

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO UNIVERSAL PARA SOLOS
LATERÍTICOS APLICADA A TRÊS SOLOS DO NORDESTE BRASILEIRO**

Autor: Giovanna Feitosa de Lima

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Campina Grande – Paraíba

Maio de 2013

GIOVANNA FEITOSA DE LIMA

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande/PB, como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Orientador

Campina Grande, Maio de 2013

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande, PB, como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732a Lima, Giovanna Feitosa de.
Avaliação da eficácia da proposta de classificação universal para solos lateríticos aplicada a três solos do nordeste brasileiro / Giovanna Feitosa de Lima. -- 2013.
77 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues".
Referências.

1. Solos Lateríticos. 2. Classificação. 3. Pavimento de Baixo Custo. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Título.

CDU 624.12 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

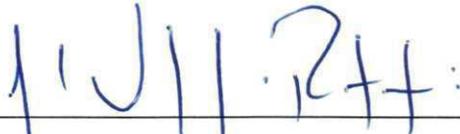
Autor: Giovanna Feitosa de Lima

Título: AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO UNIVERSAL PARA SOLOS
LATERÍTICOS APLICADA A TRÊS SOLOS DO NORDESTE BRASILEIRO

Dissertação defendida e aprovada em: / /

Banca Examinadora

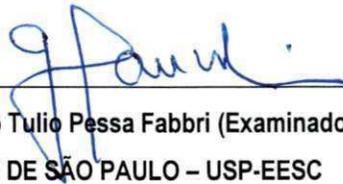
(Assinatura):



Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues (Orientador)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – LEP/DEC/CTRN/UFCG

(Assinatura):



Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri (Examinador Externo)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP-EESC

(Assinatura):



Prof(a). Dr(a). Ana Paula Furlan (Examinadora Externa)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP-EESC

(Assinatura):



Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena (Examinador Interno)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – LEP/DEC/CTRN/UFCG

DEDICATÓRIA

À minha querida Maria Feitosa, pelo amor incondicional que me dedicou. Tudo que conquisto dedico a ti, Maria.

Aos meus Pais, pelo esforço para me manter sempre estudando e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, Junior e Gabriella, pela convivência que edifica e pelas boas memórias que me fazem a pessoa que sou.

Ao Homem que me acompanha nesta árdua jornada há quase sete anos, dando força e principalmente me substituindo como pode, na criação das nossas meninas.

Às minhas meninas, Espuma, Loba, Ruiva e Ágatha, pelo carinho e dedicação que jamais encontrarei em outras patas.

Por fim, dedico este trabalho ao Sonho que jamais deixará de estar em construção, lembrando-me sempre que meu caminho é a luta interminável para alcançar um patamar mais alto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, como sempre faço em minhas orações, por cada dia que Ele me permite respirar e continuar lutando.

À minha família que me educou e ensinou os princípios que defendo hoje, me ama e me admira, me dá forças e principalmente, torce pelo meu sucesso. Pais, irmãos, tios, primos e o mais novo integrante do clã, Neto.

Ao meu Orientador Professor Dsc. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues pelo apoio e puxões de orelha, mas, sobretudo, pela paciência e compreensão. Admiro-o profundamente pelo seu brilhantismo e simplicidade, que arrasta pelo exemplo quem quer que o observe. Pouco delicado e muito sincero, contribuiu imensuravelmente para minha formação acadêmica e moral desde a graduação, em tempos remotos.

Ao Terceiro Batalhão de Engenharia de Construção do Exército Brasileiro pelos dois anos que me acolheu e me ensinou a viver. Ao soldado Amauri, pelo apoio nos ensaios iniciais. Ao amigo Welker, que não mediu esforços para ajudar, sempre, no que eu precisei.

À CAPES, pelo apoio financeiro no início da pesquisa.

Aos mestres que passaram em minha vida deixando sempre um pedacinho de contribuição, desde Tia Ana Luíza, professora do maternalzinho, Tia Dilma, que me alfabetizou, Tia Joelma que descobriu em mim uma apaixonada pela “matemática”, Professor Luiz Brito, que durante o EFII me guiou pelo caminho dos números, Professoras Carminha e Rejane, que muito me ensinaram a respeito da língua portuguesa e literatura, XyKu, Beja, Job, Ricardo, Gabriel, Toscano e todos que me preparam para o vestibular na jornada interminável de aulas, isoladas e aulões, durante o Ensino Médio e aos grandes sábios que conheci na Universidade Federal de Campina Grande, Janiro, Gledsneli, Afonso, William, Marco Aurélio, João Queiroz, e tantos outros que não fazem ideia de como influenciam as minhas escolhas e atitudes.

Aos que me ensinaram mais do que se pode aprender no livros: Irmã Maria José, Izilda Lopes, Socorro Vilarim e Rossane.

Aos parceiros do dia a dia, Jadilson e Miudinho, sem os quais não teria conseguido realizar tantos ensaios em tão pouco tempo. Agradeço pelo sorriso sincero e pela força, bruta e moral.

A todos que fazem o LEP, principalmente Arimatéia, Professora Leda, Professor Adriano e Professora Ana, pelos pequenos grandes apoios prestados.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais, na pessoa do Professor Romualdo, de quem recebi atenção e colaboração as quais jamais serei capaz de agradecer suficientemente.

Aos grandes Washington e Willame, pelo sorriso com que me receberam em minha passagem pela bela Aracaju.

Aos funcionários do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, principalmente a Josete, pelo apoio e atenção com que sempre tratou todas as minhas necessidades.

Ao meu Chefe e Amigo Sr Capitão Queiroz, pelo incentivo e apoio durante todo o período em que estive ligada às atividades desta pesquisa.

À minha companheira de trabalho, lutas e glórias, Larissa Santana Batista que me alfinetou e incentivou nos momentos de maior dificuldade, torcendo e vibrando a cada pequena conquista, confiando e acreditando no meu potencial. Parceira.

À minha amiga Maria Adriana, por todo o apoio. Amigos são os irmãos que a vida nos permitiu escolher.

À minha fiel escudeira Branca, que tomou conta, bravamente, da minha casa e da minha família enquanto eu estive fora, alimentando e mimando as minhas meninas.

Ao meu mais que amado namorado, Edson Alves de Jesus, que mesmo com todas as dificuldades inerentes ao ser masculino, dedicou-se a substituir-me nas tarefas mais rotineiras, consertando portas, fazendo feira e mimando nossas meninas. Se esforçando também para fazer com que cada um dos dias que passamos separados fosse menos um, na contagem para alcançarmos nossos objetivos.

Às minhas meninas: Espuma, que entrou na minha vida pra me ajudar a sair de uma fase difícil e se tornou minha alegria de viver; Loba, que chegou Morena e tomou conta do meu namorado, da minha cama e do meu coração; Ruiva, que me conquistou, minha réplica em grosseria e falta de jeito para demonstrar carinho e, por fim, Ágatha PataLarga, que chegou para consolidar o sonho de ter um Canil. Sem esquecer dos que não estão mais no dia-a-dia, mas que me afagaram em momentos diversos: Artaud, Lua e Kani. Minha paixão.

À Tia Lu e Cris, pelo teto, cama quente, comida boa e conversas agradáveis na fase final desta dissertação.

A todos os amigos que em algum momento foram fonte de conforto e descontração nesses dois últimos anos de muito trabalho, pouco tempo e grandes responsabilidades.

RESUMO

A Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010) a partir de estudos das experiências brasileiras, portuguesas, francesas, indianas, australianas e de diferentes países de clima tropical e subtropical associados a parâmetros ligados, em parte, à granulometria, à textura, à mineralogia os quais são preponderantes sobre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais tem por objetivo o uso racional destes materiais. Os autores classificam os Solos Lateríticos para fins de construção de estrutura de rodovias de baixo custo como sendo: Solos Lateríticos Pedregulhosos, Solos Lateríticos Arenosos e Solos Lateríticos Finos. Este trabalho tem como objetivo verificar a eficácia da Classificação proposta a partir de um estudo de caso com três solos brasileiros que se pressupõem serem Solos Lateríticos. Os resultados indicam que as amostras estudadas podem ser classificadas como sendo Solos Lateríticos Arenosos e que a proposta constitui um procedimento adequado para indicar o uso racional e efetivo de Solos Lateríticos como material de camadas de pavimentos flexíveis de baixo volume de tráfego.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Lateríticos, Classificação, Pavimentos de baixo custo.

A B S T R A C T

The methodology of classification of Lateritic Soils proposed by Rodrigues et al (2010) from studies of Brazilian, Portuguese, French, Indian, and Australian experiences, as well as of other countries having tropical and sub-tropical climates, associated to parameters related partially to granulometry, texture, mineralogy, which are remarkable over mechanic and physical properties of those materials, having as an aim rational usage of those materials. The authors classify Lateritic Soils targeting highway structure construction with low costs as: Lateritic Rocky Soil, Lateritic Sandy Soil and Lateritic Thin Soil. This work has got as its aim to checklist the Classification efficiency proposed from a case study with three Brazilian soils which are seen as Lateritic Soils. The results indicate that the studied samples can be classified as being Lateritic Sandy Soils, and the proposal concerns on an adequate procedure to get to a rational and affective usage of Lateritic Soils as material to flexible paving layers with low traffic flow.

KEYWORDS: Lateritic Soils, Classification, Low cost paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Marco comemorativo erguido pela Geological Survey of Inde em Angadipuram (Buchanan Memorial) [Fonte: Rodrigues et al., 2010].....	6
Figura 2.2 - Distribuição dos Solos Lateríticos (Ferrasols) no mundo (FAO, 2006) [Adaptado por Rodrigues et al., 2010].....	9
Figura 2.3 - Solos Lateríticos do Brasil e Guiana Francesa [Fonte: Rodrigues et al., 2010]	9
Figura 2.4 - Resultados de um ensaio sobre os Solos Lateríticos Arenoso Fino do Nordeste do Brasil (a) Difração de Raios - X (b) MEV [Fonte: Quintans, 2008]	11
Figura 2.5 - Variabilidade dos valores de LL e IP: IPT / SP/ Brasil [Fonte: Villibor et al., 2009]	15
Figura 2.6 - Atividades de argilominerais dos Solos Lateríticos em função da porcentagem de argila e do valor de Azul de Metileno [Fonte: FABBRI, 1994]	15
Figura 2.7 - Fissuras em rodovias construídas com Solos Lateríticos Finos [Fonte: Quintans, 2008].....	16
Figura 2.8 - Dureza dos elementos pedregulhosos em função de seus pesos específicos [Fonte: LYON ASSOCIATES INC. 1971].....	17
Figura 2.9 - Estudos da forma de realizar o ensaio de CBR adaptado ao clima do Sahara [Fonte: Alcock, 1950].	19
Figura 3.1 – Jazida C – Rio Grande do Norte [Fonte: Quintans, 2008]	28
Figura 3.2 – Jazida RC – Região Metropolitana de Recife – Praia de ITAPUAMA [Fonte: Google Earth]	29
Figura 3.3 – Jazida PIC – Região as margens da BR 316 [Fonte: Google Earth]	30
Figura 3.4 – Quarteamento de Amostra para Ensaio.....	31
Figura 3.5 – Série de Peneiras e curva granulométrica.....	32
Figura 3.6 - Proposta de Classificação Universal dos Solos Lateríticos para utilização em camadas de rodovias de baixo custo em países de clima tropical e subtropical [Fonte: Rodrigues et al., 2010].....	41
Figura 3.7 - Espectrômetro modelo EDX-720 da Shimadzu.....	42
Figura 3.8 - Difratorômetro Shimadzu XRD-6000	43
Figura 3.9 - MEV SHMADZU SSX-550.....	44
Figura 3.10 – Preparação da amostra – metalização à ouro.....	44
Figura 3.11 – Ensaio de Friabilidade da Fração Arenosa.....	46
Figura 3.12 – Ensaio de Limite de Contração.....	47
Figura 3.13 – Ensaio de Compactação.....	48
Figura 3.14 – Ensaio de CBR	49
Figura 3.15 – Módulo de Resiliência – preparação da amostra - UFS	50
Figura 3.16 – Módulo de Resiliência –preparação e execução do ensaio - UFS	50
Figura 4.1 – Curva Granulométrica da Amostra C.....	51
Figura 4.2 – Curva Granulométrica da Amostra RC	52
Figura 4.3 – Curva Granulométrica da Amostra PIC	52
Figura 4.4 – Difração de Raio-X Amostra C.....	55
Figura 4.5 – Difração de Raio-X Amostra RC.....	55

Figura 4.6 – Difração de Raio-X Amostra PIC	56
Figura 4.7 – Difração de Raio-X Amostras C, RC e PIC.....	56
Figura 4.8 - Difração de raios-x Difração de Raio-X Amostra C [Obtida por Quintans, 2008]	57
Figura 4.9 – Microfotografias da Amostra C	58
Figura 4.10 – Microfotografias da Amostra RC.....	58
Figura 4.11 – Microfotografias da Amostra PIC	59
Figura 4.12 – Adsorção de Azul de Metileno Amostras a) C, b) RC e c) PIC	60
Figura 4.13 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra C.....	61
Figura 4.14 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra RC	62
Figura 4.15 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra RC	62
Figura 4.16 – Curvas de compactação do solo nas energias normal, intermediária, intermodificada I, intermodificada II e modificada [Fonte: Quintans, 2008].....	62
Figura 4.17 – Valor de CBR para a Amostra C, pelas normas brasileira e francesa	63
Figura 4.18 – Valor de CBR para a Amostra RC, pelas normas brasileira e francesa	63
Figura 4.19 - Valor de CBR para a Amostra PIC, pelas normas brasileira e francesa	64
Figura 4.20 – Rompimento dos corpos de prova durante a fase de preparação para o ensaio de Módulo de Resiliência	65
Figura 4.21 – Amostra C - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)....	67
Figura 4.22 – Amostra RC - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010) .	68
Figura 4.23 – Amostra PIC - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Distribuição dos tamanhos das partículas do solo Norma Brasileira e Francesa	53
Tabela 4.2 – Limites de Liquidez e Plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras do solos estudados	53
Tabela 4.3 – Constituintes químicos das amostras dos solos estudados – Análise Química Convencional	54
Tabela 4.4 – Constituintes químicos das amostras dos solos estudados - Espectrometria	54
Tabela 4.5 – Coeficiente de Friabilidade da fração Arenosa	60
Tabela 4.6 – Limite de Retração/Contração	61
Tabela 4.7 – Valores de CBR para as amostras de solos estudadas.....	64
Tabela 4.8 – Parâmetros de Compactação e Graus de Compactação obtidos na moldagem	65
Tabela 4.9 – Modelos utilizados para a representação do Módulo de Resiliência	66
Tabela 4.10 – Parâmetros Obtidos no Ensaio Triaxial Dinâmico (Módulo de Resiliência)	66
Tabela 4.11 – Parâmetros para Classificação Universal para Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)	67
Tabela 4.12 – Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)	69

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 3.1 – Sequência de atividades realizadas durante a pesquisa	27
Fluxograma 3.2 - Critérios de proposição de classificação dos Solos Lateríticos [Fonte: Rodrigues et al., 2010]	34
Fluxograma 3.3 - Critérios, as denominações e os parâmetros de classificação dos Solos Lateríticos [Fonte: Rodrigues et al., 2010].....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association Of State Highway And Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Material
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CETEB	Centre Experimental Du Batiment et de Travaux Publics
DG	Coeficiente de Degradabilidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DRX	Difratometria de Raio-X
EDX	Espectroscopia de Raio-X
FR	Coeficiente de Fragmentação
FS	Coeficiente de Friabilidade
GTR	Guide de Terrassement Routiers
HRB	Highway Research Board
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISC	Índice de Suporte Califórnia
ISTED	Institut des Sciences et des Techniques de l'Equipement et de l'Environnement pour le Developpement
LC	Limite de Contração
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LL	Limite de Liquidez
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
M_R	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
SIEMBS	Sistema Integrado de Ensaios para Misturas Betuminosas e Solos
SLAA	Solo Laterítico Arenoso Argiloso
SLAS	Solo Laterítico Arenoso Siltoso
SLFA	Solo Laterítico Fino Argiloso
SLFS	Solo Laterítico Fino Siltoso
SLPB	Solo Laterítico Pedregulhoso de Boa Qualidade
SLPF	Solo Laterítico Pedregulhoso de Fraca Qualidade
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
UNESP	Universidade de São Paulo
USC	The Unfield Soil Classification System
VBS	Valeur de Bleu du Sol

