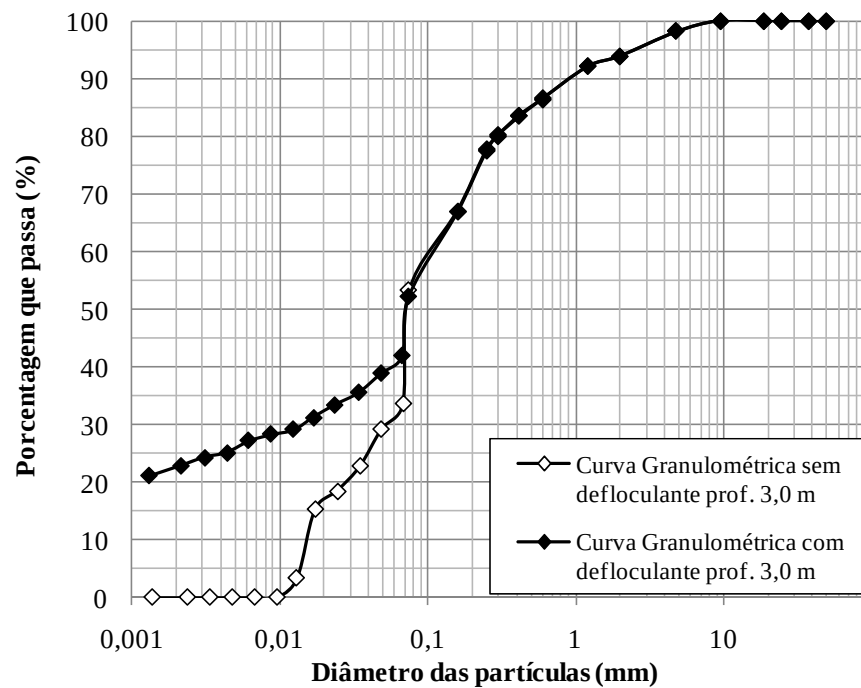


Figura A.8 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 3,0 m, com e sem o uso de defloculante

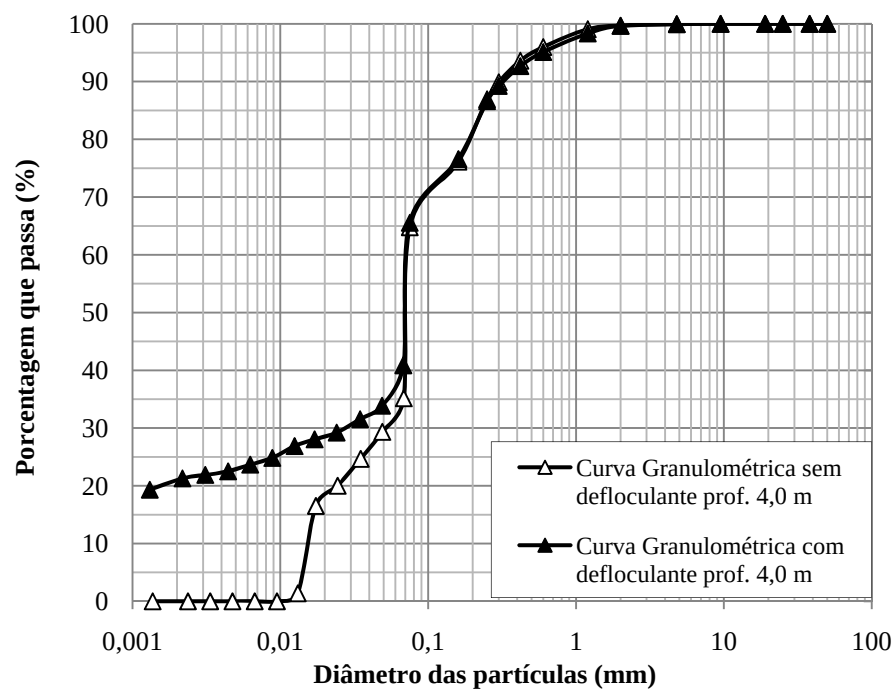


Figura A.9 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 4,0 m, com e sem o uso de defloculante

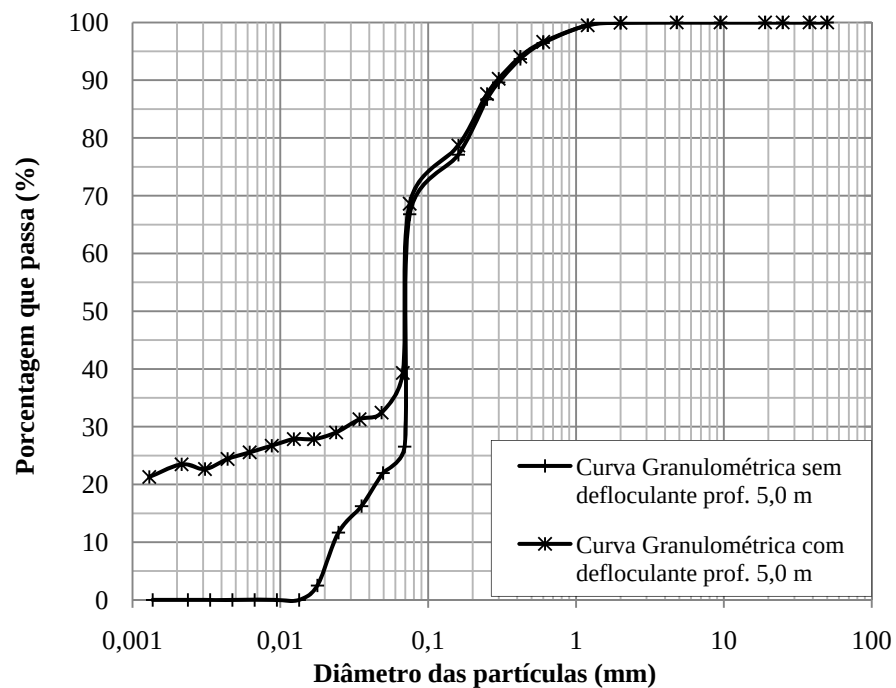


Figura A.10 – Curvas granulométricas da amostra do Poço 3, na profundidade de 5,0 m, com e sem o uso de defloculante

**APÊNDICE B – Difractogramas dos Poços 1 e 3, nas
profundidades de 1,0 a 5,0 m**

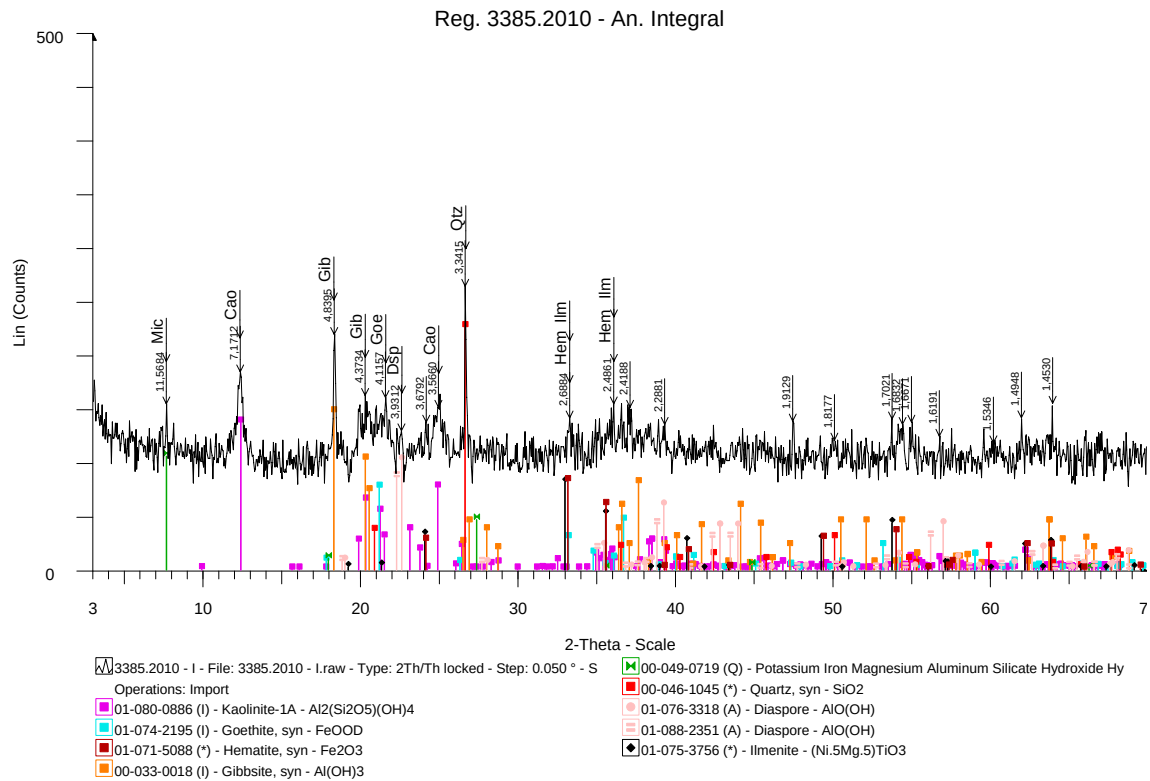


Figura B.1 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 1,0 m

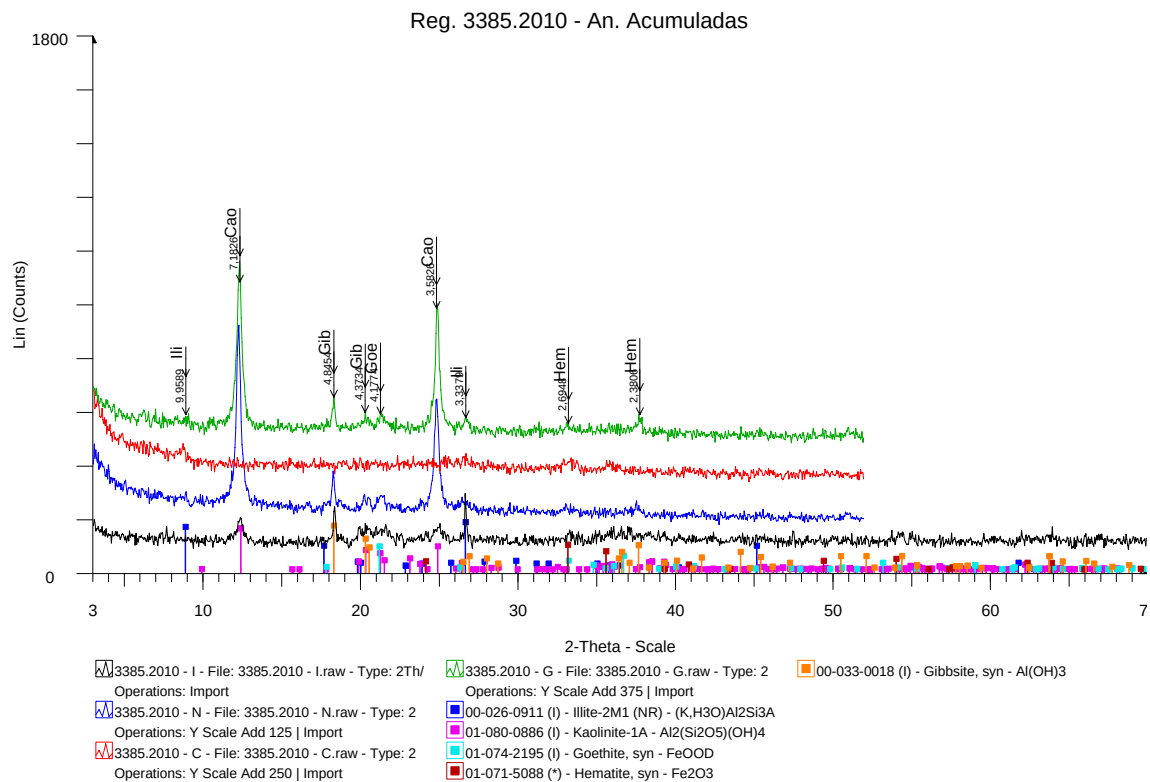


Figura B.2 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 1,0 m

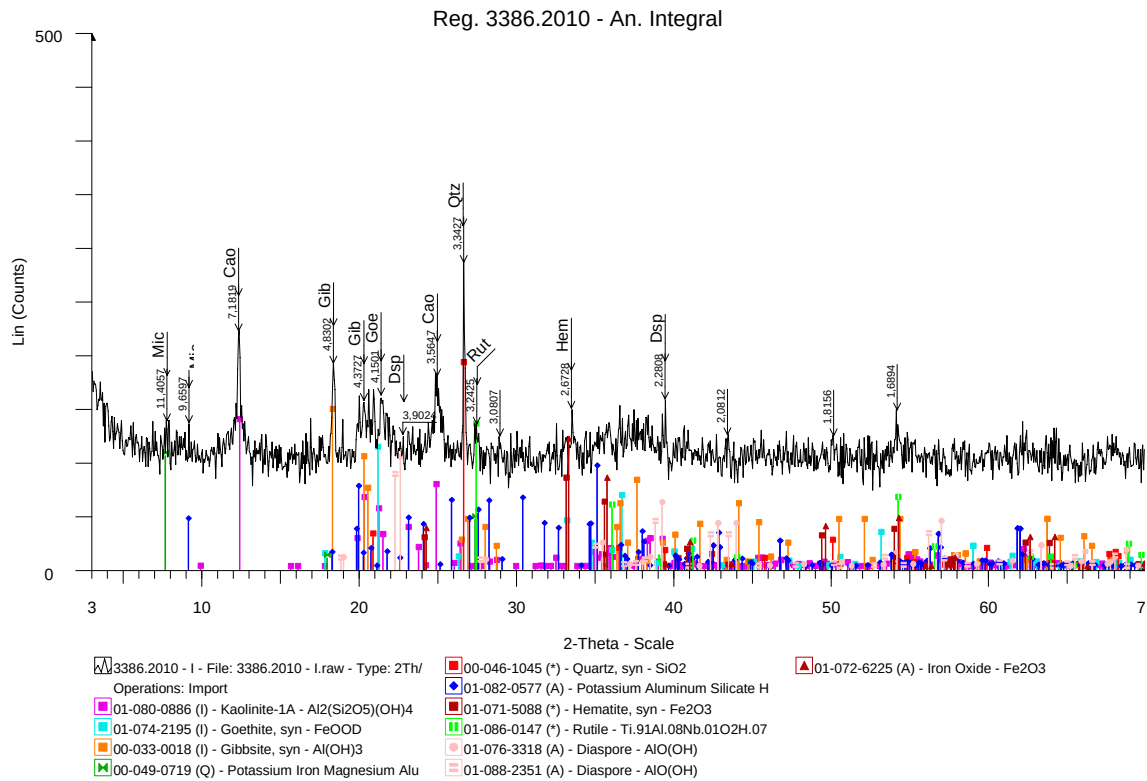