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS.....	3
1.1.1	<i>Geral</i>	3
1.1.2	<i>Específicos</i>	3
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	INTRODUÇÃO	4
2.2	O PROCESSO DE LATERIZAÇÃO E OS FATORES DE INFLUÊNCIA	7
2.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICRO-ESTRUTURAL DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	10
2.4	HISTÓRICO DOS PARÂMETROS PEDOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS UTILIZADOS PARA CLASSIFICAR OS SOLOS LATERÍTICOS	11
2.4.1	<i>Morfologia e as denominações dos Solos Lateríticos</i>	11
2.4.2	<i>Granulometria</i>	12
2.4.3	<i>A Plasticidade</i>	14
2.4.4	<i>A Dureza</i>	16
2.5	OUTROS PARÂMETROS QUE DEVEM SER LEVADOS EM CONTA EM OBRAS	17
2.5.1	<i>Características de compactação</i>	17
2.5.2	<i>Características de capacidade de suporte</i>	18
2.5.3	<i>Comportamento elastoplástico</i>	19
2.6	MELHORAMENTO DO COMPORTAMENTO DOS SOLOS LATERÍTICOS	21
2.6.1	<i>Estabilização granulométrica dos Solos Lateríticos</i>	21
2.6.2	<i>Estabilização dos Solos Lateríticos com Cal</i>	22
2.6.3	<i>Estabilização dos Solos Lateríticos com cimento</i>	23
2.7	ESTUDOS DA UFCG SOBRE SOLOS LATERÍTICOS RELACIONADOS AO TEMA DA PESQUISA	24
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS	28
3.1.1	<i>Localização das Jazidas</i>	28
3.1.2	<i>Coleta de Amostras</i>	30
3.1.3	<i>Determinação das Propriedades Físicas</i>	30
3.2	MÉTODOS	32
3.2.1	<i>Metodologia da Classificação</i>	32
3.2.2	<i>Determinação dos Argilominerais e dos Constituintes Químicos</i>	42
3.2.3	<i>Determinação das Propriedades de Estado e Mecânicas</i>	44

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	51
4.2	DETERMINAÇÃO DOS ARGILOMINERAIS E DOS CONSTITUINTES QUÍMICOS	53
4.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTADO E MECÂNICAS	59
4.3.1	<i>Adsorção de Azul de Metileno.....</i>	<i>59</i>
4.3.2	<i>Coefficiente de Friabilidade</i>	<i>60</i>
4.3.3	<i>Limite de Contração</i>	<i>60</i>
4.3.4	<i>Compactação</i>	<i>61</i>
4.3.5	<i>Índice de Suporte Califórnia – CBR</i>	<i>63</i>
4.3.6	<i>Módulo de Resiliência – MR</i>	<i>64</i>
4.3.7	<i>Classificação dos solos estudados</i>	<i>66</i>
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS	70
5.1	CONCLUSÕES	70
5.2	SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS	71
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A determinação das propriedades geotécnicas dos solos utilizados em pavimentação é de fundamental importância para o conhecimento do seu comportamento estrutural quando compactado. Estas, por sua vez, estão relacionadas à região, ao tipo de clima, a topografia, a vegetação e ao tempo de formação dos solos.

A busca de materiais que se adaptem às especificações vigentes representa um complexo problema que desafia os órgãos rodoviários. O conhecimento das potencialidades e das limitações dos materiais ocorrentes na natureza pode ajudar a solucionar problemas, favorecendo a possibilidade de escolhas de soluções mais econômicas para a construção das camadas de pavimentos (BARROSO, 2002).

Como destaca Borba (1981) as várias condições geológicas e climáticas sob as quais os Solos Lateríticos são formados conferem a estes um comportamento peculiar. As características granulométricas, de plasticidade e de resistência mecânica, consideradas parâmetros básicos para um conhecimento adequado do solo, tornam-se, em determinados casos, insuficientes para caracterizá-los.

Presentes em quase todo território brasileiro e em boa parte do mundo, os solos tropicais tem sido estudados, desde a segunda metade do século XX, sobre a sua aplicação como material de construção de rodovias. Uma das problemáticas importantes ligadas aos Solos Lateríticos é a dificuldade para avaliar, por meio de ensaios simples e econômicos seu comportamento mecânico a longo prazo, em obras geotécnicas como aterros e camadas de pavimentos rodoviários, ferroviários e aeroportuários. Segundo Rodrigues et al. (2010), na verdade, um Solo Laterítico não é necessariamente instável após sua utilização. Os ensaios clássicos geotécnicos utilizados na Europa, baseados em estudos de compactação e na capacidade máxima de suporte, devem ser complementados por ensaios específicos tais como os que integram os procedimentos desenvolvidos no Brasil por Villibor e Nogami (MCT) e que foram direcionados para rodovias de baixo custo e de tráfego leve, mesmo com suas limitações quando aplicados aos Solos Lateríticos com diferentes mineralogias e frações granulométricas.

De acordo com Villibor et. al. (1996) os novos procedimentos de escolha e dosagem de material e de projeto de construção apropriados para o ambiente tropical úmido, proporcionam o uso de camadas de custo relativamente menores em comparação às tradicionais, com a utilização de maior porcentagem de solos locais.

Estudos específicos têm revelado que o comportamento mecânico dos Solos Lateríticos é fortemente influenciado pelas suas propriedades mineralógicas e físicas e que necessário se faz relacionar estas com as que caracterizam mecanicamente estes solos, em função dos procedimentos de projeto e das propriedades de engenharia.

O desenvolvimento de um novo procedimento de classificação para Solos Lateríticos, que leve em consideração as concepções apropriadas do meio ambiente tropical úmido, permitirá prever suas utilizações em camadas de rodovias de baixo custo com uma porcentagem mais elevada de solos locais.

Rodrigues et al. (2010) constata que as técnicas e as propriedades utilizadas para classificar solos para construção de rodovias em países europeus e da América do Norte não devem, necessariamente, serem as mesmas a serem aplicadas aos solos presentes ou de origem de países da América Latina, da África, da Ásia e da Oceania. O autor afirma que o desenvolvimento de um Sistema de Classificação Universal para Solos Lateríticos constitui um projeto ambicioso, em virtude da complexidade desses materiais, pois devem, imperativamente, levar em consideração o "Processo de Laterização", assim como as propriedades mecânicas inerentes às composições químicas dos Sistemas Lateríticos.

A Metodologia de Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010) a partir de estudos das experiências brasileiras, portuguesas, francesas, indianas, australianas e de diferentes países de clima tropical e subtropical associados a parâmetros ligados, em parte, à granulometria, à textura, à mineralogia os quais são preponderantes sobre as propriedades físicas e mecânicas desses materiais tem por objetivo o uso racional destes materiais. Os autores classificam os Solos Lateríticos para fins de construção de estrutura de rodovias de baixo custo como sendo: Solos Lateríticos Pedregulhosos; Solos Lateríticos Arenosos e Solos Lateríticos Finos.

Este trabalho constitui um estudo de três Solos Lateríticos segundo a metodologia de Rodrigues et al. (2010) visando verificar a adequação da supracitada classificação quanto a sua eficácia e sugestão de funcionalidade quanto ao uso de pavimentos de baixo custo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo verificar a eficácia da proposta de Classificação de Solos Lateríticos desenvolvida por Rodrigues et al. em 2010 a partir de um experimento com três solos brasileiros que se pressupõem serem Solos Lateríticos.

1.1.2 Específicos

- estudar as propriedades físicas, de estado e mecânicas das amostras de solos obtidas;
- analisar de forma comparada os resultados obtidos em ensaios realizados, a partir de normas francesas e brasileiras preconizados no Sistema de Classificação de solos Lateríticos proposto por Rodrigues et al. (2010);
- analisar possíveis incoerências no método proposto;
- sugerir modificações na proposta de classificação objetivando aprimorá-la.

1.2 Organização do trabalho

O texto desta dissertação encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma:

[Capítulo 1] Introdução – são descritos uma visão geral do trabalho com a introdução, justificativa, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – são descritos e discutidos assuntos relacionados a formação, propriedades e classificação dos Solos Lateríticos.

[Capítulo 3] Materiais e Métodos – são descritos os procedimentos metodológicos, experimentais e materiais utilizados na pesquisa.

[Capítulo 4] Resultados – são analisados com base na fundamentação teórica e nos resultados obtidos durante a fase experimental a adequação da metodologia proposta.

[Capítulo 5] Conclusões e Sugestões – são apresentados os resultados e argumentações referentes ao objetivo do trabalho, bem como as sugestões para futuras pesquisas.

Por fim, estão incluídos as Referências Bibliográficas e os Anexos, onde foram inseridas as planilhas, os gráficos e os quadros resultantes do processamento de dados.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Segundo Rodrigues et al. (2010) a pesquisa de materiais que sejam adaptados às especificações existentes é um problema complexo que os organismos nacionais de rodovias em regiões tropicais tem enfrentado. As condições geológicas e climáticas variadas sob as quais os Solos Tropicais são Formados conferem a eles um comportamento peculiar. Desse fato, o conhecimento em particular das possibilidades e dos limites dos materiais presentes em países de clima tropical e subtropical podem auxiliar a resolver os problemas impostos e a escolher as soluções mais econômicas para a construção de infraestruturas rodoviárias.

O autor afirma que, a dificuldade em classificar os Solos Tropicais, localizados em zonas onde “o processo de laterização” tem uma importância vital sobre suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, reside na incapacidade dos sistemas tradicionais de prever corretamente o comportamento mecânico desses materiais sob ação do tráfego e do meio ambiente. Os sistemas de classificação como os desenvolvidos pela “American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Guide de Terrassement Routiers (Classification GTR – Norma Francesa P 11 – 300) e o Unified Soils Classification System (USC – ISO 146889-1)” não são capazes ou pertinentes quando são aplicados para alguns desses solos. Os estudos e as práticas demonstraram que as recomendações baseadas nestes sistemas, em particular a atividade da fração fina e argilosas em presença d’água e a dureza das frações pedregulhosas e arenosas durante o pré-tratamento dos materiais, não são compatíveis com os resultados obtidos em laboratório e em campo.

Fall (1993), ao analisar normas e especificações do continente africano afirma que existem inúmeras normas de utilização dos arenosos lateríticos em rodovias. Trata-se geralmente de regras empíricas válidas tanto para as rodovias pavimentadas quanto para as não pavimentadas. De um país para outro estas especificações são muito diferentes (CEBTP, 1972) e para a maioria são provisórias. Entretanto, a maioria dos países tropicais dispõe de critérios e de normas específicas. Estas normas conduzem aos sistemas de classificação que tem embasamento na experiência dos engenheiros rodoviários, no que concerne aos limites das características fixadas.

Ao analisar diferentes sistemas de classificação, as quais incluem essencialmente a plasticidade, a distribuição dos tamanhos das partículas e a capacidade de suporte em função do CBR, a autora constata:

- distinguem-se geralmente entre três classes que se descreve frequentemente como sendo realidades físicas percebidas pelos engenheiros rodoviários;
- os sistemas de classificações (LCPC, HRB, USCS) não consideram a tripla “individualidade”, solos finos, arenosos e concreções e tendem a englobá-los numa categoria única de materiais;
- sobre o plano da distribuição dos tamanhos das partículas, o parâmetro que parece ser o mais importante é tamanho das partículas com diâmetro entre 0,08 mm e 0,1mm denominado “teor de finos”;
- o índice de plasticidade constitui outro parâmetro importante de classificação, e tem influência sobre os níveis de transporte e reflete sobre as variações significativas destes últimos.

Fall (1993) conclui que:... *Todas estas especificações ou normas adotadas têm por objetivo propor catálogos para o dimensionamento de rodovias para os diversos países, entretanto, a compreensão do comportamento mecânico dos solos utilizados é abordada com pouca profundidade nesses estudos de casos.*

Para Rodrigues et al. (2010) os resultados obtidos *in situ*, onde as especificidades dos Solos Lateríticos são consideradas, indicam que a atividade da fração argilosa em presença ou na ausência de água e as propriedades como a degradabilidade, fragmentação e o caráter friável das frações pedregulhosas e arenosas, durante o pré-tratamento das amostras, não são previstas e compatíveis com relação as recomendações dos sistemas de Classificações Tradicionais como o da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e do The Unified Soil Classification System (USC).

Segundo Fall (1993), Nogami et al. (1995), Sharp et al. (2001) e Villibor et al. (2009) é possível estabelecer sistemas de classificação adaptados aos Solos Lateríticos para utilização em construção de camadas de rodovias de baixo custo baseado em suas propriedades naturais, de estado e de propriedades mecânicas. Para isso, é importante que os procedimentos de execução de ensaios sejam compatíveis com as particularidades dos solos de regiões tropicais assim como os valores de referências estabelecidos para as estruturas de rodovias a serem construídas, sejam adaptados ao tipo de tráfego local.

Podemos verificar que os parâmetros relativos às propriedades físicas e mecânicas dos Solos Lateríticos de países de clima tropical e subtropical tais como a granulometria, a plasticidade, a dureza e a capacidade de suporte devem ser medidas por técnicas e por instrumentos que considerem em sua concepção sua formação geológica, assim como a influência do pré-tratamento realizado sobre as amostras trabalhadas em laboratório e durante a execução em campo.

Segundo Maignein (1966) a paternidade do termo “Laterita” é controversa, entretanto o autor cita Prescott assinalando que Babington (1821) o utiliza pela primeira vez na acepção científica, e que o emprego dessa palavra foi utilizado especificamente (Laterita e pedra de Brique) entre 1807 e 1814 por Buchanan para designar materiais com características analíticas mal conhecidas. Para o autor a originalidade da formação descrita pela primeira vez por ele, reside na sua consistência mole quando ela utilizada e na sua facilidade de endurecer rapidamente quando exposta ao ar.

Bourgeon (2005) descreve em detalhes precisos a experiência do Médico Francis Buchanan que criou o termo “Laterita”. Ele relata suas observações realizadas entre 20 e 21 de dezembro de 1800 em Angadipuram (Figura 2.1). Para os autores, após sua criação na Índia, o emprego do nome “Laterita” (e das palavras que dela se derivaram) se internacionalizou e foi estendido à outros domínios: prospecção mineral, geoquímica, pedologia, geomorfologia, etc. Esse sucesso se autoafirma ao longo de todo o século XX, e é acompanhado de uma multiplicação de definições de empregos variados.



Figura 2.1 - Marco comemorativo erguido pela Geological Survey of Inde em Angadipuram (Buchanan Memorial) [Fonte: Rodrigues et al., 2010]

O autor, para responder esta questão em vigor, escolheu ilustrar a situação atual sobre a taxonomia de perspectivas atuais relacionadas à palavra “Laterita” sob a importância das ciências dos solos, onde o termo “Plinthite”, criado pelo United States Department of Agriculture, Soil Taxonomy para designar os horizontes, potencialmente em via de endurecimento, e representando um papel menos evoluído de objetos denominados de “Laterita”.

O termo “Plinthite”, citado pela Soil Taxonomy em 1956, foi criado para distinguir as diferentes formas de “Laterita” entre as formações susceptíveis de endurecer e as quais de pronto fortemente cimentadas.

Bourgeon (2005) se refere aos textos de Wanbeke de 1992, que afirma: "...this definition Plinthite was written to cover the original concept of Laterite...that was first described by Buchanan."

Bourgeon (2005) conclui que: "... a laterita tanto como um objeto de investigação científica seguiu depois de dois séculos uma trajetória por sua vez polisêmica e multidisciplinar". Para o autor, o estudo da Laterita, tanto como instrumento de análise estatigráfica, tanto como marco paleoclimático, tanto como pretexto a decifrar as trajetórias geoquímicas das rochas sob os efeitos de alterações da supergêne, revelados por disciplinas científicas que abordam mais por uma problemática quer por um objeto com contornos definidos. As formas iniciais de Laterita são atualmente denominadas de Plinthite em Ciências dos Solos, mas esta não dispensa aos pedólogos de se interessar por outras formas mais frequentemente utilizadas para compreender os meios pelos quais se desenvolveram os Solos Tropicais.