Figura B.3 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m

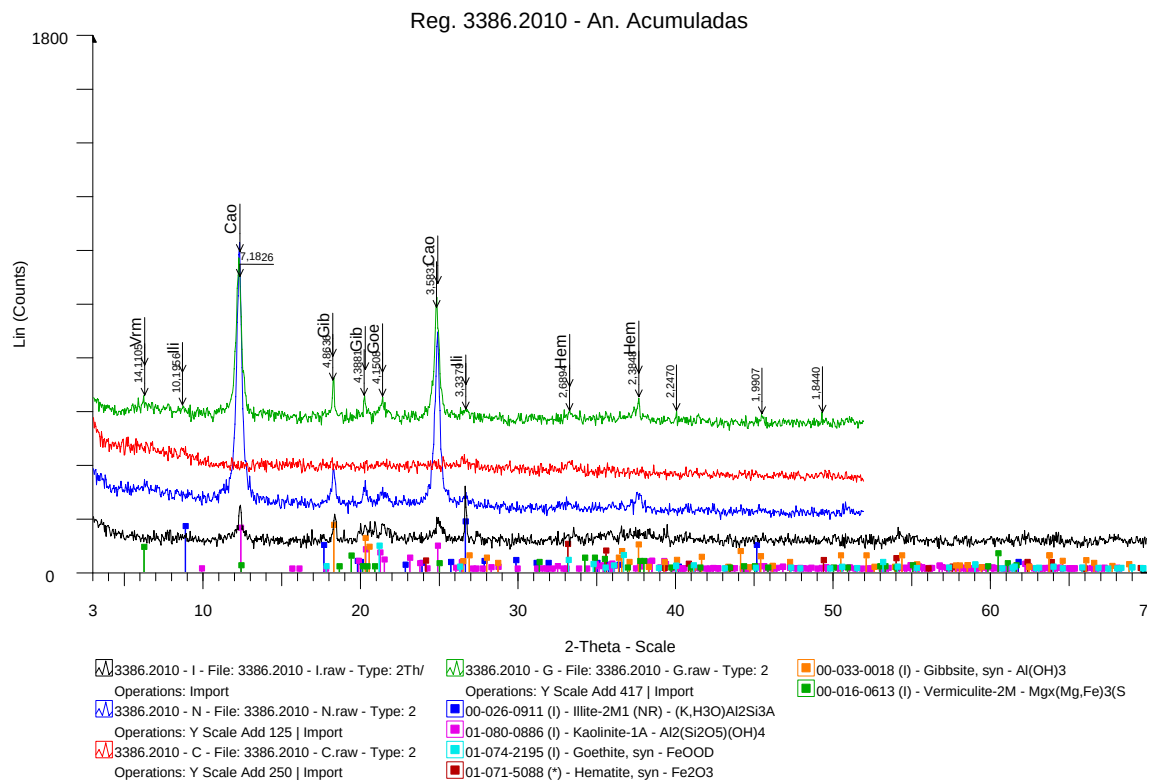


Figura B.4 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 2,0 m

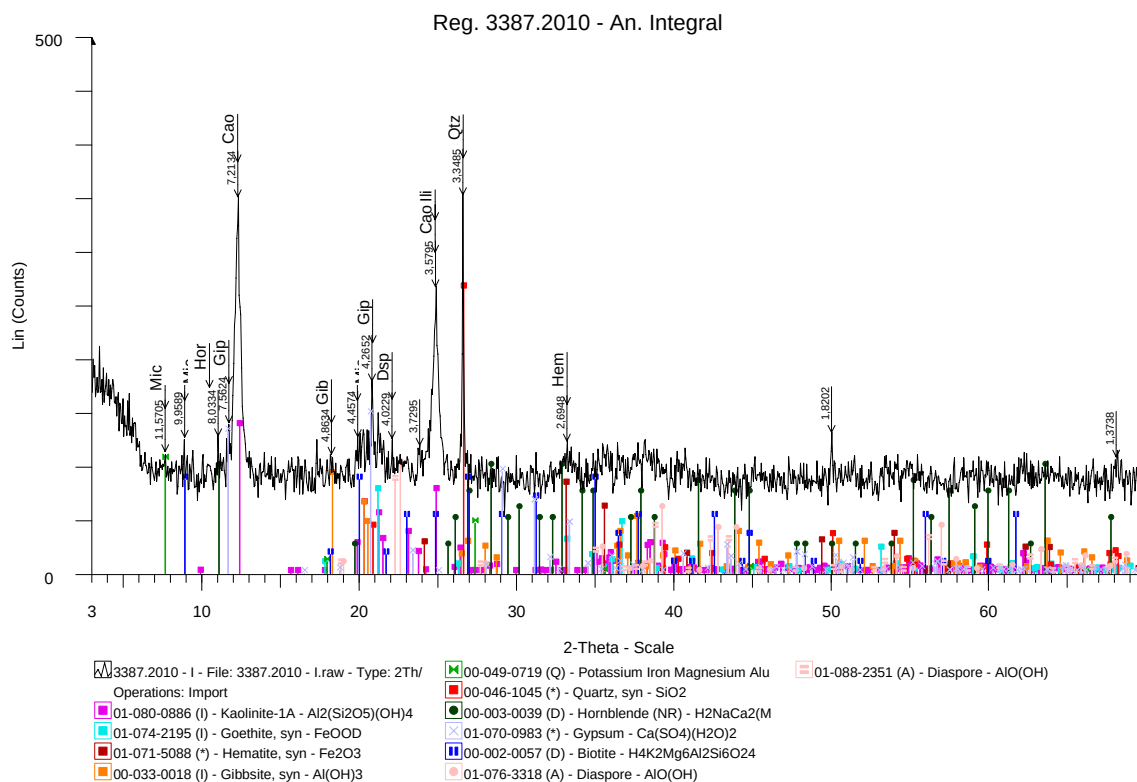


Figura B.5 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m

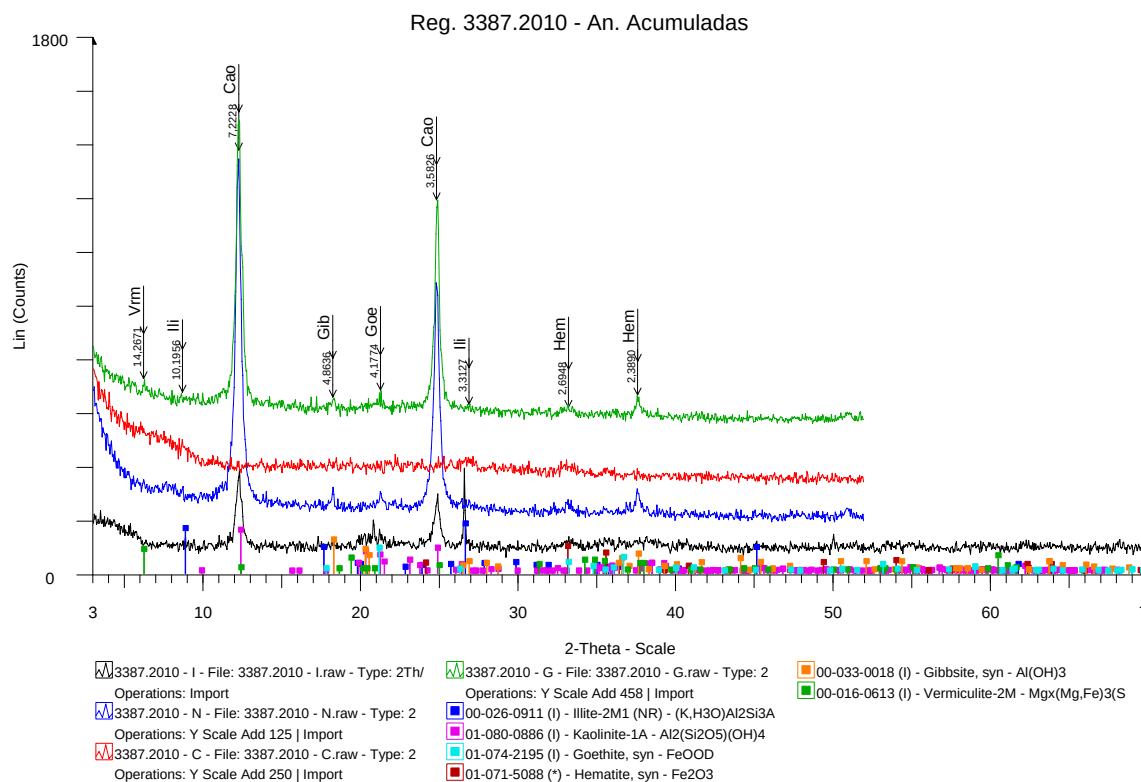


Figura B.6 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 3,0 m