2.2 O processo de laterização e os fatores de influência

Citando Tardy (1993) Rodrigues et al. (2010) afirma que a alteração supergêne, processo natural da superfície, resulta de interações atuais e passadas entre a litosfera e os envelopes fluidos que circundaram nosso planeta. Segundo o autor, o motor principal desta alteração é a água que, sob uma ação dinâmica interviu na dissolução química das rochas da litosfera e sob uma ação estática agiu como regulador na estabilidade dos minerais e de estruturas e sua ação mecânica quando dos eventos variados que teriam preponderado no processo de erosão superficial. As condições climáticas particularmente favoráveis nas regiões tropicais conduziram ao desenvolvimento dos Sistemas Lateríticos que se originaram da crosta continental essencialmente ácida (graníticas/magnetita) das Guianas, da Amazônia, do Oeste Africano, do Congo-São Francisco, da Índia e do Oeste Australiano.

O "Processo de Laterização" engloba um conjunto de fenômenos que deram origem a uma alteração extremamente forte da rocha mãe, e de uma individualização dos elementos tais que a sílica e óxidos ou hidróxidos e hidratos metálicos, em particular de ferro, de alumínio, de manganês e de titânio (AUBERT, 1964; MAIGNEIN, 1966).

Esse processo pode ter sido seguido por outros processos pedogenéticos tais como o emaranhado de hidróxidos da superfície *versus* um horizonte semi-profundo duramente concrecionado ou em carapaças de hidróxidos metálicos previamente individualizados e por vezes acumulados; segregações de elementos de um horizonte hidromórfico (AUTRET, 1983; SCHELLMANN, 2009).

Para Vallerga (1960), os fatores que exercem uma influência preponderante sobre o Processo de Laterização são: o clima (pluviometria); a topografia (erosão e drenagem); a vegetação (matéria orgânica, bactéria, ácidos húmicos); a Rocha mãe e o período de formação.

Segundo Rodrigues et al. (2010), as temperaturas observadas nos países tropicais são favoráveis a uma alteração das rochas do tipo Laterização, pela formação dos óxidos de ferro e de alumínio e da lavagem da sílica. À umidade constante, a relação $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ aumenta com a temperatura; ela mesma serve de catalisador das reações químicas que podem ter seus efeitos multiplicados por 2 ou por 3 para cada aumento de 10°C de temperatura. A pluviosidade e o balanço hídrico da água em abundância são necessários para a alteração química (hidrólise).

Segundo o autor, o Processo de Laterização consiste em trocas iônicas em meio aquoso, necessita, portanto, de água e do tempo. A topografia influi sobre esse processo na medida em que favorece ou impede a acumulação de água.

A vegetação influi sobre o teor de elementos grosseiros dos horizontes superficiais dos Solos Lateríticos limitando a erosão (os fragmentos de quartzo e agregados miúdos se concentram pela mistura de materiais finos por ação da água). O conjunto de Laterita sob a forma de “carapaças” é mais frequente em zonas de savanas enquanto que o inverso, as concreções lateríticas (Pedregulhos Lateríticos ou Concreções Lateríticas com elementos mais grosseiros são constituídos de materiais menos alterados ou não completamente alterados, ao contrário do pedregulho pisolítico nos quais não se encontram traços da rocha mãe) são observadas onde há presença de lençóis d’água.

A natureza da rocha mãe não parece ter incidência sobre a existência do Processo de Laterização, apresenta, porém, influência clara sobre as rochas básicas ígneas do tipo basalto, sobre rochas ácidas do tipo granito, gnais ou sobre outras rochas sedimentares do tipo feldspáticas, xistos e calcários. Ela exerce um papel sobre o tipo de reação e a natureza dos constituintes argilosos; as rochas cristalinas básicas como as basálticas são menos ricas em sílica e compostas em parte de “Olivina” que se altera em montmorilonita; as rochas cristalinas ácidas (tais como as graníticas e as gnaises) se alteram principalmente em Caulinita ou Mica e as rochas sedimentares argilosas (tais como os xistos e as feldspáticas) em Illita e Mica.

Atualmente se admite que o Processo de Laterização consista em um fenômeno lento que ocorre em períodos de milhares de anos (época geológica).

Um levantamento mundial realizado pela Food and Agriculture Organization of United Nation - FAO (2006) mostra que o Processo de Laterização está situado em regiões Intertropicais (América do Sul, África, Índia, Austrália e o Sudoeste Asiático) (Figura 2.2). Ele ocorre principalmente em países em via de desenvolvimento para os quais a criação de infraestruturas de transporte tem um papel primordial.

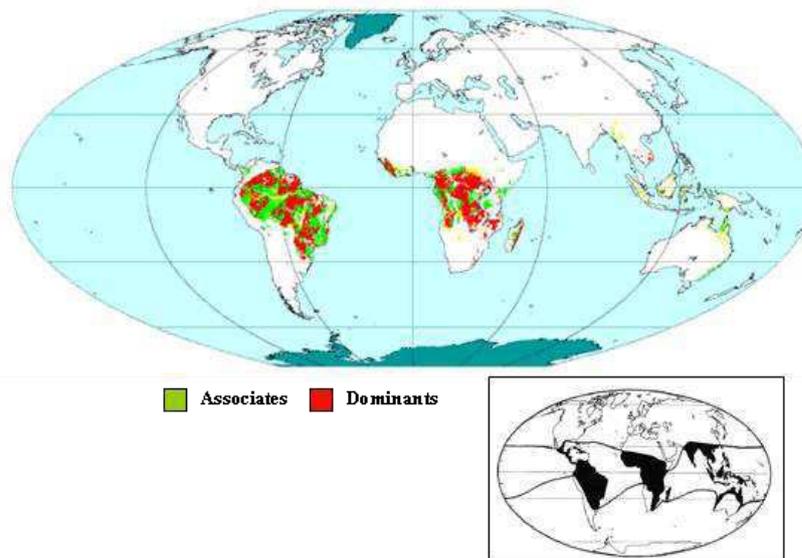


Figura 2.2 - Distribuição dos Solos Lateríticos (Ferrasols) no mundo (FAO, 2006)
[Adaptado por Rodrigues et al., 2010]

Os Sistemas Lateríticos, produto do Processo de Laterização, dão origem aos Solos Lateríticos que são utilizados em Engenharia Civil (Figura 2.3). Estes solos são caracterizados por uma alteração intensa dos minerais da rocha mãe com a eliminação quase total de base alcalinas e alcalino-terrosas, e parcialmente a sílica e uma decomposição intensa da matéria orgânica. Uma acumulação mais ou menos importante de hidróxidos e óxidos de Fe, Al, Ti, Mn. Em conjunto, podem ocorrer, em graus diversos, os processos acessórios de lixiviação, de acumulação de matérias orgânica e de endurecimento (SEGALEN, 1964; SCHELLMANN, 2009).



Figura 2.3 - Solos Lateríticos do Brasil e Guiana Francesa [Fonte: Rodrigues et al., 2010]

2.3 Composição química e micro-estrutural dos Solos Lateríticos

Maignein (1966) classificou os materiais constituídos de Solos Lateríticos em função de dois elementos principais, que tem um papel essencial na formação dos horizontes endurecidos, e em elementos secundários, indiferentes ao processo propriamente dito. Os primeiros são representados por óxidos e hidróxidos de alumínio, de ferro, por vezes de manganês e de titânio, de sílica e frequentemente também por argilas. Os segundos são constituídos de elementos texturais dos solos "in situ", produtos residuais.

As porcentagens de óxidos e de hidróxidos de Ferro e de Alumínio (sesquióxidos) podem chegar, para alguns Solos Lateríticos Concrecionados ou Pedregulhosos, até 80% do produto da laterização.

O argilomineral presente, geralmente, na fração fina dos Solos Lateríticos é a Caulinita, que é coloidalmente menos ativa. Esta Atividade se reduz ainda quando ela está associada aos óxidos e aos hidróxidos de Ferro ou de Alumínio, que recobrem geralmente a Caulinita.

Esses constituintes apresentam geralmente, nos Solos Lateríticos, poucos comportamentos particulares, próprios aos minerais argilosos convencionais. Assim, possuidores de uma superfície específica elevada e de pequenas dimensões, eles não são expansivos, tem uma capacidade de troca catiônica negligenciável, nas condições de pH preponderante nos solos, e possuidores de um excesso de carga positivas e não negativas, como no caso dos argilominerais (Nogami et al., 1995; Villibor et al., 2009).

É possível observar a micro estrutura dos Solos Lateríticos Finos, com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Segundo Nogami et al. (1995), devido ao processo de laterização, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos hidratados de ferro e/ou alumínio (Quintans, 2008, Figura 2.4).

As observações obtidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pelo Departamento de Química da Universidade de São Paulo (UNESP – SP/Brasil), a microestrutura dos Solos Lateríticos (VILLIBOR et al., 2009) demonstram em evidência que :

- As partículas individuais de argilas não são geralmente visíveis, e quando elas são, não aparecem nitidamente;
- Os flocos relativamente grandes se aglutinam as partículas argilosas presentes num aspecto de "nuvens" ou de "pipocas" e medindo 1 à 2 até 50 à 100 μ m, nas suas dimensões maiores;
- Os flocos se apresentam como agregados em forma de granulados ou como matéria intersticial entre grãos de areia.

Os aspectos citados aparecem em todos os solos analisados independentemente de suas cores ou da granulometria. O aspecto de flocos é mais ou menos visível em função do grau de laterização. Quando a intensidade do Processo de Laterização sobre o solo é fraco, menos se vê, distintamente, as partículas individuais dos minerais argilosos.

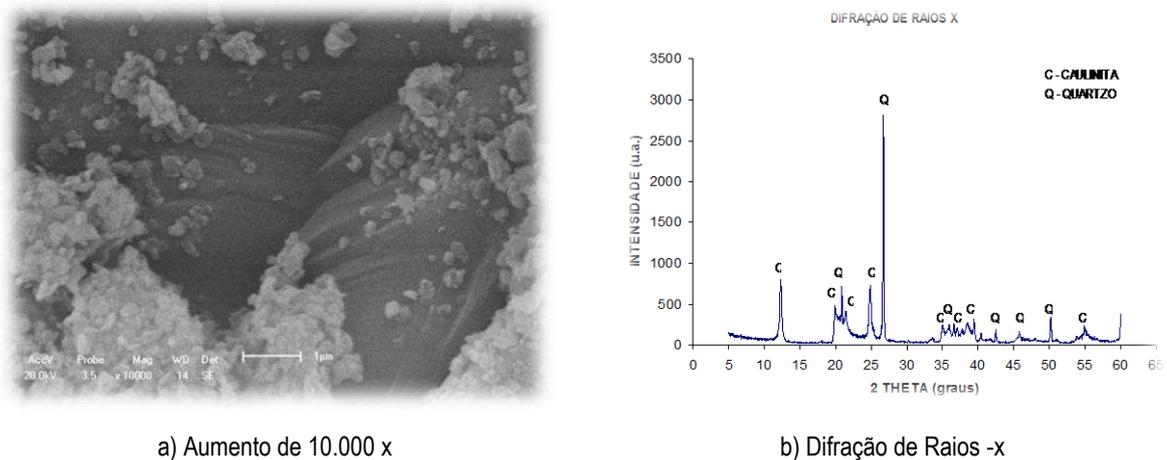


Figura 2.4 - Resultados de um ensaio sobre os Solos Lateríticos Arenoso Fino do Nordeste do Brasil (a) Difração de Raios - X (b) MEV [Fonte: Quintans, 2008]

2.4 Histórico dos parâmetros pedológicos e geotécnicos utilizados para classificar os Solos Lateríticos

2.4.1 Morfologia e as denominações dos Solos Lateríticos

Segundo Rodrigues et al. (2010) a presença de concreções e coesão das amostras dos Solos Lateríticos depende de fatores como: o grau de cristalinização dos componentes, o conjunto de diferentes constituintes e do grau de envelhecimento do solo.

A estrutura extremamente variada pode ser reduzida a três elementos: os elementos endurecidos formando um esqueleto coeso e contínuo, os elementos endurecidos são de concreções ou de nódulos (torrões) livres ao meio de um material terroso e os elementos endurecidos cimentados dos materiais pré-existentes.

Moh et al. (1969) afirma que um grau crescente de laterização se traduz por um aumento de espessura de revestimentos em óxidos de ferro das partículas do solo. Estas partículas se coagulam mais tarde em grandes agregados e sem uma diminuição da sua área específica. Essas diferenças entre os solos de zonas temperadas e os Solos Lateríticos podem ser explicadas a partir destes revestimentos e da coagulação das partículas do solo.

A cor dos solos é variada, mas geralmente de intensidade viva. Os pigmentos mais frequentes são: rosas, vermelhos, amarelos e marrons. Geralmente admite-se que a cor do solo é devida à presença do ferro

como no caso de alguns sedimentos. As cores vivas, rosas e amarelas, são devidas aos óxidos ou hidróxidos de ferro. A cor vermelha é provocada pela presença da hematita, a cor amarela pode ser atribuída à presença de goetita (SEGALEN, 1964).

A densidade real varia em grandes proporções (2,5 a 3,6) e dependem da composição química do Solo Laterítico. Ela aumenta com os teores de ferro e diminuem com os teores de alumínio. As formas oxidadas são mais densas que as formas hidratadas. Os resultados disponíveis indicam que a densidade não varia somente por meio dos grupos de solos baseados sobre a textura, mais igualmente de uma fração a outra (LYON ASSOCIATES INC., 1971). O autor encontrou, para um mesmo solo, uma fração de agregados que teria uma densidade mais elevada que a fração de finos, por causa da concentração de óxidos de ferro em primeiro lugar, apesar de que o alumínio está concentrado na fração fina e de argila.

A evolução da rocha mãe em direção a superfície de diferentes conjuntos concrecionados permitem distinguir geralmente: um conjunto de alteração; um conjunto mediano de acumulação de hidróxidos metálicos e fases argilosas; e um conjunto móvel superior lixiviado constituído de minerais residuais primários resistentes.

Entretanto, segundo Rodrigues et al. (2010) estes três conjuntos podem apresentar entre eles discordâncias e alguns podem por vezes estar ausentes. Outros podem apresentar sucessões complexas de diferentes facetas.

Os Solos Lateríticos podem ser classificados de maneira sintética ou analítica. A primeira é baseada em fatores genéticos e em propriedades de fatores ou de processos pedogenéticos. A segunda considera características, sobretudo morfológicas, com considerações pedogenéticas (MAIGNEIN, 1966).

Vários autores utilizaram fortemente a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki) para classificar os Solos Lateríticos. Entretanto, esta definição não é unanimidade e gerou muitas controversas em função de conduzir a uma separação dos Solos Lateríticos com presença de mineral Caulinita (Argilas Cauliníticas), no entanto, ela classifica as lateritas com mineral de ferro, com bauxita e com vários graus ferruginosos. Esta relação depende muito da fração granulométrica analisada (AUTRET, 1983).

As principais denominações utilizadas são: Laterita, Solos Tropicais, Solos Lateríticos, Solos Ferruginosos, Solos Ferralíticos, Solos Ferrealíticos, Ferrisolos, Ferrasolos, Andosolos, Oxisolos, Podzolos, Latossolos, e Plinthosolos.

2.4.2 Granulometria

Para Lecomte-nana (2008), Lyon Associates Inc. (1971), ISTED (1990), Nogami et al. (1995), Villibor et al. (2009), a estrutura granulométrica dos Solos Lateríticos apresenta geralmente:

- uma forte proporção de elementos finos (inferiores ao tamanho de 80 μm) chegando a 10 à 40%;
- uma retenção de diâmetro de 2 mm de 20 à 60%
- uma dureza relativa dos agregados para uma mesma jazida e esta em função da maturidade das partículas lateríticas concrecionadas e da quantidade dos sesquióxidos, que predominam na fração grossa;
- as curvas granulométricas têm uma queda ou uma descontinuidade denotando uma ausência de certas frações granulares. Este por sua vez se situa entre os diâmetros de 80 μm e 0,2 mm;
- os materiais com agregados pétreos, ricos em ferro, têm geralmente comportamentos mecânico estáveis;
- na fração granular, a constituição mineralógica da fração silte é geralmente simples, há uma predominância de quartzo com a presença nítida de porções de argila;
- os principais constituintes da fração argilosa (diâmetro inferior à 0,002 mm) podem ser classificados como minerais: óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio e constituintes orgânicos.

A estrutura metaestável dos Solos Lateríticos é sensível às variações dos níveis de energia térmica e/ou mecânica, com conseqüências sobre as propriedades físicas e mecânicas. Em termos de granulometria, a secagem induz a um aumento do tamanho das partículas, fazendo se aglomerar a fração argilosa e a fração siltosa até chegar ao tamanho da fração arenosa em função da coagulação do óxido de ferro durante a secagem (TERZAGHI, 1958; LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - LNEC, 1959, 1969; NEWILL, 1961; MOH et al., 1969; TOWNSEND, 1969; LYON ASSOCIATES INC., 1971; GIDIGASU et al., 1974).

Os Solos Lateríticos Pedregulhosos secos em estufa têm a fração de argila menor que as amostras intactas (com teor de água natural) ou secas ao ar (MOH et al., 1969). A diminuição do teor de argila é acompanhada de um aumento da fração fina e arenosa produzida pela cimentação e pela coagulação por óxido de ferro livre das partículas argilosas em pequenos agregados (TERZAGHI, 1958).

Para Lyon Associates Inc. (1971), as mudanças de propriedades com a secagem podem ter uma importância não desprezível durante a construção. Se ensaios realizados em laboratórios não são executados com amostras secas ao ar, seus resultados podem corresponder à de solos alterados.

Para os Solos Lateríticos, o incremento de energia mecânica tem por conseqüência aumentar sua vulnerabilidade. O aumento da massa específica aparente seca máxima e do teor de água em areias finas, sobretudo com a fração superior ao material que passa na peneira de diâmetro de 80 μm e onde a fração menos argilosa tem um teor maior em Fe_2O_3 (NOVAIS, 1972).

2.4.3 A Plasticidade

A influência dos sesquióxidos (Al_2O_3 e Fe_2O_3) faz com que os Solos Lateríticos tenham um comportamento plástico diferenciado dos solos de clima temperado. Pode se observar durante os ensaios que o aumento da área específica, devida à desintegração das partículas e/ou a quebra da estrutura granular do solo como consequência do aumento da absorção de água pelas amostras (WINTERKOM, 1951; NEWILL, 1961; COLEMAN et al., 1964; MOH et al., 1969; VARGAS, 1982; NOGAMI et al., 1995; VILLIBOR et al., 2009).

Newill (1961) e Villibor et al. (2009) afirmaram que quando ensaios de limite de liquidez são efetuados, as uniões de partículas de argilas são quebradas pelas manipulações inerentes do ensaio; isto conduz a uma difícil obtenção de valores reprodutíveis pelo ensaio de limite de liquidez. O tratamento aplicado ao solo gera também problemas de discrepância entre os resultados dos ensaios realizados em laboratório e o comportamento mecânico do solo em campo onde ele não recebe necessariamente um tratamento equivalente (Figura 2.5).

Em função das inconsistências de resultados obtidos com os ensaios de limite de liquidez, Autret (1983) e Fabbri (1994) realizaram estudos da plasticidade de Solos Lateríticos com o ensaio de Azul de Metileno. Segundo Autret (1983) os estudos das atividades das argilas com esses ensaios, aplicados aos Solos Lateríticos Pedregulhosos, mostraram que em geral existe uma relação entre o valor do Azul de Metileno e a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (R). Entretanto, o significado desta relação é contestado e o valor para o qual se admite que um solo seja Laterítico ($R \leq 1,33$) não é verdadeiramente considerado como característico. Os estudos de Autret (1983) demonstram que faltaria, para os Solos Lateríticos, adaptar a forma de operação e de manipulação a um pH dado.

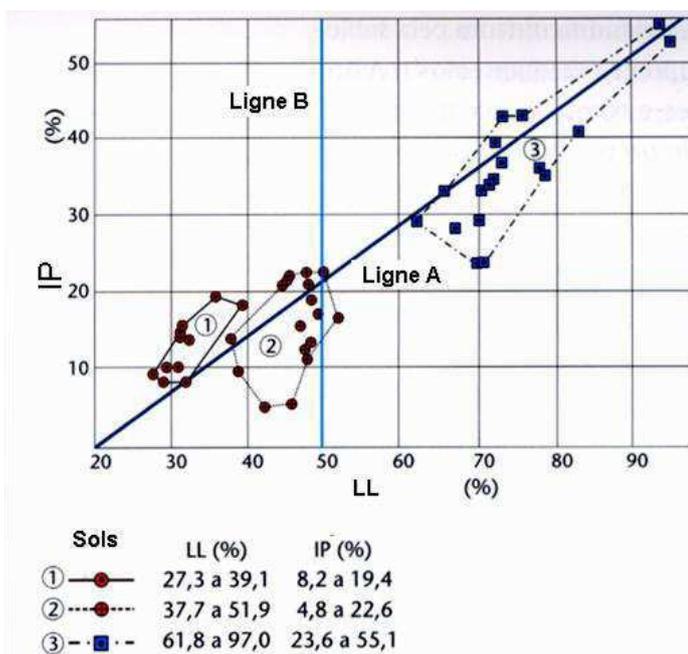


Figura 2.5 - Variabilidade dos valores de LL e IP: IPT / SP/ Brasil [Fonte: Villibor et al., 2009]

Fabbri (1994) em estudos sobre a influência do pH sobre o valor de Azul de Metileno, conclui que “... em geral é claro que os testes de adsorção do Azul de Metileno devem ser realizados com o pH natural da suspensão solo/água, enquanto dado que essa variação não introduz mudanças significativas nos resultados dos ensaios”. Segundo o autor, esta é ainda a condição mais favorável a essa realização, porém ela não é necessariamente ligada a outro produto em suspensão, não sendo necessário medir nem controlar o pH, nestes casos, acarretaria um aumento no tempo de execução do ensaio.

Os estudos de Fabbri (1994) indicam que o ensaio de adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha é capaz de identificar o tipo de argilomineral presente na fração fina dos Solos Lateríticos. O autor apresenta um ábaco de caracterização da atividade dos argilominerais da fração fina dos Solos Lateríticos, com graus de atividades (muito ativo, ativos e pouco ativos – Figura 2.6), relacionando com a porcentagem de argila contida na amostra do solo.

O fenômeno de perda de água conduz geralmente nos solos uma evolução marcada da porosidade. Esta evolução se traduz essencialmente por uma diminuição progressiva dela mesma, até certo nível de desidratação ou perda de água a partir do qual o volume aparente medido deveria ser constante: temos então o limite volumétrico inferior no qual é denominado normalmente sob o nome de “Limite de Contração (LC)”.

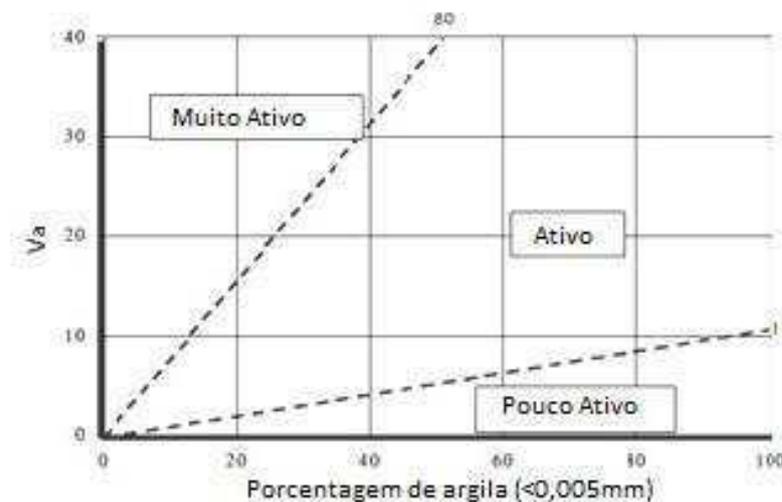


Figura 2.6 - Atividades de argilominerais dos Solos Lateríticos em função da porcentagem de argila e do valor de Azul de Metileno [Fonte: FABBRI, 1994]

O conhecimento do Limite de Contração é importante para prever se os Solos Lateríticos Arenosos ou Finos não correm o risco de ficarem sujeitos, principalmente em países com estações secas bem marcadas, à diminuição acentuada de volume. Podendo ocorrer, neste caso, sua fissuração. Seria necessário então manter

livre de variações do teor de água ou eventualmente não utilizar as amostras de solos sem estabilização química ou mecânica (Figura 2.7) (NOGAMI et al., 1995; AUTRET, 1983; VILLIBOR et al., 2009).



Figura 2.7 - Fissuras em rodovias construídas com Solos Lateríticos Finos [Fonte: Quintans, 2008]

2.4.4 A Dureza

A resistência e a dureza das frações pedregulhosas e arenosas é função da composição química, de sua idade e de sua homogeneidade nos Solos Lateríticos. As lateritas ricas em ferro são mais duras ou resistentes que as ricas em alumínio (LNEC et al., 1959; ACKROYD, 1967; LYON ASSOCIATES INC., 1971; De GRAFT-JOHNSON et al., 1972; GIDIGASU et al., 1973,1974; ENUVIE, 1992; NWAIWU, 2006).

Segundo Rodrigues et al. (2010), os resultados de ensaios de pesos específicos e de absorção indicam uma relação com a dureza dos elementos grossos. A dureza dos elementos grossos cresce com o peso específico. Os elementos finos não mostram relação com a absorção e com a densidade. A dureza dos elementos finos e grossos aumenta quando a absorção de água diminui (Figura 2.8).

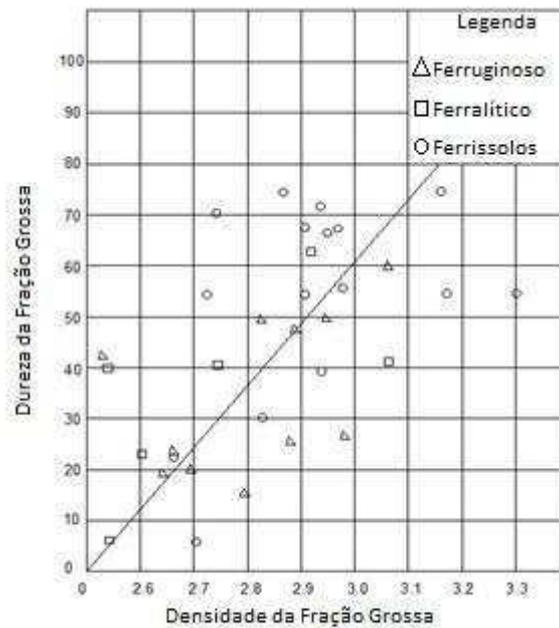


Figura 2.8 - Dureza dos elementos pedregulhosos em função de seus pesos específicos

[Fonte: LYON ASSOCIATES INC. 1971]

2.5 Outros parâmetros que devem ser levados em conta em obras

2.5.1 Características de compactação

Segundo Lyon Associates Inc (1971), os fatores que influenciam as propriedades de compactação dos Solos Lateríticos podem ser divididos em dois grupos: o primeiro é ligado à gênese dos solos; o segundo se relaciona aos métodos de pré-tratamento antes dos ensaios. Os fatores são:

- a textura: o fator genético é mais importante;
- a transformação da halloysita hidratada em metahalloysita devido à secagem em estufas;
- a localização das amostras no perfil do sol (profundidade das amostras);
- e o atrito dos pedregulhos lateríticos concrecionados durante a compactação e do grau de maturidade do processo de laterização.

Rodrigues et al. (2010) ao analisar estudos e experiências da Universidade Federal de Campina Grande sobre Solos Lateríticos da Região Norte e Nordeste do Brasil infere que para uma energia dada é observado mais para os Solos Lateríticos Finos que para os Solos Lateríticos Pedregulhosos, que a secagem em estufas resultam sempre em massas específicas secas aparentes mais elevadas e teores de água ótimos mais baixos,

enquanto os solos com o teor de água natural ocorrem massas específicas secas máximas mais baixas e os teores ótimos de água mais elevados.

Segundo os autores, a compactação dos Solos Lateríticos Pedregulhosos pode ser nociva em caso de fragilidade dos torrões. Ela provoca um incremento do teor de finos por destruição da estrutura do solo sem aumentar, no entanto, a massa específica seca nem a capacidade de suporte de maneira significativa. Ela pode mesmo tornar o material sensível ao efeito da sucção. Entretanto, quando os nódulos ou torrões são friáveis, um estudo do efeito da compactação em função da energia aplicada é necessário para obtenção da compactação ótima que pode ser aplicada e que, às vezes, pode ser inferior a energia do Proctor Modificado (DEGN, 1984).

ISTED (1990) distingue para os Solos Lateríticos Pedregulhosos compactados dois níveis de estruturas: a natureza da estrutura do solo consistindo em partículas e em poros onde a associação depende das condições de compactação (teor de água, energia de compactação); e a estrutura interna das partículas, conjunto de elementos menores e dependentes das condições genéticas do solo.

2.5.2 Características de capacidade de suporte

Segundo Rodrigues et al. (2010), a capacidade de suporte dos Solos Lateríticos depende dos *parâmetros naturais e de estado*:

Parâmetros naturais

Abaixo são descritos, segundo ISTED (1990), os parâmetros naturais que exercem uma influência sobre a capacidade de suporte dos Solos Lateríticos:

- o diâmetro máximo dos agregados D;
- o material que passa na peneira de 80 μm ;
- o material retido na peneira de diâmetro de 20 mm;
- a descontinuidade da curva granulométrica entre 80 μm e 2 mm;
- a argilosidade da fração fina;
- a fragilidade dos nódulos (evolução em função da compactação);
- e a natureza mineralógica das partículas finas.

Parâmetros de estado

Em que concerne os climas secos, o teor de água constitui um dos principais parâmetros que podem influenciar o comportamento mecânico dos Solos Lateríticos após a execução ou a construção de camadas de rodovias.

Estudos realizados sobre redes de rodovias africanas, citadas por ISTED & LCPC (1983), indicaram que os teores de água das camadas de rodovias *in situ* são inferiores a 6% (em Mali) e mesmo à 2% (na Nigéria). Portanto, o valor de CBR após quatro dias de embebição poderia conduzir a rejeição da quase totalidade dos materiais e teria como consequência tornar inviável a busca de soluções com Solos Lateríticos em harmonia com a excelente quantidade de materiais disponíveis nestas regiões.

Um estudo efetuado no LCPC (LAWAL, 1981) indica que a ideia de escolher, em caso de ensaios realizados de imediato, ou seja, o teor ótimo de água de compactação ser determinado durante o ensaio Proctor, sem embebição, não é mais inteiramente rejeitado. Alcock (1950) demonstra que o CBR de um Solo Laterítico Pedregulhoso aumenta com a perda de água como diminui com a o fator embebição (Figura 2.9).

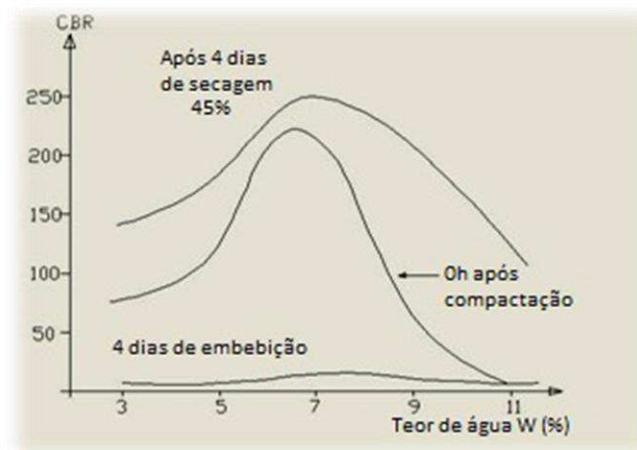


Figura 2.9 - Estudos da forma de realizar o ensaio de CBR adaptado ao clima do Sahara [Fonte: Alcock, 1950].