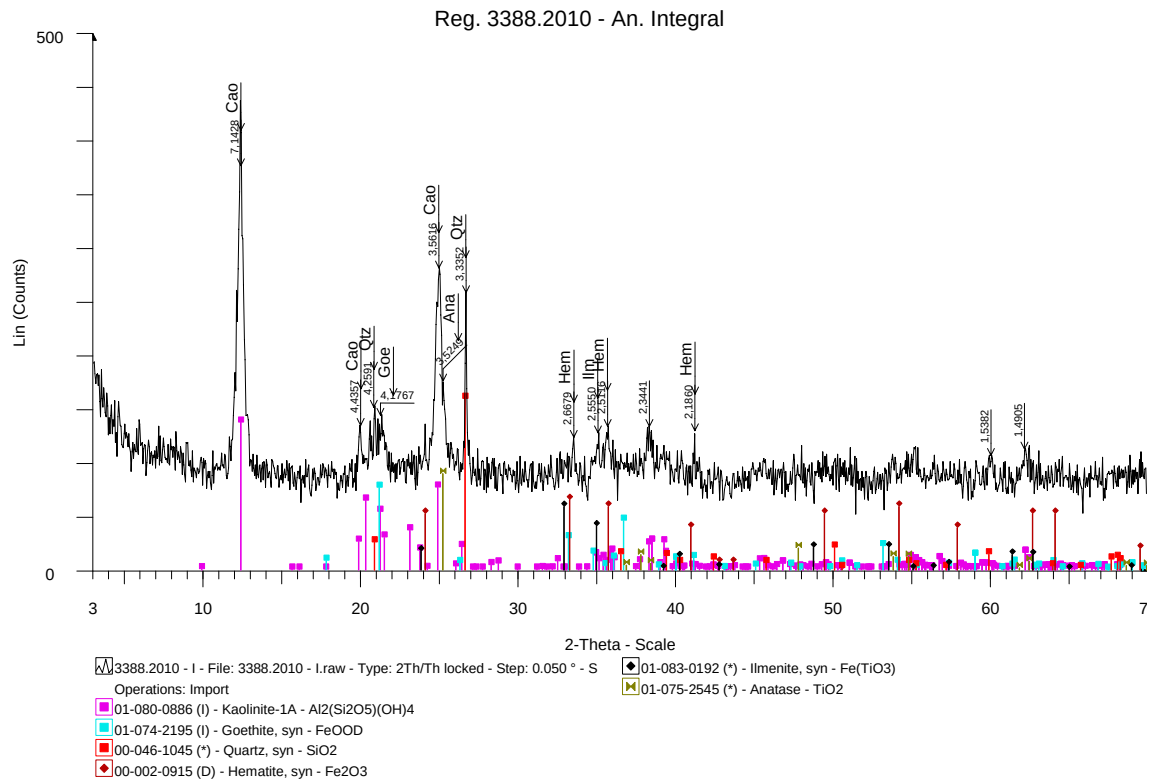


Figura B.7 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m

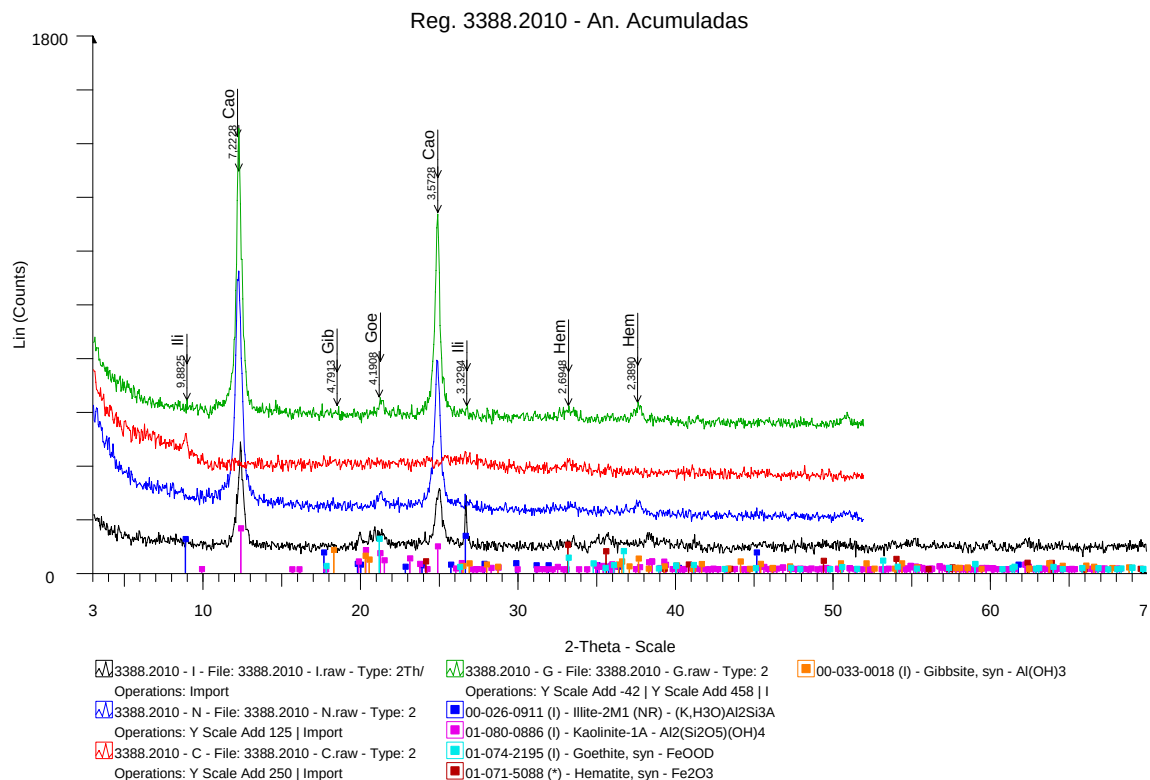


Figura B.8 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 4,0 m

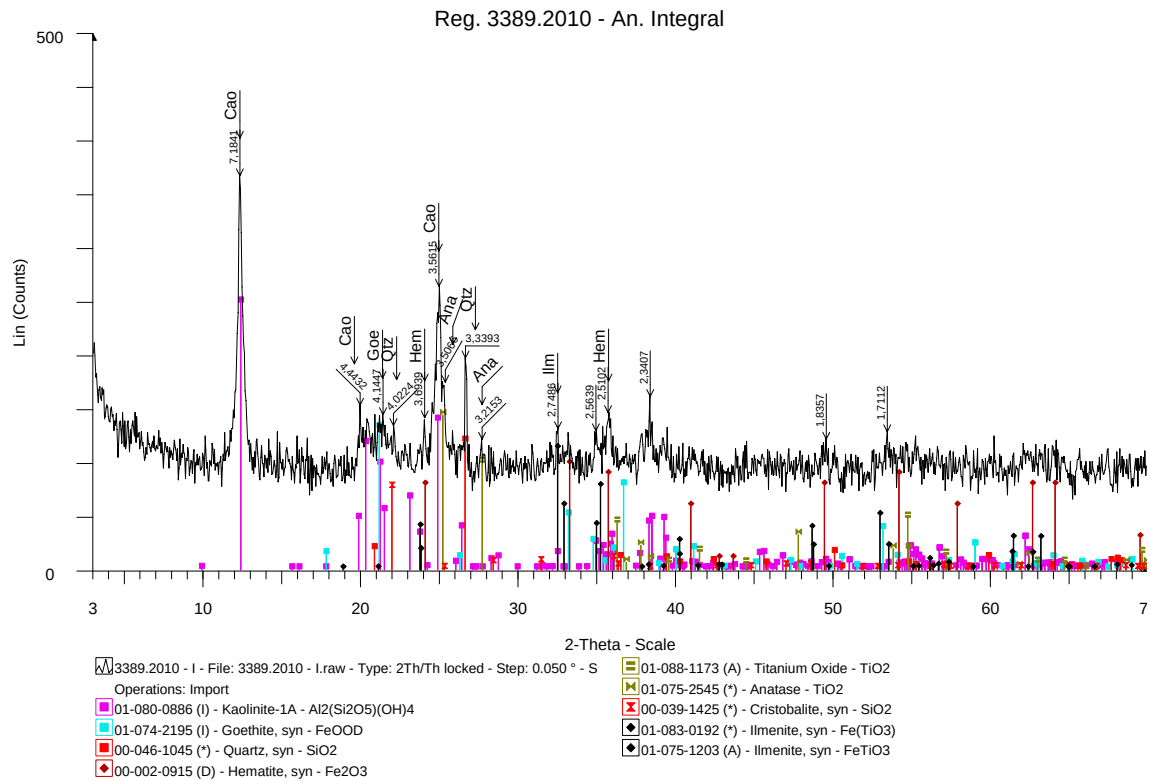


Figura B.9 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 1, na profundidade 5,0 m