ISTED & LCPC (1983) conclui que a introdução de um critério de capacidade de suporte em termos de CBR na classificação dos Solos Lateríticos Pedregulhosos constitui um progresso. Resta, entretanto, definir sua forma de operação ou de execução para adaptá-lo às condições climáticas próprias das regiões tropicais secas a fim de inserir em sistemas de classificação e formas de sua utilização.

2.5.3 Comportamento elastoplástico

Sobre o comportamento elastoplástico dos Solos Lateríticos Sikali (1979) afirma:

- a resistência à ruptura e o Módulo de Young aumentam com a intensidade de compactação inicial e de sua compressão lateral;

- a coesão e o ângulo de atrito interno são também função crescente desses mesmos parâmetros (ou seja, aumentam com a intensidade de compactação inicial e da sua compressão lateral) próximos a valores de 98% do teor ótimo de umidade;

- os valores obtidos para amostras de solo submetidas ao cisalhamento direto são diferentes daqueles obtidos com o auxílio do ensaio triaxial sendo mais elevados para os solos com ângulos de atrito interno maiores e mais baixos para solos com coesão;

- as curvas de tensão e de deformação indicam que para as tensões normais inferiores a 0,5 bar, foram obtidas um pico correspondente as deformações relativas inferiores a 3%. Para tensões normais superiores, as curvas não apresentaram picos significativos, as deformações continuam a aumentar com a aplicação das tensões. No primeiro caso, o comportamento é compatível a uma areia densa e no segundo caso a um areia solta compressível.

Medina et al.(2006) em estudos de Solos Lateríticos Pedregulhosos e Finos do Sudeste e do Norte do Brasil, aplicaram os modelos descritos abaixo pelas Fórmulas um a três. Os Autores concluíram, para o caso em específico, que a Formulação três é mais apropriada para explicar a relação do Módulo de Resiliência em função das tensões que são aplicadas sobre o corpo de prova para o respectivo ensaio.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{K_2} \quad \text{Formula [1]}$$

$$M_R = k_1 \sigma_d^{K_2} \quad \text{Formula [2]}$$

$$M_R = k_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3} \quad \text{Formula [3]}$$

Onde k_1 et k_2 são constantes do material;

σ_3 : Tensão de confinamento;

σ_d : Tensão desvio.

2.6 Melhoramento do comportamento dos Solos Lateríticos

Segundo Rodrigues et al.(2010), os solos utilizados na construção de rodovias devem possuir propriedades físicas e mecânicas conforme as normatizações. O engenheiro tem então a escolha entre duas soluções: primeiramente, substituir os materiais que não correspondem às exigências contidas nas normas por outros mais qualificados ou adaptados, e/ou, de outra forma, os modificar de maneira a lhe dar, por métodos adequados de estabilização granulométrica ou com auxílio de adição de Ligantes Hidráulicos (tratamentos), um comportamento mecânico compatível com as solicitações do tráfego para o qual a estrutura da rodovia foi projetada.

Para o autor, em geral, a estabilização granulométrica dos Solos Lateríticos Arenosos ou Finos tem por finalidade a diminuição das atividades da fração argilosa relacionada à plasticidade, as quais estão associadas às propriedades mecânicas de contração e de expansão ou de dilatação.

A estabilização dos Solos por adição de Ligantes Hidráulicos (cal ou cimento) confere às misturas propriedades físicas e mecânicas particulares. Em função disto, se distinguem para o engenheiro de rodovias, aquelas que tem uma incidência sobre a plasticidade, a granulometria, as variações volumétricas por absorção de água, a pressão de expansão, as características de compactação, as quais estão associadas à capacidade de suporte (resistência ao cisalhamento e as deformações plásticas e as elásticas), a dureza, a permeabilidade, a sucção e a adsorção. O grau no qual as modificações acontecem é dependente da natureza, do tipo de método (tempo e forma de cura, compactação da mistura, etc.) assim como da quantidade do ligante.

Com relação aos tratamentos, geralmente a cal é utilizada para estabilizar os Solos Lateríticos Finos ou Arenosos Siltosos e o cimento para estabilizar os Solos Lateríticos Pedregulhosos ou Arenosos. Uma combinação dos dois ligantes é possível.

2.6.1 Estabilização granulométrica dos Solos Lateríticos

Estudos realizados por Quintans (2008) indicam que o efeito de retração dos Solos Lateríticos Arenosos pode ser minimizado por incremento de quantidade de areia ou de materiais arenosos até o limite de 30% do peso da mistura.

Villibor et al. (2009) considerou que o bom comportamento dos Solos Lateríticos Pedregulhosos, Arenosos e Finos, estabilizados granulometricamente, é devido a sua alta estabilidade e resistência durante sua vida útil, assim que as condições do meio ambiente tropical que fazem com que o teor de umidade das camadas das rodovias seja inferior ao teor de umidade de compactação. Segundo o autor, este comportamento está associado aos estudos geotécnicos dos materiais que precedem a execução das camadas e que devem se basear sobre os seguintes critérios:

- estudos da plasticidade da fração fina do solo;
- estudo da dureza da resistência da fração dos agregados retidos pela peneira de diâmetro 2 mm;
- e o estudo da mistura estável em função dos parâmetros de granulometria, de expansão e da capacidade de suporte.

Villibor et al. (2009) considera que as misturas dos Solos Lateríticos para uma camada de base de uma rodovia de baixo custo pode ter um granulometria contínua ou descontínua. No primeiro caso, a estrutura tem por objetivo garantir a estabilização da base compactada, com a formação de uma estrutura granular, que transmite as pressões provenientes das cargas que são exercidas sobre ela em direção a camada inferior. No segundo caso, a qualidade dos finos lateríticos exerce um papel importante na estabilização pela interação de seus grãos de areia com os de argila laterítica de coesão elevada, na medida onde os grãos mais grossos, não têm, geralmente, contato entre eles, e são distribuídos na massa do Solo Laterítico. Isto cria uma estrutura diferente de bases estabilizadas granulometricamente (contínua).

2.6.2 Estabilização dos Solos Lateríticos com Cal

A troca de cátions, a floculação e a aglomeração são as reações responsáveis pelas mudanças na plasticidade, na retração e na trabalhabilidade de um solo estabilizado com a Cal, enquanto que a reação pozolânica é, sem sombra de dúvidas, responsável pelo aumento da resistência (SOARES MINA, 1993; DOUGLAS, 1989).

Com relação à reação pozolânica, os fatores mais importantes estão associados à sílica, ao alumínio e ao ferro. Podemos distinguir como principais minerais a sílica e o alumínio. No caso dos Solos Lateríticos, os componentes amorfos de sílica, de alumínio e de ferro participam ativamente do processo de estabilização (QUEIROZ DE CARVALHO, 1983).

Winterkom et al. (1951) em estudos sobre a estabilização de Solos Tropicais com a Cal, destacou a importância do efeito do grau de intemperismo e da composição química. Para o autor, a resposta dos Solos Lateríticos com os Ligantes Hidráulicos aumenta com o incremento do grau de laterização. Vallerga (1960) demonstra que para alguns Solos Lateríticos, a adição da Cal permite ganhos substanciais de resistência. Galvão (2004) em estudos de Solos Lateríticos observou: uma diminuição do valor do coeficiente de permeabilidade; uma melhora das características de compressibilidade; e uma diminuição da susceptibilidade ao potencial “colapsível” com um aumento do teor de Cal. Nunez (2005) afirma que os Solos Lateríticos Finos tratados com a Cal são adequados para serem utilizados em camadas de rodovias.

Para Townsend (1969) as superfícies das argilas quando cobertas por sesquióxidos, tem inibida a reação argila-cálcio e por consequência a estabilização.

Soares Mina (1993) em pesquisas bibliográficas a partir de diversos autores que estudaram os tratamentos dos Solos Lateríticos Brasileiros com a Cal, conclui: “a cinética da reação entre o Solo, a Cal e a água é muito lenta, isto induz a um longo tempo de endurecimento, que do ponto de vista de aplicação em rodovias poderia ser impraticável e que seria necessário desenvolver pesquisas visando acelerar esta reação a fim de obter melhores resultados”.

Em geral, a utilização da Cal permite baixar os teores de água da mistura (em torno de 1% por 1% de Cal) e de reforçar a coesão; as condições de compactação e da capacidade de suporte por consequência melhoram (ISTED, 1990).

2.6.3 Estabilização dos Solos Lateríticos com cimento

Millogo et al. (2008) afirma que a adição do cimento aos Solos Lateríticos Pedregulhosos impede a formação de 1.4 nm-tobermorita (Calcium Silicate Hydrate), ettringite (hexacalcium aluminate trisulfate hydrate), oxihidróxido de ferro, Portlandita e Calcita. A redução da tobermorita, ocasionada por incremento de cimento, é seguida de uma redução significativa da segregação das partículas. Observa-se uma cristalização da estrutura da mistura, com cura aos 28 dias, isto contribui para uma melhoria da resistência mecânica.

A melhoria dos Solos Lateríticos não é somente devido ao desenvolvimento de produtos de hidratação do cimento mais igualmente da cristalinização de produtos formados pelas reações entre o cimento e a Caulinita (ISTED, 1990).

Autret (1983) refere-se em seus estudos sobre os Solos Lateríticos Pedregulhosos tratados com cimento a partir de três temas principais: estudos das variações das propriedades mecânicas, o aumento da resistência em função do tempo e do comportamento em relação à fadiga. As principais conclusões que o autor chegou são:

Resistência à compressão

A resistência à compressão simples obtida após sete dias de cura, com 3 à 5% de cimento, é variável segundo o material e se situa para os melhores a um nível comparável aos de agregados convencionais com cimento e de areias para os mais fracos.

Resistência à tração – Ensaio Lobo Carneiro: Ensaio brasileiro

A resistência á tração obtida quando da realização do ensaio brasileiro, é igual a 10% da resistência a compressão simples.

✓ Características de molhagem

Para as amostras dadas: pode-se observar:

- O teor de água influi na resistência à compressão, que passa por um valor máximo para um teor de água ligeiramente inferior ao ótimo determinado com a realização do ensaio de Proctor Modificado e que decresce fortemente para valores superiores;

- a resistência à compressão decresce fortemente com o grau de compactação obtido para o teor ótimo do Proctor Modificado;

- no intervalo usual de dosagem com cimento, as características $d_{m\acute{a}x}$ e $h_{\acute{o}tima}$ relativas a um teor de cimento são praticamente idênticos aqueles do material natural.

Características de agregados lateríticos

A resistência à compressão de um Solo Laterítico Pedregulhoso não necessariamente está relacionada, de maneira simples, às características do agregado natural: $d_{m\acute{a}x}$, $h_{\acute{o}tima}$, índice de plasticidade, granulometria inerente ao tamanho inferior a 80 μm ou à fração argilosa inferior à 2 μm , produto de uma dessas frações pelo índice de plasticidade.

Um Solo Laterítico Pedregulhoso tratado com cimento tem um comportamento análogo a um agregado cimentado com exceção dois fatores:

- sua resistência à compressão simples para teores de cimento da mesma ordem geralmente é mais baixa;

- e sua resistência à compressão parece aumentar mais lentamente com o tempo.

O aumento da RCS em função do tempo

Estudos indicam que a resistência à compressão de um Solo Lateríticos Pedregulhoso Tratado com cimento cresce durante um período de seis meses, nitidamente mais lentamente que um agregado cimentado mais de uma maneira que pode ser diferente de uma amostra à outra.

2.7 Estudos da UFCG sobre Solos Lateríticos relacionados ao tema da pesquisa

A partir da década de setenta no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA/UFCG) tiveram início várias pesquisas sobre Solos Tropicais da Região do Nordeste do Brasil. Os

estudos, até hoje em andamento, estão relacionados à Classificação e as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas com vistas a utilização destes em obras de pavimentação e de construção civil. A seguir serão descritos de forma resumida alguns estudos sobre o tema que se destacaram no Brasil:

- Estudos das propriedades físicas, mecânicas e químicas/mineralógicas de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) utilizado na pavimentação do Complexo Aeroportuário da Grande Natal-RN/NE. Quintans (2008). Orientador: John Kennedy G. Rodrigues, UFCG.

- Estudo da durabilidade de concretos e argamassa através de RAA em agregados convencionais da região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas. Souza (2007). Orientador: Milton Bezerra Chagas, Filho, UFCG.

- Uso de um sistema de informação geográfica em gerência de pavimentos construídos com Solos Lateríticos, Palhano (2000). Orientador: John Kennedy G. Rodrigues, UFPB.

- Estabilização de Solos Lateríticos com cal: avaliação por um processo de cura acelerado. Vilarim (1995). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.

- Influência da energia térmica em propriedades mecânicas e físicas de agregados lateríticos utilizados em concretos betuminosos. Mozinho (1994). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.

- Avaliação do efeito da cal na resistência ao cisalhamento dos Solos Lateríticos Souza (1993). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.

- Solos Lateríticos estabilizados com cimento através da metodologia ABCP e DNER. Cunha, (1992). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.

- Avaliação estrutural de um pavimento flexível de base constituída de Solo Laterítico através de ensaios deflectométricos e pressiométricos. Rodrigues, (1992). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.

- Plasticidade de Solos Lateríticos: métodos de ensaios e efeitos da temperatura de secagem. Silveira, (1984). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.

- Estabilidade de Solos Lateríticos da região Nordeste do Brasil com cimento.V. Filho, (1985). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.

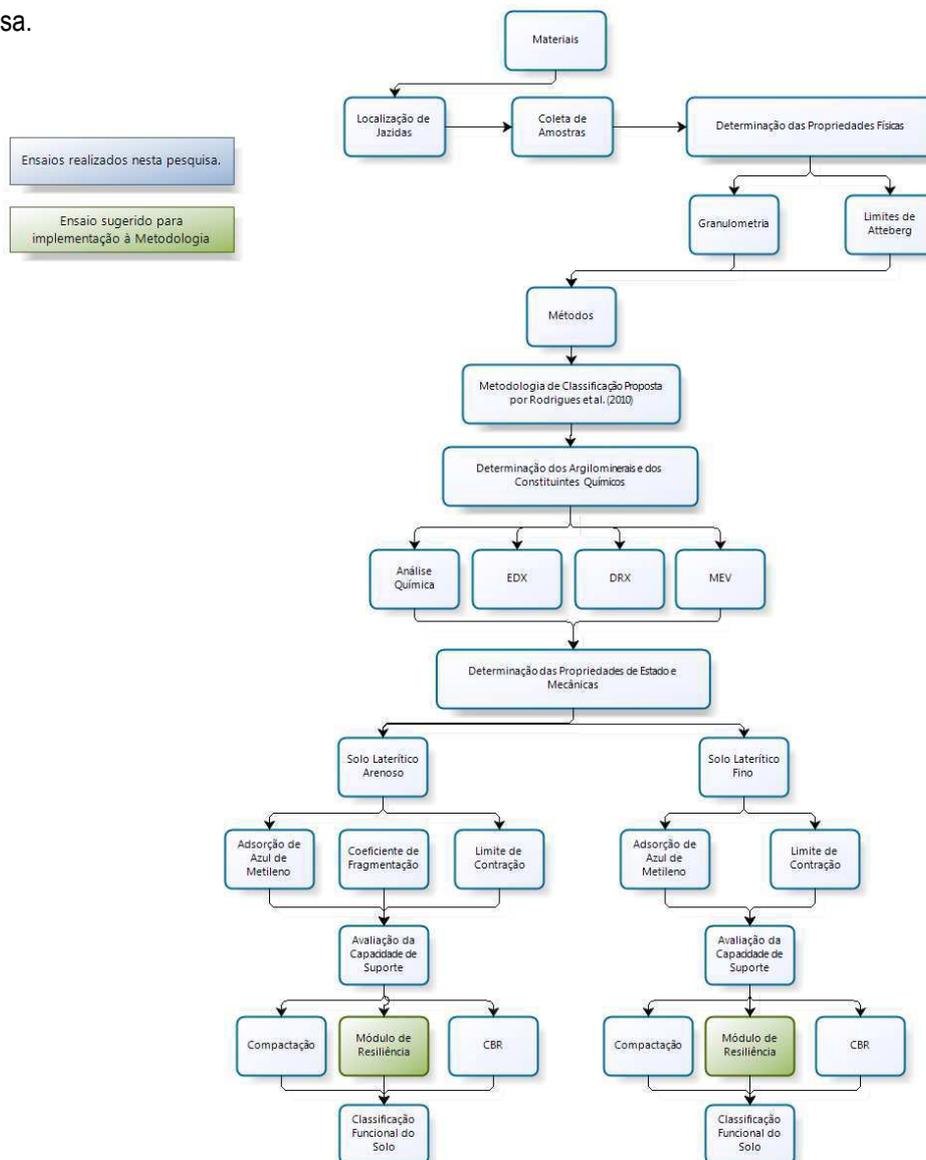
- Resistência à compressão simples para Solos Lateríticos: avaliação da metodologia e influência dos efeitos da temperatura de secagem e energia mecânica. Diniz, (1984). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.

- Influência da qualidade de cal na estabilização de Solos Lateríticos. Souto Maior, (1983). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.
- Índice de Suporte Califórnia de Solos Lateríticos: avaliação da metodologia e influência dos efeitos das energias térmica e mecânica. V. Costa, (1983). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.
- Localização e descrição de várias jazidas de Solos Lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil. Martins, (1983). Orientador: João B.Q. de Carvalho, UFPB.
- Estudos sobre a reatividade a cal de Solos Lateríticos visando sua estabilização: aplicação a um Solo Laterítico de Nova Floresta – Estado da Paraíba. Lima, (1983). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.
- Estabilização dos Solos Lateríticos da região NE com emulsão asfáltica catiônica. Araújo, (1982). Orientador: Heber C. Ferreira, UFPB.
- Granulometria dos Solos Lateríticos: metodologia, efeitos das energias térmica e mecânica e relação com a composição química mineralógica. Lima, (1983). Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFPB.
- Influência das energias térmicas e mecânicas em propriedades de alguns Solos Lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil. Camapum, (1981). Orientador: João B.Q. de Carvalho, UFPB.
- Contribuição ao estudo da permeabilidade e das características mecânica de um Solo Laterítico estabilizado com cimento Braga, (1979). Orientador: J. J. Crispel, UFPB.
- Estudo do comportamento mecânico de um Solo Laterítico compactado e submetido a estado de tensões triaxiais. Quintans, (1979). Orientador: J.J. Crispel, UFPB.
- A influência da cal nas propriedades de engenharia de Solos Lateríticos. Ferro, (1979). Orientador: J. G. Cabrera, UFPB.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é descrito o programa experimental desenvolvido durante a pesquisa, onde são apresentados os aspectos referentes aos materiais selecionados e aos métodos e especificações empregados para a realização dos ensaios. No Fluxograma 3.1 está inserida a sequência de atividades realizadas durante a fase experimental da pesquisa.



Fluxograma 3.1 – Sequência de atividades realizadas durante a pesquisa

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados ensaios nos Laboratórios de Engenharia de Pavimentos, de Caracterização de Materiais e de Análises Mineraias, campus I da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

3.1 Materiais

Os critérios de escolha dos materiais foram baseados no objetivo da pesquisa, bem como na solução proposta durante o seu desenvolvimento.

3.1.1 Localização das Jazidas

As três jazidas escolhidas para este estudo se localizam na região Nordeste do país, nos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Piauí. Estas, por sua vez, foram escolhidas em função do conhecimento prévio das características dos seus materiais e de estudos prévios sobre a localização geográfica e geologia da região.

Jazida C - Rio Grande do Norte

Localizada na região metropolitana de Natal, a jazida C, em São Gonçalo do Amarante, fica na área de implantação do Aeroporto Internacional de Cargas e Passageiros de Natal – RN, onde está sendo executada a Pista de Pousos e Decolagens e os Pátios de Taxiamento ($5^{\circ}45'57.30''$ S e $35^{\circ}23'40.59''$ O).

A localização geográfica da jazida é conforme informação da ferramenta Google Earth, visualizada na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Jazida C – Rio Grande do Norte [Fonte: Quintans, 2008]

A área é explorada para utilização em sub-base, e o solo classificado pedologicamente como latossolo vermelho-amarelo distrófico, tem aparência arenosa. Foi coletada uma amostra de aproximadamente 300 kg, que foi utilizada em todos os ensaios de acordo com as especificações normativas.

Jazida RC - Pernambuco

Localizada na região metropolitana de Recife, a jazida RC, utilizado como material de sub-base de pavimento rodoviário (Figura 3.2). Foi coletada uma amostra de aproximadamente 300 kg, que foi utilizada em todos os ensaios de acordo com as especificações normativas.

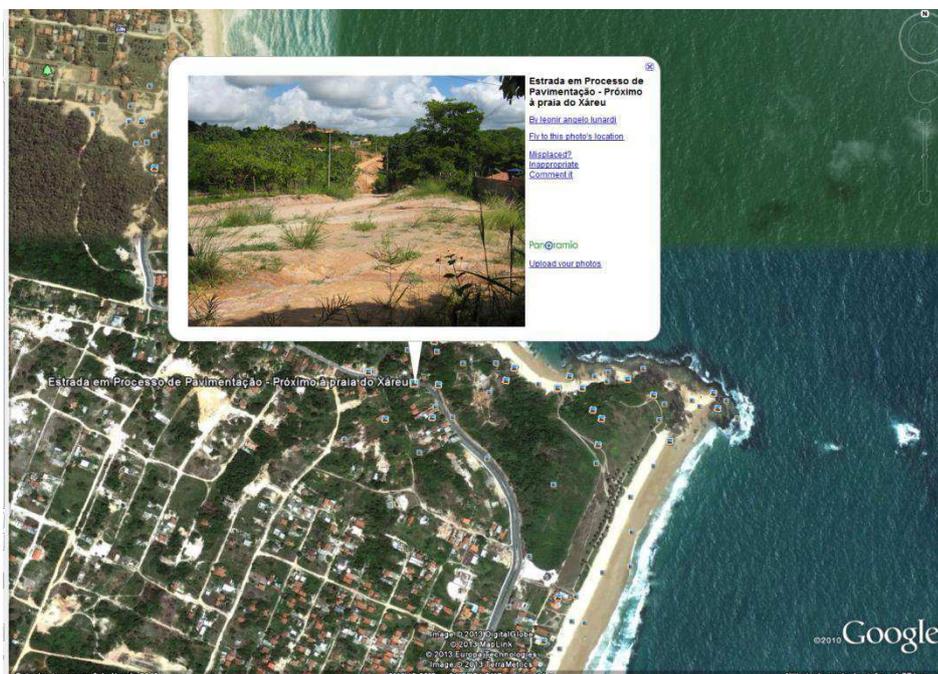


Figura 3.2 – Jazida RC – Região Metropolitana de Recife – Praia de ITAPUAMA [Fonte: Google Earth]

Jazida PIC - Piauí

A terceira e última jazida denominada PIC - Piauí, localiza-se a 70 km da cidade de Picos, às margens da BR 316, entre os municípios de Inhuma e Ipiranga (Figura 3.3).

A jazida PIC está desativada, mas foi utilizada como fonte de material para sub-base da rodovia BR 316. Com coordenadas 6°44'31.05" S e 41°43'24.80" O. A mesma apresenta um solo diferente dos dois outros pesquisados, de coloração avermelhada e com concreções lateríticas. Sua composição mineralógica também é diferenciada.

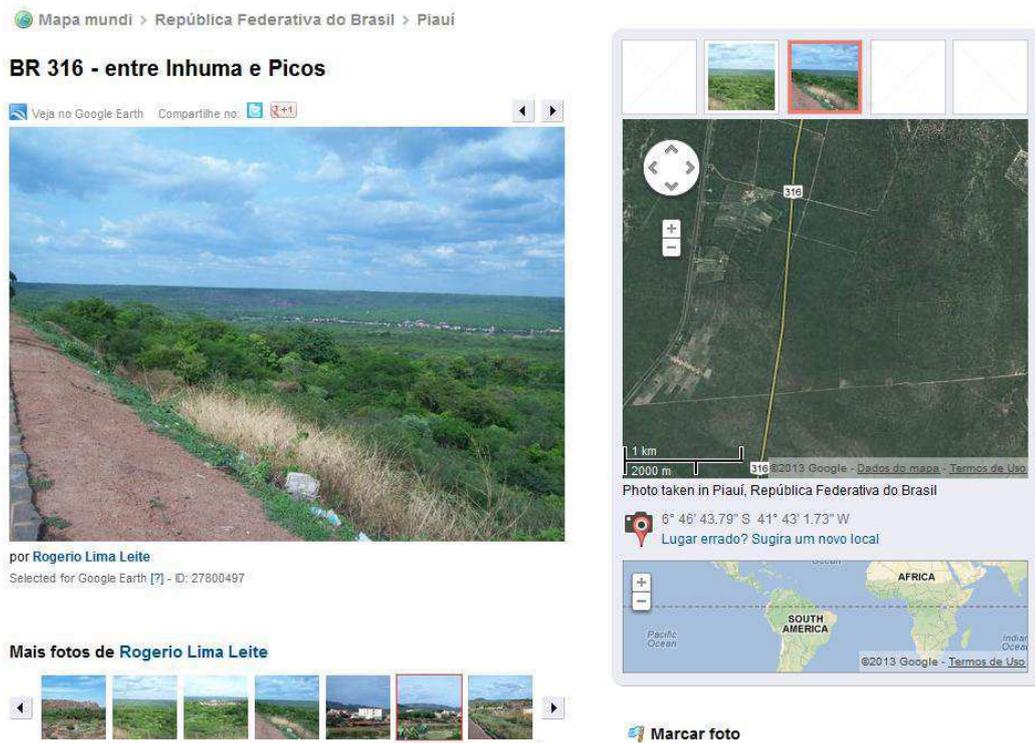


Figura 3.3 – Jazida PIC – Região as margens da BR 316 [Fonte: Google Earth]

3.1.2 Coleta de Amostras

A coleta de amostras dos solos foi realizada com auxílio de pá e picareta sendo colocadas em sacos de nylon fechados. Em seguida foram transportados para o laboratório de solos da UFCG. A extração do solo foi feita baseada na metodologia para obtenção de uma amostra deformada, onde são conservados todos os constituintes minerais do solo, inclusive, se possível, sua umidade natural, mas não se conserva sua estrutura original, alterada pelo processo de extração com o alívio das tensões do solo.

3.1.3 Determinação das Propriedades Físicas

Granulometria por peneiramento

Pelas normas brasileiras da ABNT vigente, NBR 7181/1984 Solo – Análise Granulométrica, foi usada a série normal de peneiras, e o solo foi preparado segundo a norma NBR 6457/1986 Amostras de Solo – Preparação para ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Pela metodologia francesa, a norma utilizada foi NF P 94-056/1996 - Analyse Granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage.

Quarteamento da Amostra: Transportadas em sacos de nylon, ao iniciar o processo de preparação da amostra, unificou-se as massas contidas em alguns sacos e deixou-se em bandejas, secando ao ar, livre de

fonte de calor, para que a umidade chegasse próxima da higroscópica. Procedeu-se o quarteramento da amostra, que consiste em separar e unificar a amostra, tornando-a homogênea, como exibe a Figura 3.4.



Figura 3.4 – Quarteramento de Amostra para Ensaio

Série Normal de Peneiras e Série Francesa: De acordo com a norma brasileira, a série de peneiras é definida na ABNT NBR 7181/1984, e compreende as peneiras #2 pol, #1 ½ pol, #1 pol, #3/4 pol, #3/8 pol, #4, #10, #40, #80, #200. Pela Norma Francesa, as peneiras utilizadas são: #2 pol, #1 ½ pol, #1 pol, #3/4 pol, #1/2 pol, #3/8 pol, #4, #5, #10, #16, #20, #30, #40, #70, #200. (Figura 3.5).

Obtenção dos Resultados: As percentagens retidas em cada uma das peneiras são postas em um gráfico de Percentagens versus Peneiras e geram uma curva, que é utilizada para determinar características do solo como uniformidade, continuidade e granulometria (Figura 3.5).

Classificação dos Solos: a norma brasileira define a classe de um solo apenas a partir da granulometria, sem considerar outros parâmetros, como capacidade de suporte ou área específica ou mesmo plasticidade. Classifica o solo em quatro grandes grupos: argilas, siltes, areias e pedregulhos. Já a norma francesa utiliza parâmetros como o coeficiente de fragmentação e degradabilidade além de limites de Atterberg, azul de metileno, resistência mecânica, umidade higroscópica e teor de elementos solúveis para classificar os solos, em cinco classes, A, B, C, D e R.

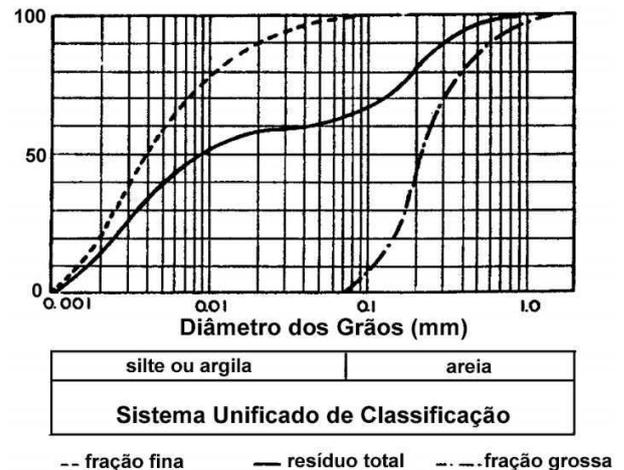


Figura 3.5 – Série de Peneiras e curva granulométrica

Limites de Atteberg

Os limites de liquidez e plasticidade são valores que auxiliam na caracterização do solo dando parâmetros de comportamento quando da utilização desse material. Apesar da sua natureza fundamentalmente empírica, estes valores são de grande importância em aplicações de Mecânica dos Solos, além de serem necessários a vários métodos de classificação conhecidos, como o sistema de classificação AASHO (M 145) e como o USCS (Unified Soil Classification System). As normas brasileiras de referência são ABNT NBR 6459/1984 Solos – Determinação do limite de liquidez e ABNT NBR 7180/1984 Solos – Determinação do limite de plasticidade. A norma francesa compila os ensaios em um único documento, NF P 94-051/1993 Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atteberg. Por não apresentar diferenças substanciais diante das normas brasileiras, optou-se por não repetir os ensaios segundo a norma francesa.

3.2 Métodos

3.2.1 Metodologia da Classificação

Como procedimento de pesquisa adotamos a sequência de atividades sugerida para a realização de ensaios e Classificação de Solos Lateríticos desenvolvida por Rodrigues et al. (2010). Em função disto e por se tratar de um procedimento novo, a seguir, será descrito o procedimento em detalhes.

Princípios gerais

O método visa estabelecer os princípios fundamentais de denominação, de descrição e de classificação dos Solos Lateríticos, sobre a base das características do material e de seus componentes, os mais

correntemente utilizados, destinados à execução em camadas de rodovias de baixo custo em países de clima tropical e subtropical.