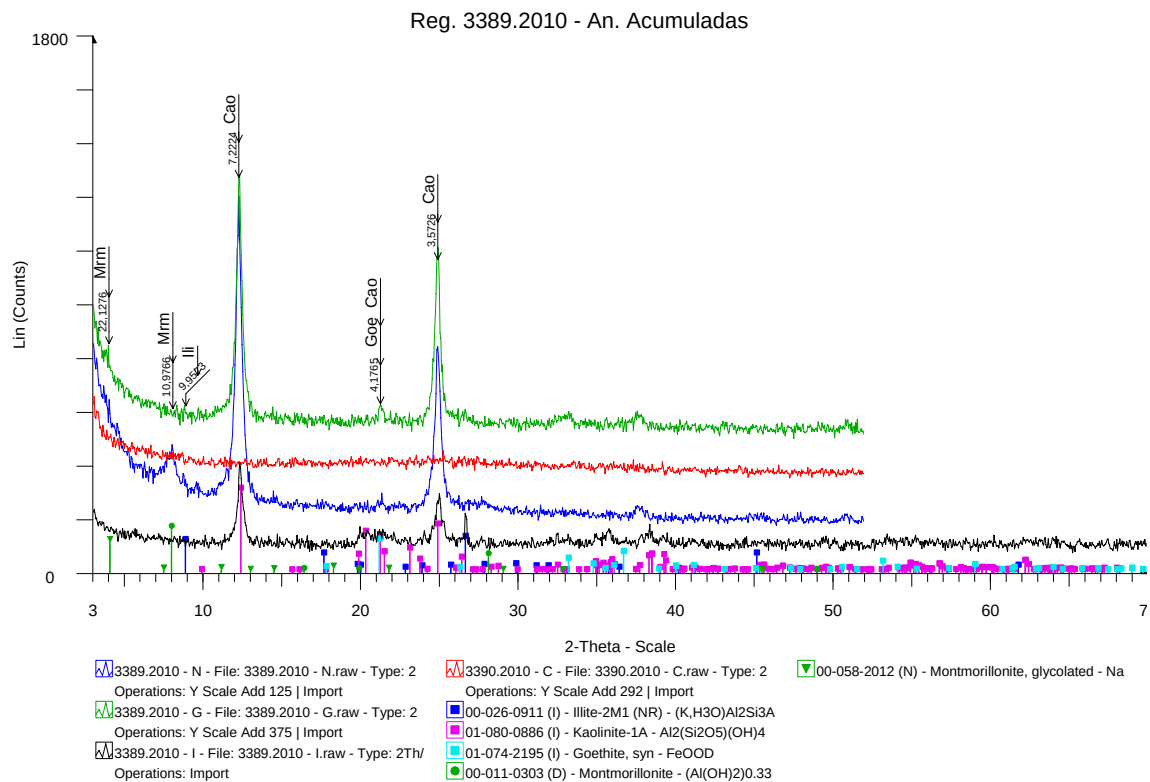


Figura B.10 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 1, na profundidade 5,0 m