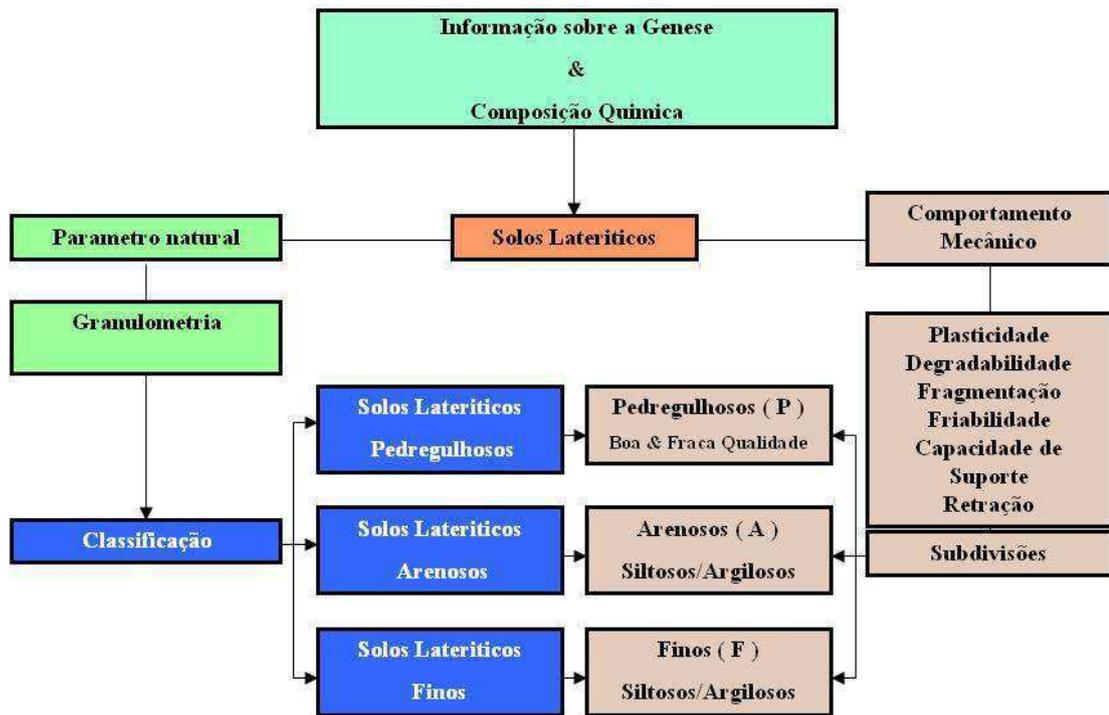
Como definição, os Solos Lateríticos: "... são produtos do Processo de Laterização que é constituído de uma alteração muito forte dos minerais de rochas com a eliminação quase total de base alcalinas e alcalino-terrosas, e parcialmente da sílica; uma decomposição forte de matéria orgânica; uma acumulação mais ou menos importante de hidróxidos e óxidos de Fe, Al, Ti, Mn. Acrescido a isto, podemos incluir a graus diversos, os processos acessórios de lixiviação, de acumulação de matéria orgânica e de endurecimento".

A composição química e a gênese dos Solos Lateríticos constituem as bases fundamentais desta proposta de classificação. Os ensaios de análise química convencional, o ensaio de difração de Raios-X e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são suficientes para identificar os minerais constitutivos desses solos.

No método dois sujeitos principais são considerados: em primeiro lugar, a estrutura metaestável dos Solos Lateríticos, sensíveis as variações dos níveis de energia térmica e mecânica (influência do pré-tratamento dos materiais), e, em segundo lugar, as propriedades físicas e mineralógicas (a influência da composição química do solo) com relação à plasticidade, à dureza e à capacidade de suporte.

A partir das informações sobre a gênese e da composição química, em pressupondo que os Solos são necessariamente Lateríticos de origem, a classificação é realizada em função da granulometria (diâmetro de $80\mu\text{m}$ e de 2mm). Em seguida, as subdivisões em subclasses são estabelecidas e em se baseando sobre as atividades das frações finas das amostras de solo (o valor do Azul de Metileno) e os comportamentos mecânicos a partir dos resultados de ensaios de Degradabilidade, de Fragmentação, de Friabilidade, de Limite de Retração e de capacidade de Suporte (CBR). No fluxograma 3.2 é ilustrada a sequência metodológica com os critérios adotados para o Sistema de Classificação Proposto.

São denominados de Solos Lateríticos Pedregulhosos (SLP), de Solos Lateríticos Arenosos (SLA) e Solos Lateríticos Finos (SLF), enquanto que as subdivisões indicam em termos de classificação: Argilosos (A) ; Siltosos (S).



Fluxograma 3.2 - Critérios de proposição de classificação dos Solos Lateríticos

[Fonte: Rodrigues et al., 2010]

Parâmetros utilizados para a Classificação dos Solos Lateríticos

Os parâmetros utilizados podem ser agrupados em duas categorias: os parâmetros naturais e os parâmetros de estado do comportamento mecânico dos solos.

Eles são sempre determinados sobre a fração menor que 50 mm de diâmetro que é a fração susceptível de ser identificada pelos ensaios realizados em laboratórios usuais no meio rodoviário.

✓ Parâmetros naturais

Eles são inerentes as características intrínsecas e que, para os Solos Lateríticos, podem variar no tempo em função de diferentes etapas de manipulação ou preparação que são submetidos as amostras de solo durante a execução dos serviços em obras (pré-tratamento).

A granulometria

Os parâmetros utilizados relacionados à granulometria são: o diâmetro máximo, D_{max} , o tamanho de $80\mu m$ e o tamanho de 2mm (Normas de referência: NF P 94-056 et NF P 94-057; ISO/TS 17892-4/AC1:2005).

✓ O D_{max}

Esta é a dimensão máxima dos grandes elementos contidos no solo. Esse parâmetro é determinado como medida exploratória pelos laboratoristas que o utilizam em obras de aterros e, notadamente, para avaliar as espessuras das camadas elementares e as condições de mistura eventuais com Ligantes Hidráulicos. É igualmente um parâmetro importante a ser conhecido para apreciação da representatividade dos ensaios realizados em laboratório. Entretanto, a determinação desse parâmetro pode tolerar certa imprecisão e, em regra geral, uma estimativa visual é suficiente.

✓ O diâmetro de $80\mu\text{m}$

Este parâmetro permite distinguir os solos ricos em finos e em larga medida pode ser usado para avaliar a sensibilidade do solo à água.

✓ Limite inferior

Esse limite é fixado em 30% e representa o limite no qual o comportamento do solo pode ser considerado como influenciado significativamente pela fração fina ($80\mu\text{m}$).

✓ O diâmetro de 2mm

Esse parâmetro permite estabelecer uma distinção entre os solos com tendência arenosa e os solos com tendência pedregulhosa.

✓ Limite inferior

Esse limite é fixado em 30%, onde são definidos os solos com tendência arenosa e abaixo do qual são considerados solos com tendência pedregulhosa.

Parâmetros de estado do comportamento mecânico

Esses parâmetros são levados em consideração para avaliar a possível utilização dos Solos Lateríticos em camadas de rodovias. Eles distinguem os materiais cuja fração granular é susceptível de resistir ao tráfego e que dessa forma podem ser utilizados tais como em construção de camadas de sub-base, no subleito e em camadas de base, e seus riscos de ruptura, de expansão, de retração e de fragmentação para se transformar por consequência e são utilizáveis em estado natural sem disposições específicas (estabilização e/ou tratamentos).

Os parâmetros de comportamento mecânico considerados na classificação são: para a plasticidade da fração fina: o valor de Azul de Metileno (VBS); para a retração da fração fina: o Limite de Retração/Contração

(LC), para a degradabilidade da fração pedregulhosa: o Coeficiente de Degradabilidade (DG); para a fragmentação da fração Pedregulhosa: o Coeficiente de Fragmentação (FR); para friabilidade das areias: O Coeficiente de Friabilidade das Areias (FS); para a Capacidade de Suporte: O valor do CBR.

- ✓ A plasticidade
- ✓ O valor de Azul de Metileno (VBS)

Trata-se de um parâmetro que permite a caracterização da plasticidade ou argilidade do solo. Esse parâmetro representa a quantidade de Azul de Metileno podendo ser adsorvida sobre as superfícies externas e internas das partículas do solo, ou de outra maneira pode-se dizer que ele representa uma grandeza diretamente relacionada à superfície específica do solo.

Em um solo, o valor do Azul de Metileno é antes de tudo a informação mais direta sobre a superfície das partículas contidas na sua fração argilosa ($\leq 2\text{mm}$) que determina, então, sua superfície específica, podemos considerar ainda que o valor do Azul de Metileno, VBS, exprime globalmente a quantidade e a qualidade (ou atividade) de argila contida no solo.

Na prática, determina-se o VBS a partir do ensaio da mancha de Azul de Metileno sobre a fração menor que 2 mm. O valor encontrado é então relacionado com a fração menor que 50 μm por uma regra de proporcionalidade. Este último é denominado o valor de Azul de Metileno do solo (Norma de referência: NF P 94-068; EN 933-9 (2009-12-01)).

O VBS se exprime em gramas de azul para 100 gramas de solo.

- ✓ Limites

- 1,5: limite que distingue os Solos Lateríticos Arenosos-Siltosos dos Solos Lateríticos Arenosos-Argilosos;

- 3,0: limite que distingue os Solos Lateríticos Finos-Siltosos dos Solos Lateríticos Finos-Argilosos.

O limite de Retração/Contração (LC)

O Limite de Contração constitui o teor de água ponderado convencionalmente de perda de umidade de um solo levado abaixo do qual o volume da amostra de solo é suposta invariável.

O ensaio é realizado sobre amostras de solos com tamanhos de 400 μm . Pode ser realizado de duas maneiras:

- verificando-se a variação volumétrica em função da secagem de uma amostra de solo em estufa. O Limite de Retração é representado pelo teor de água onde não ocorre mais variação volumétrica que possa ser medida (Norma de referência: NF XP P 94-060-1);

- determinando-se a deformação axial e o teor de água correspondente, de um corpo de prova de material, medida em diferentes estados de sua secagem sob condições ambiente (Norma de referência: NF XP P 94-060-2).

✓ Limite inferior

- 15%: limite que distingue os Solos Lateríticos Arenosos-siltosos com retração moderada;

- 20%: limite que distingue os Solos Lateríticos Finos-Siltosos com retração moderada.

✓ Coeficiente de Degradabilidade (DG)

O Coeficiente de Degradabilidade é um parâmetro representativo do comportamento de alguns materiais rochosos se traduzindo por uma evolução continua de suas características geotécnicas (granulometria, plasticidade, entre outros) com relação às quais observadas imediatamente após sua extração. Esta evolução é imputável à ação combinada dos agentes climáticos ou hidrológicos (ciclos de embebição e de secagem) e de tensões mecânicas súbitas. Ela conduz, neste caso dos materiais rochosos considerados como degradáveis, a uma redução mais ou menos importante e ininterrupta, características mecânicas e geométricas de obras nas quais os solos são utilizados.

O ensaio consiste em determinar a redução do D_{10} de uma amostra de granulometria conhecida submetida a quatro ciclos de embebição e de secagem convencionais (DG - Norma de referência: NF P94-067).

Esse parâmetro é levado em consideração para avaliar a utilização possível dos Solos Lateríticos Pedregulhosos em camadas de rodovias de baixo custo. Ele é utilizado para distinguir dois tipos de materiais: Solos Lateríticos Pedregulhosos de Boa Qualidade (SLPB) e de Fraca Qualidade (SLPF) com relação à degradabilidade dos materiais ensaiados.

✓ Limite Inferior

- 7: limite que distingue os Solos Lateríticos Pedregulhosos pouco degradáveis.

✓ Coeficiente de Fragmentação (FR)

O Coeficiente de Fragmentação constitui um dos parâmetros representativos do comportamento de alguns materiais característicos e por apresentar uma evolução continua de sua granulometria depois de serem

extraídos e utilizados em obras e que, para qualquer deles, possuírem ainda estas propriedades durante a vida útil das obras.

O ensaio consiste em determinar a redução do D_{10} de uma amostra de granulometria conhecida submetida a uma compactação convencional (Normas de referência: NF P94-066).

Esse parâmetro é levado em consideração para avaliar a utilização de Solos Lateríticos Pedregulhosos em camadas de rodovias de baixo custo. Associado ao Coeficiente de Degradabilidade, ele distingue dois tipos de materiais: Solos Lateríticos Pedregulhosos de Boa Qualidade (SLPB) e Solos Lateríticos Pedregulhosos de Fraca Qualidade (SLPF) com relação à degradabilidade e à fragmentação, respectivamente, dos materiais ensaiados.

✓ Limite Inferior

- 7: limite que distingue os Solos Lateríticos Pedregulhosos pouco Fragmentáveis.

✓ Coeficiente de Friabilidade das Areias (FS)

O Coeficiente de Friabilidade das Areias constitui um dos parâmetros representativos da resistência à fragmentação das areias. O ensaio consiste em medir a evolução da granulometria das areias produzida por fragmentação em um cilindro em rotação com o auxílio de uma carga em presença de água (Norma de referência: NF P18-576).

✓ Limite Inferior

- 60%: limite que distingue os Solos Lateríticos Arenosos Siltosos (SLAL) poucos friáveis.

✓ O valor do CBR

O valor do CBR não constitui uma característica intrínseca de um solo. De fato, sua grandeza depende, em parte, da natureza do solo (granulometria, plasticidade), propriedades que dependem do teor de água, de sua massa volumétrica seca e do seu grau de saturação, que são características de estado. Depende, ainda, das condições em que foram executados em campo.

✓ Inferior à

- 10%: limite que distingue os Solos Lateríticos Finos com uma capacidade de suporte moderada (Proctor Intermediário);

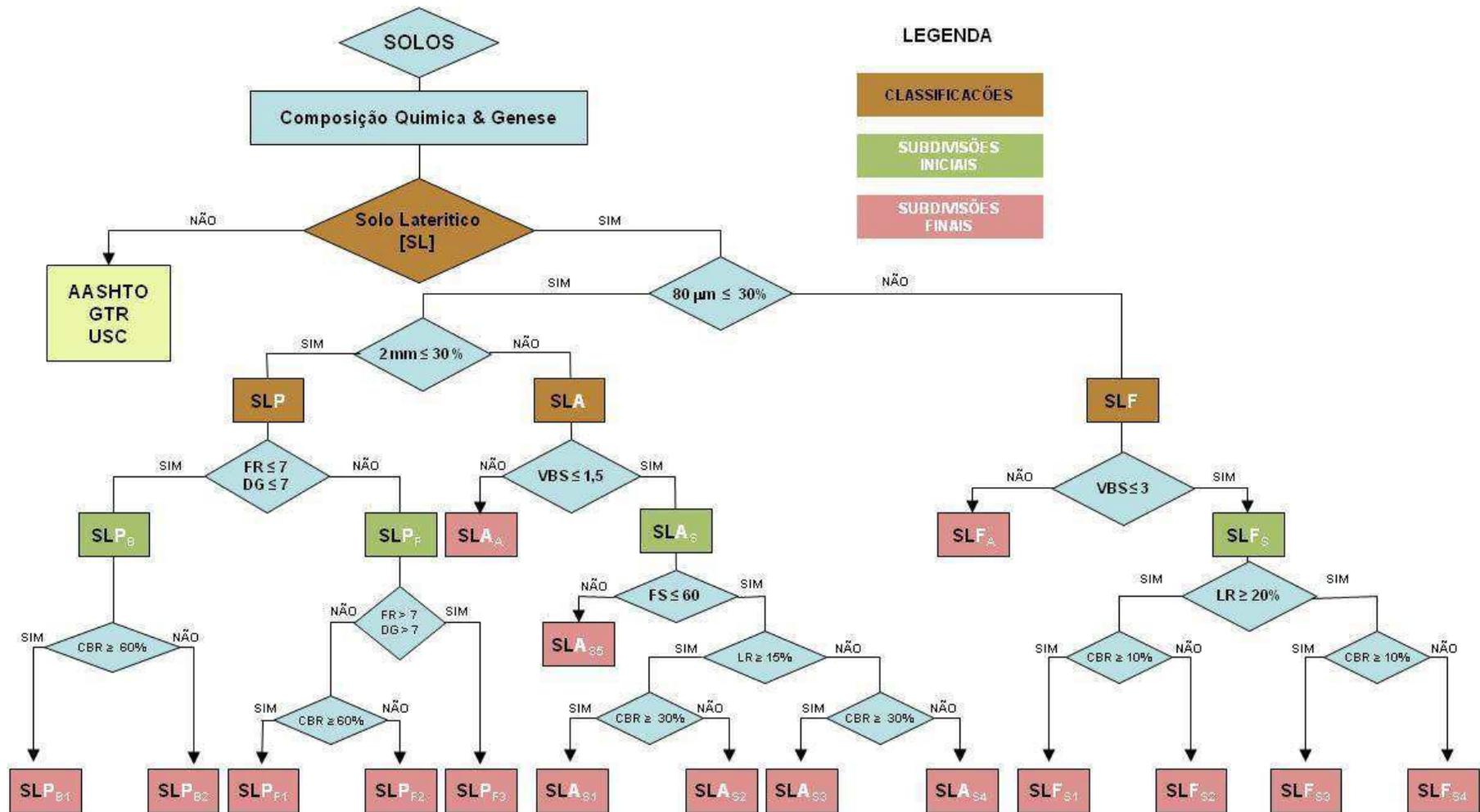
- ✓ Superior à
 - 10%: limite que distingue os Solos Lateríticos Finos com uma capacidade de suporte boa (Proctor Intermediário);
- ✓ Limite inferior
 - 30%: limite que distingue os Solos Lateríticos Pedregulhosos e os Solos Lateríticos Arenosos com uma capacidade de suporte moderada (Proctor Intermediário);
- ✓ Entre
 - 30% e 60%: limites que distinguem os Solos Lateríticos Pedregulhosos com uma capacidade de suporte moderada e os Solos Lateríticos Arenosos com uma boa capacidade de suporte (Proctor Intermediário);
- ✓ Superior à
 - 60 %: limite que distingue os Solos Lateríticos Pedregulhosos de boa capacidade de suporte (Proctor Intermediário).