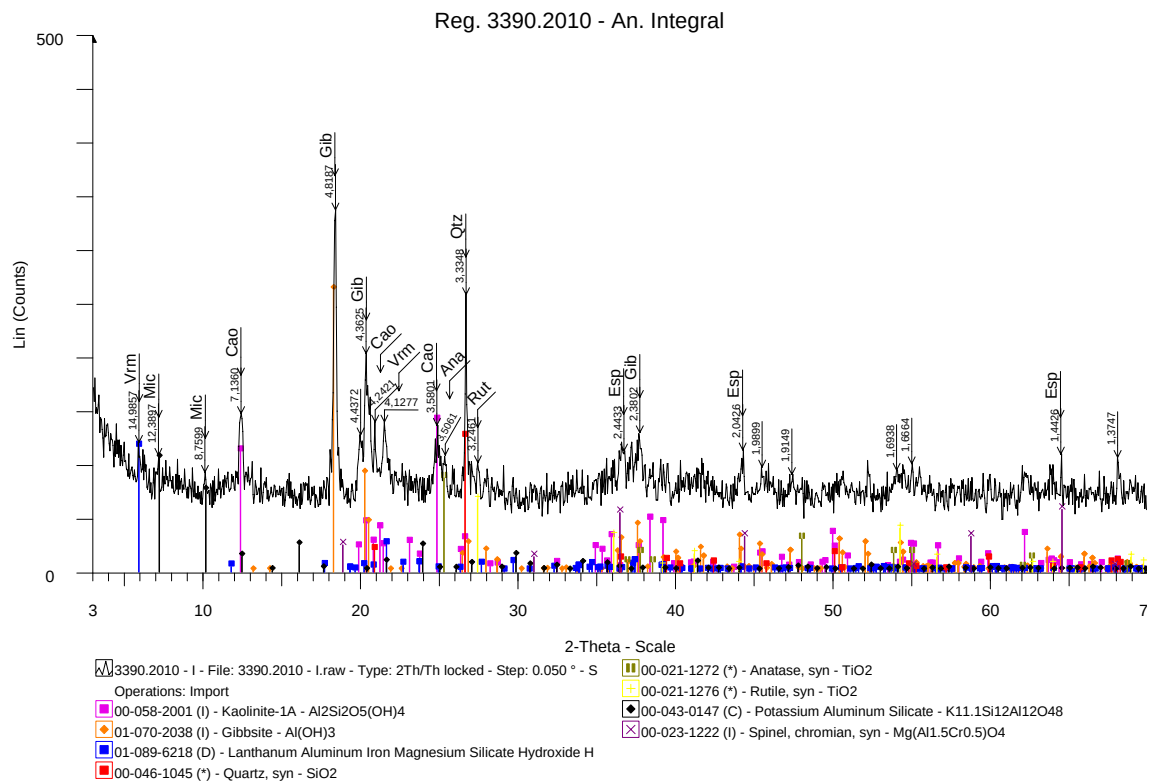


Figura B.11 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 1,0 m

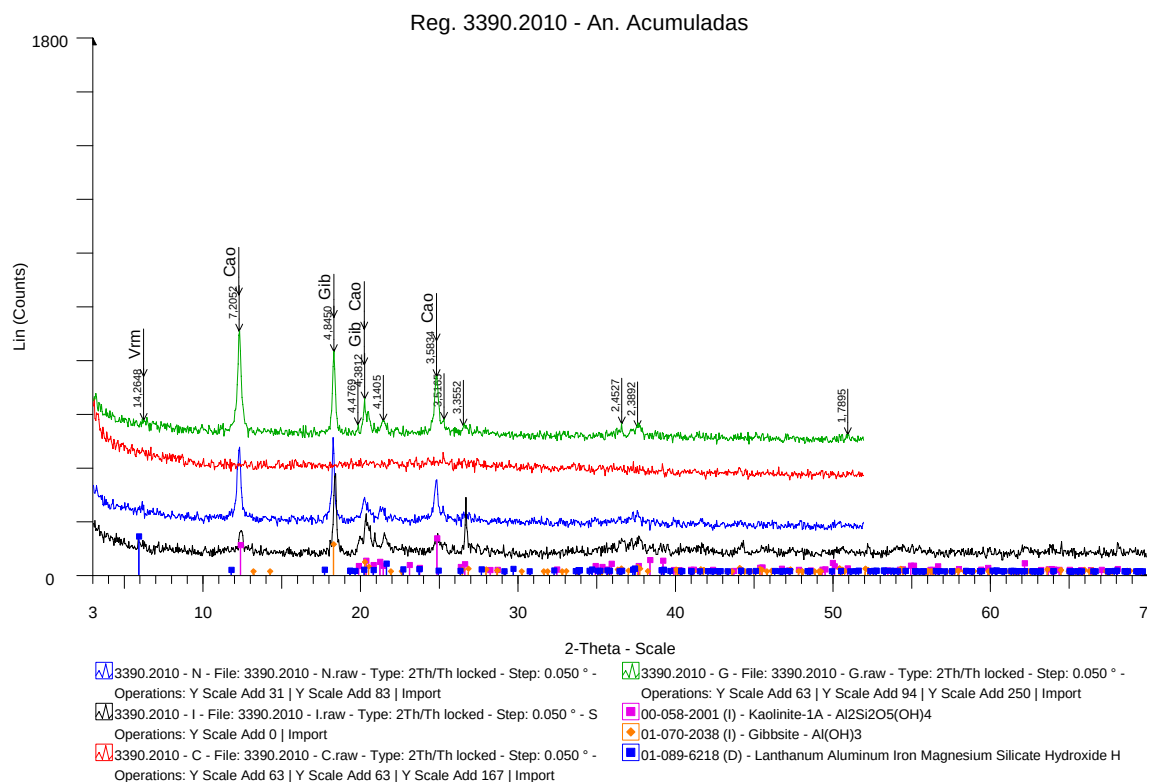


Figura B.12 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 1,0 m

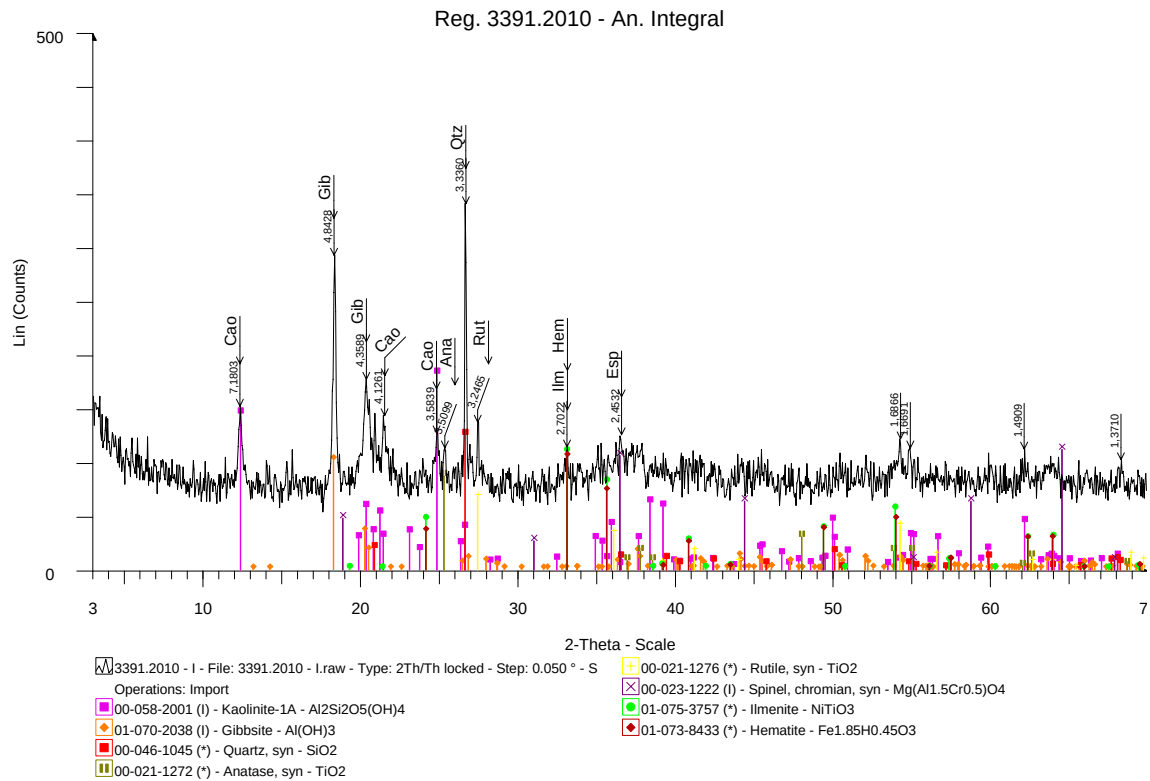


Figura B.13 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 2,0 m

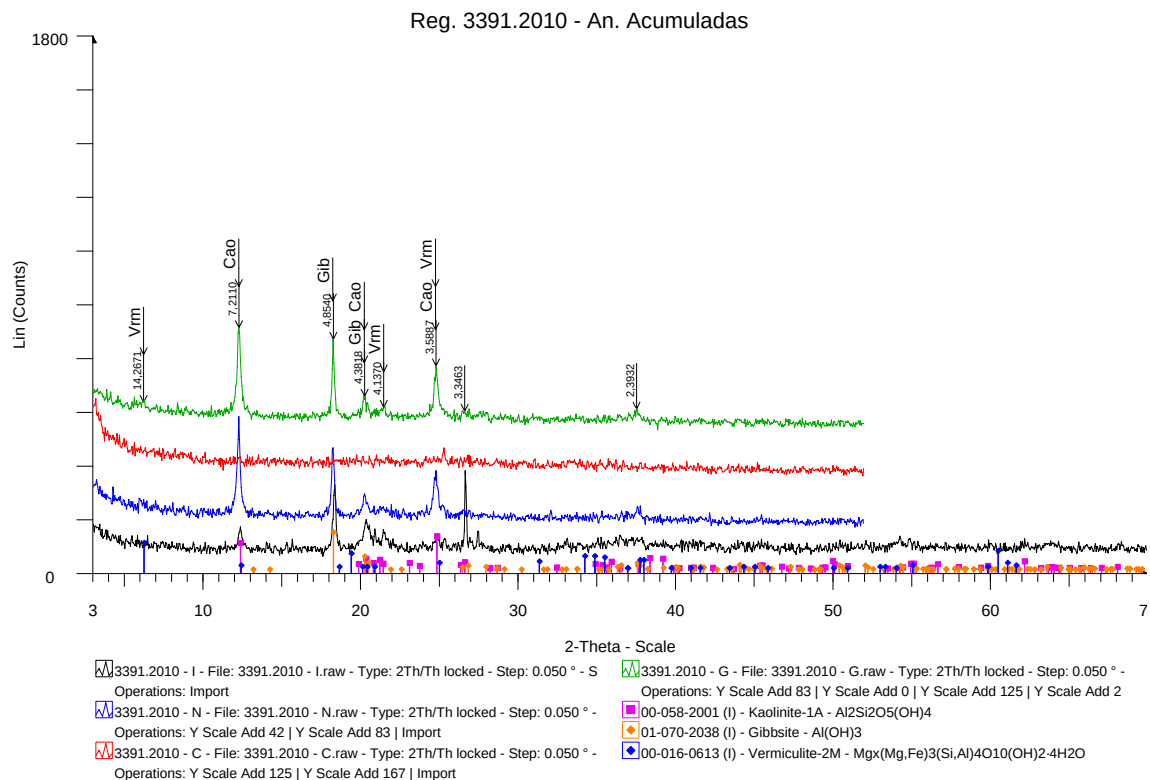


Figura B.14 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 2,0 m

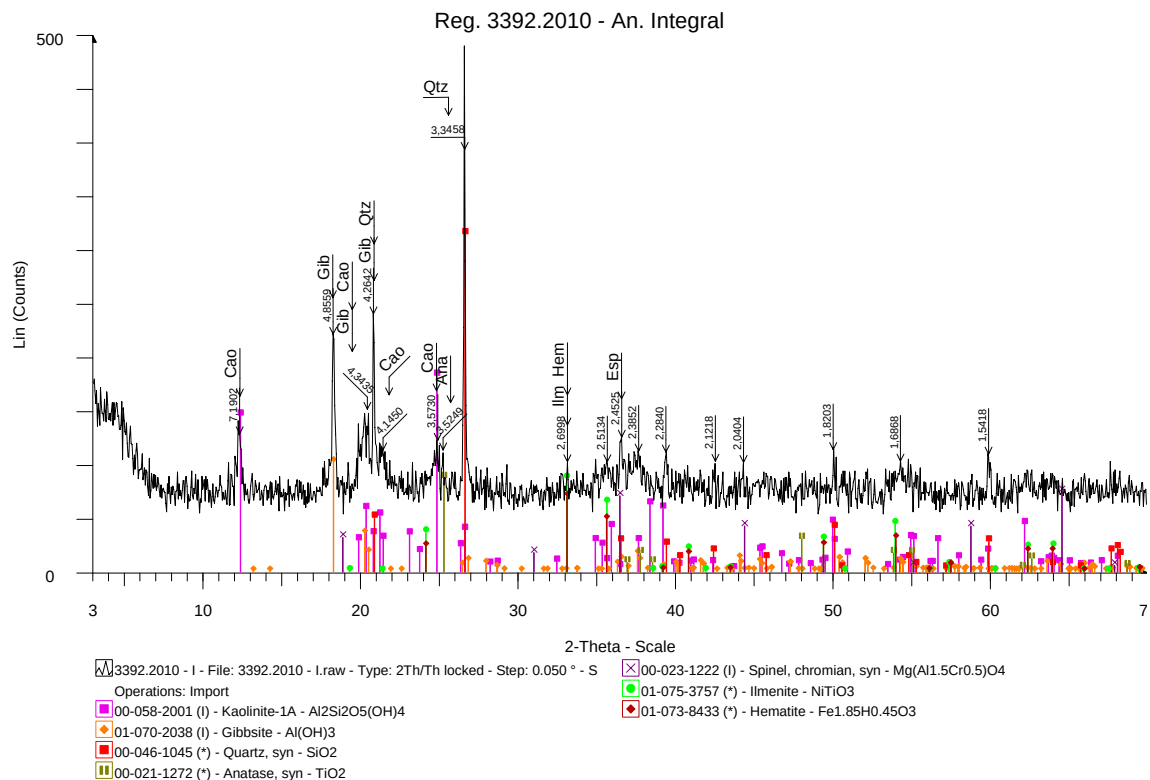


Figura B.15 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 3,0 m

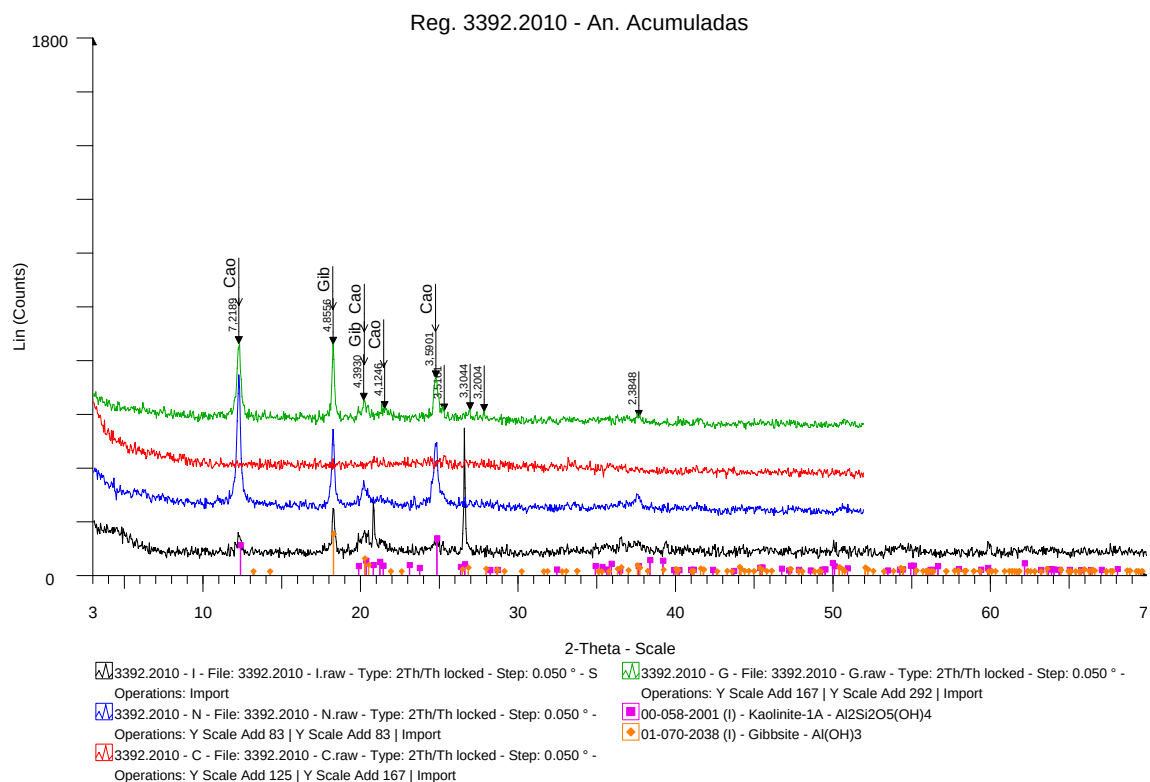


Figura B.16 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 3,0 m

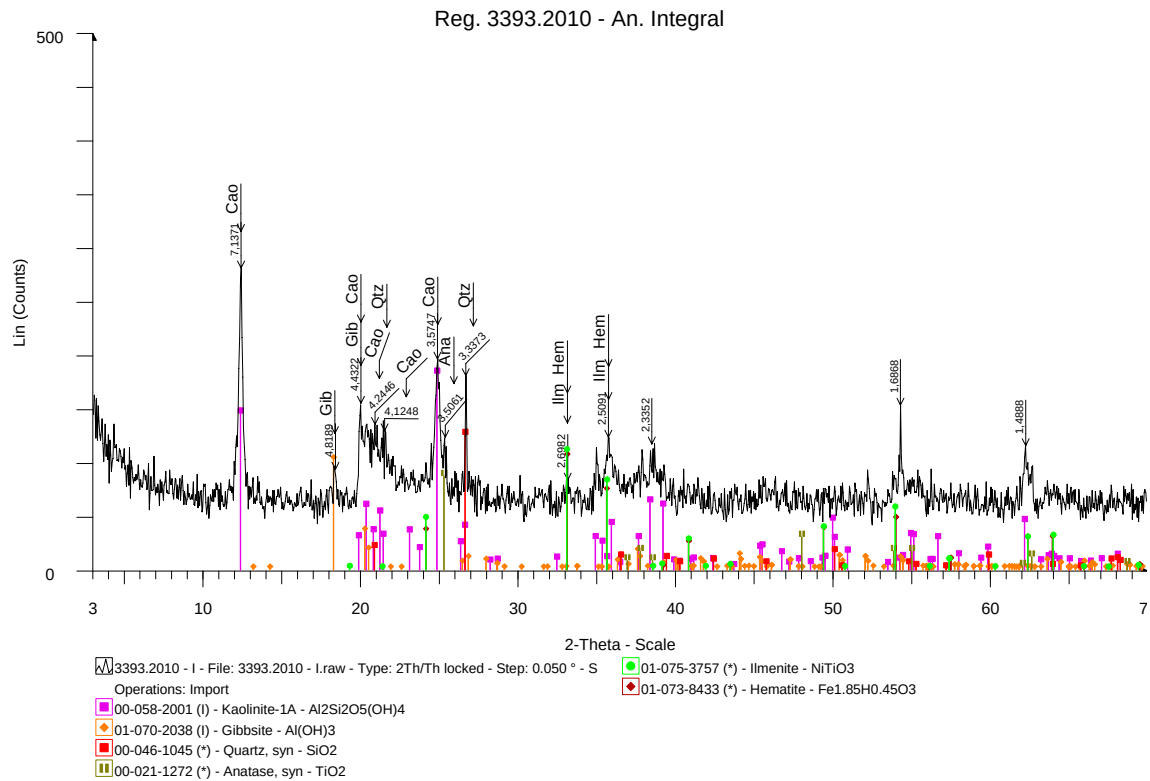


Figura B.17 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 4,0 m

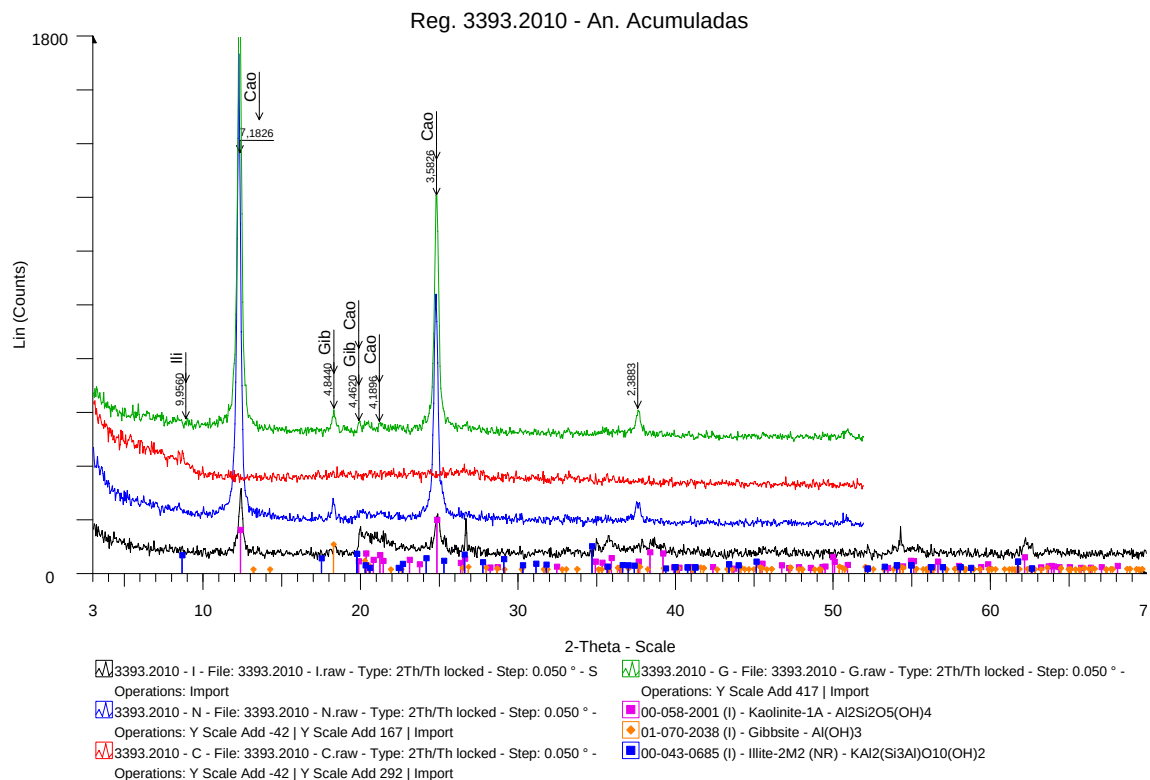


Figura B.18 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 4,0 m

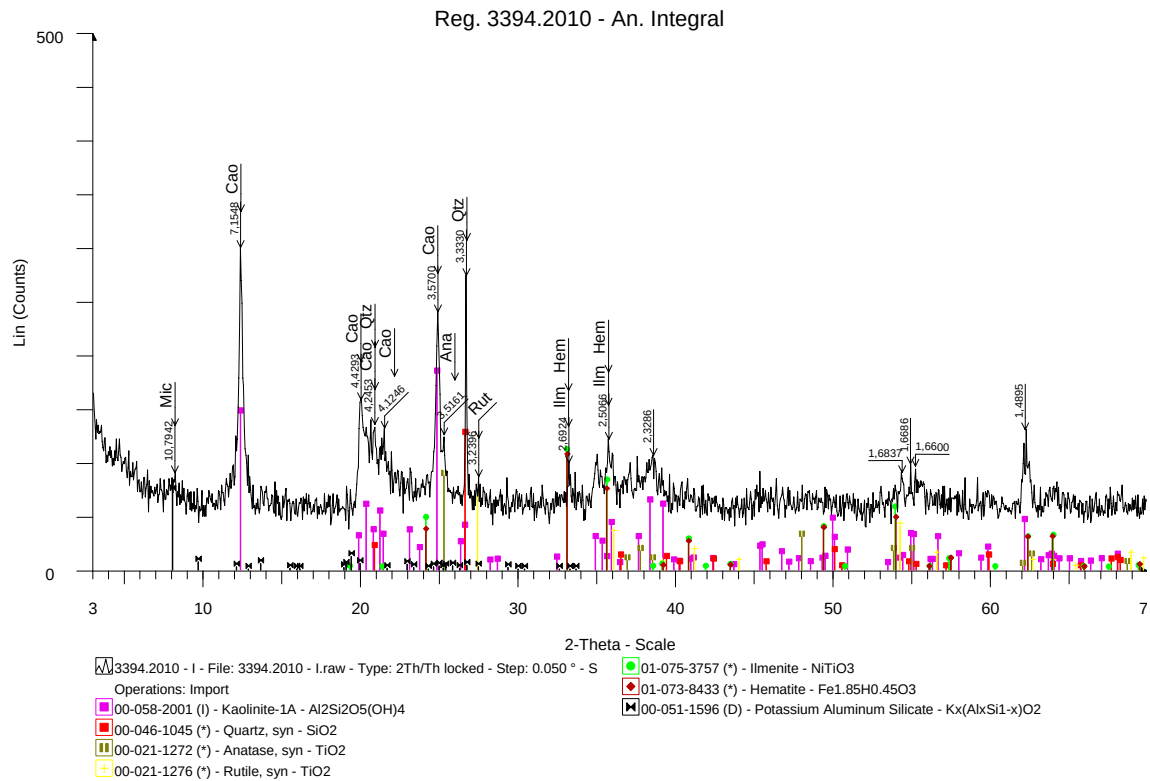


Figura B.19 – Difratoograma da análise integral da amostra do Poço 3, na profundidade 5,0 m

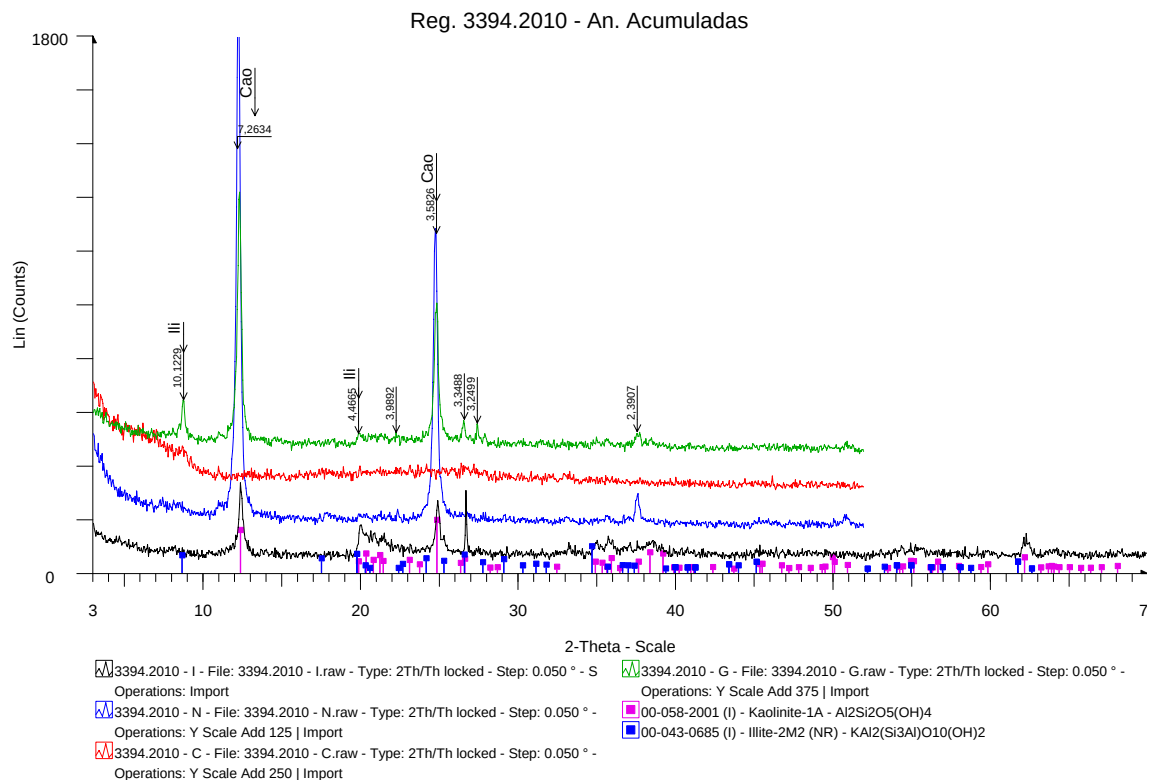


Figura B.20 – Difratoograma da análise acumulada da amostra do Poço 3, na profundidade 5,0 m