Fluxograma de Classificação

No Fluxograma 3.3 estão apresentados os critérios, as denominações e os valores dos parâmetros naturais e de comportamento mecânico que são utilizados para classificar os Solos Lateríticos, de acordo com Rodrigues et al., 2010.

A Figura 3.6 é constituída de um quadro simplificado de classificação dos Solos Lateríticos, sugerido pelo mesmo autor. As denominações aparecem da esquerda para direita em função das propriedades físicas e mecânicas dos solos, assim como sua utilização na construção de camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito para rodovias de baixo custo.

Esta proposição de Classificação é aplicável à construção com Solos Lateríticos de camadas de rodovias de baixo custo para suportar um tráfego inferior á 10^6 para uma carga de 13 toneladas por eixo.



Fluxograma 3.3 - Critérios, as denominações e os parâmetros de classificação dos Solos Lateríticos [Fonte: Rodrigues et al., 2010]

SOLOS LATERITICOS [SL] [Composição Química e Genese]																		
80 µm ≤ 30%										80 µm > 30%								
2 mm ≤ 30%					2 mm > 30%													
Solos Lateríticos Pedregulhosos [SLP]					Solos Lateríticos Arenosos [SLA]					Solos Lateríticos Finos [SLF]								
FR ≤ 7 & DG ≤ 7		FR > 7 OU DG > 7			VBS ≤ 1,5					VBS ≤ 3								
		FR > 7 & DG > 7			FS ≤ 60		FS ≤ 60			FS > 60		VBS > 1,5		LC ≥ 20%		LC < 20%		VBS > 3
CBR ≥ 60%		CBR < 60%	CBR ≥ 30%		CBR < 30%	CBR ≥ 30%		CBR < 30%	CBR ≥ 30%		CBR < 30%	CBR ≥ 10%		CBR < 10%	CBR ≥ 10%		CBR < 10%	
SLP _{B1}	SLP _{B2}	SLP _{F1}	SLP _{F2}	SLP _{F3}	SLA _{S1}	SLA _{S2}	SLA _{S3}	SLA _{S4}	SLA _{S5}	SLA _A	SLF _{S1}	SLF _{S2}	SLF _{S3}	SLF _{S4}	SLF _A			
Sem Estabilização	ESTABILIZADO				Sem Estabilização	ESTABILIZADO					Sem Estabilização	ESTABILIZADO						
BASE [CBR ≥ 60%]					SUB-BASE [CBR ≥ 30% ; LR ≥ 15%]					REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 20%]								
Sem Estabilização CBR ≥ 30%	ESTABILIZADO				Sem Estabilização CBR ≥ 10%	ESTABILIZADO					REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 20%]							
SUB-BASE [CBR ≥ 30%]					REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 15%]					REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 20%]								
<p>Observações: Trafego = N < 10⁶ Peso do eixo simples < 13 Tonnes SLP = Solos Lateríticos Pedregulhosos; SLA = Solos Lateríticos Arenosos; SLF = Solos Lateríticos Finos. S = Siltosos; A = Argilosos F = Fraca qualidade; B = Boa qualidade. FR = Coeficiente de Fragmentação; DG = Coeficiente de Degradabilidade; FS = Coeficiente de Friabilidade; LR = Limite de Contração; VBS = Valor do azul de Metileno.</p>																		

Figura 3.6 - Proposta de Classificação Universal dos Solos Lateríticos para utilização em camadas de rodovias de baixo custo em países de clima tropical e subtropical

[Fonte: Rodrigues et al., 2010]

3.2.2 Determinação dos Argilominerais e dos Constituintes Químicos

Para confirmar a origem dos solos estudados, procedeu-se a execução de ensaios de caracterização química e mineralógica das amostras, que não estão diretamente envolvidos na classificação do solo pelo método proposto por Rodrigues et al. (2010), mas que são de suma importância para a constatação de sua aplicabilidade.

✓ Análise Química

Para obtenção dos constituintes químicos do solo, foi realizado o ensaio de Análise Química Elementar do solo em seu estado natural.

✓ EDX

A composição química das amostras foi determinada por fluorescência de raios X, para isso, foi utilizado um espectrômetro modelo EDX-720 da Shimadzu. Para realizar as análises foi aplicado o método semi-quantitativo (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Espectrômetro modelo EDX-720 da Shimadzu

As amostras em forma de pó foram inicialmente compactadas e prensadas a 3t, moldadas em forma de pastilhas de 3mm de espessura e 25mm de diâmetro. Em seguida foram colocadas em estufa a 100 °C por 24 horas para remoção de umidade. Estas amostras foram submetidas à vácuo no espectrômetro.

Os resultados obtidos são apresentados na forma dos óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes.

✓ Difração de Raio-X – DRX

Para a identificação dos argilominerais, presentes na fração fina das amostras pesquisadas, foi utilizado o ensaio de difração de raios-x.

Da mesma forma que se diferem as impressões digitais de uma pessoa para outra, sabe-se que a relação das distâncias interplanares e das intensidades de difração não se repetem para as centenas de milhares de estruturas cristalinas, ou seja, de um material para outro. Assim, é possível identificar os argilominerais que compõem a amostra de solo.

Foi utilizado um difratômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação $K\alpha$ de Cu, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de 2° por minuto, com varredura de 5° a 60° (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Difratômetro Shimadzu XRD-6000

✓ Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação, até 300.000 vezes, e resolução. Para este trabalho buscou-se imagens com ampliação de 1.000 a 20.000 vezes. O equipamento utilizado foi o MEV SHMADZU SSX-550 (Figura 3.9). A amostra foi diluída em acetona e metalizada á ouro. Outros cuidados foram tomados, como o processo de vácuo, que precedeu a metalização superficial da amostra (Figura 3.10). O material ensaiado foi limitado à sua fração fina, menor que 0,075mm.



Figura 3.9 - MEV SHIMADZU SSX-550



Figura 3.10 – Preparação da amostra – metalização à ouro

3.2.3 Determinação das Propriedades de Estado e Mecânicas

Para classificar os solos pesquisados segundo a nova proposta, vários ensaios foram realizados, à medida que iam sendo solicitados pela tabela do método proposto por Rodrigues et al. (2010).

Com o objetivo de comparar os métodos utilizados no Brasil com a metodologia francesa, realizou-se a classificação segundo as duas normatizações. Assim, os ensaios de Granulometria, Índice de Suporte Califórnia e Compactação, foram realizados pelas normas francesas e brasileiras, e comparados, verificando-se a variação de resultados e sua interferência na classificação dos solos.

✓ Coeficiente de Fragmentação

Regulamentado pela norma francesa NF P 94-066/1992 Sol: reconnaissance et essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux, o Coeficiente de Fragmentação constitui um dos parâmetros representativos de um solo, se traduzindo por uma evolução contínua da sua granulometria da extração até a sua implementação e, para alguns deles, ainda continua ao longo da vida das obras. Na prática, é a relação entre o diâmetro das partículas de solo antes e depois do processo de apiloamento em condições controladas.

✓ Coeficiente de Degradabilidade

O coeficiente de degradabilidade compara a granulometria de um solo antes e depois de passar por quatro ciclos de embebição e secagem. O solo, previamente preparado, é cadastrado granulometricamente e então é imerso em água por 8h e depois em estufa a 105°C por 16h. Após o quarto ciclo, o solo é novamente analisado granulometricamente e o coeficiente de degradabilidade é representado em função dessa variação granulométrica.

O parâmetro é definido pela norma francesa NF P 94-067/1992 Sols: reconnaissance et essais – Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux, e tenta avaliar a degradabilidade da fração pedregulhosa de um solo, em presença de água.

✓ Azul de Metileno

Azul de metileno, ou cloridrato de metiltiamina, é um corante orgânico adsorvível pelo solo. Quando em meio aquoso, forma uma camada mono-molecular sobre a superfície dos argilominerais, permitindo dessa forma, conhecidas as dimensões da molécula estudada, conhecer a área total recoberta, ou seja, permite a determinação da superfície específica dos argilominerais que compõem o solo.

A norma francesa NF P 94-068/1998 Sols: Reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux apresenta o método de ensaio, o resultado é expresso em g de azul por 100g de solo.

✓ Coeficiente de Friabilidade

A friabilidade do solo pode ser definida como a tendência de uma massa de solo de se desfazer em menores tamanhos de agregados sob aplicação de uma carga, segundo Tarmina et. al. (2008) apud Watts & Dexter (1998).

A norma francesa de referência é a NF P 18-576/1990 Granulats – Mesure Du coefficient de friabilité des sables, e define o aparelho micro-deval para avaliação da susceptibilidade da amostra à abrasão e ao choque, porém, utilizou-se nesta pesquisa o equipamento tipo Moinho de bolas, no intuito de reproduzir o efeito do micro-deval. O ensaio é realizado com a fração areia do solo, de granulometria entre 0,2 e 2,0mm.

Além disso, a norma francesa determina a carga de $2500g \pm 4g$, essa carga foi respeitada, utilizando, porém, esferas de diâmetro 30mm, quando o normatizado eram bolas de diâmetros 10mm, 18mm e 30mm (Figura 3.11)

A adaptação foi necessária em virtude da indisponibilidade dos equipamentos normatizados para este ensaio. Ressalta-se, entretanto, que todos os ajustes foram feitos para que a velocidade de rotação e o diâmetro das esferas fossem equivalentes ao proposto pela referida norma.



Figura 3.11 – Ensaio de Friabilidade da Fração Arenosa

✓ Limite de Contração

O Limite de contração representa o teor de umidade limite entre os estados sólido e semi-sólido, ou seja, o teor de umidade no qual o solo não mais varia de volume ao secar, ou ainda, o teor de umidade que ainda ocupa os vazios de um solo colocado a secar em estufa até não mais contrair.

O método de obtenção do limite de contração é definido na ABNT NBR 7183/1982 Determinação do limite e relação de contração de solos, e neste trabalho foi obtido diretamente através do método do volume de mercúrio deslocado.

O parâmetro é utilizado para classificar solos finos e arenosos e também é definido pela norma francesa NF P 94-060-1 Sols: reconnaissance et essais – Essai de dessiccation. Como os dois métodos, brasileiro e francês são muito semelhantes, optou-se, então, por não repetir o ensaio e aceitar o resultado da norma brasileira (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Ensaio de Limite de Contração

✓ Compactação

O ensaio de compactação tem por objetivo determinar a densidade máxima de um solo, que varia em virtude da umidade. A partir deste ensaio, que é definido pela norma ABNT NBR 7182/1986 Solos – Ensaio de

Compactação, é possível definir a umidade ótima para utilização de um solo em bases e sub-bases de pavimentos. A norma francesa que rege o ensaio é NF P 94-093 Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol – Essai Proctor normal (600knm/m^3) – Essai Proctor modifié (2700knm/m^3).

Curva de Compactação: É o gráfico obtido traçando-se os dados de umidade no eixo vertical e de densidade no eixo horizontal de um sistema de coordenadas cartesianas. O ponto de inflexão do gráfico define a umidade ótima, que corresponde à densidade máxima de compactação do solo.

Energias de Compactação: Para as normas brasileiras, existem três energias de compactação, a energia Proctor normal, a energia Proctor intermediária e energia Proctor modificada. Todas são definidas pelo número de golpes de um cilindro padrão sobre uma camada de solo. Para os padrões franceses, a energias também são três, sendo duas principais, energia Proctor normal e Proctor modifié, e uma terceira, definida como Proctor réduite, e representa 25% da energia Proctor normal. A correspondência entre as energias das normas francesa e brasileira é bem semelhante, variando por um ou dois golpes. (Figura 3.13)



Figura 3.13 – Ensaio de Compactação

✓ Índice de Suporte Califórnia

A capacidade de suporte de um solo é uma característica não intrínseca do material, depende, entretanto da natureza do solo, do tratamento dispensado, da energia de compactação e da umidade e grau de saturação.

O ensaio resulta em uma porcentagem que compara o material ensaiado a uma brita graduada de elevada resistência cuja capacidade de suporte é definida como máxima, ou seja, 100%.

A norma brasileira que regula o ensaio é a ABNT NBR 9895/1987 Solos – Índice de Suporte Califórnia. A energia de compactação utilizada foi Proctor normal, e três amostras foram moldadas e imersas. Pela norma francesa, o ensaio acontece como define a NF P94-078 Sols: Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat, e são feitas três moldagens, cada uma com uma das energias de compactação possíveis, e o CBR é determinado pela situação menos favorável à utilização do solo, levando-se em conta todas as questões estruturais envolvidas, além das condições de controle tecnológico (Figura 3.14).

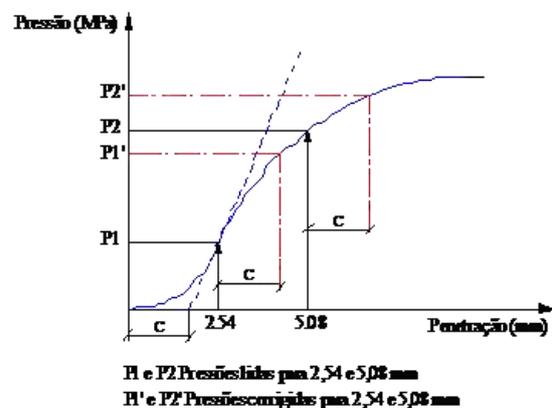
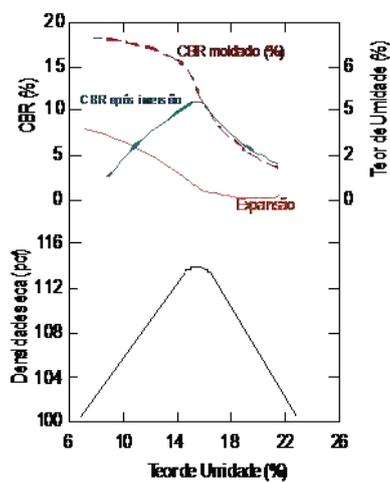


Figura 3.14 – Ensaio de CBR

✓ Módulo de Resiliência

O ensaio objetiva simular os esforços impostos a um pavimento em uso, e dessa forma determina o comportamento de um material após a aplicação de repetidos ciclos de carga e descarga.

Durante o ensaio de carga repetida o material se deforma a cada ciclo. Cessado o carregamento, apenas uma parte dessa deformação se mantém, sendo considerada uma deformação permanente ou plástica (ϵ_p) (Santos, 2009).

O ensaio foi realizado segundo a norma DNIT 134/2010 – ME Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, com uso do equipamento SIEMBS – Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos, versão 1.1, fabricado pela empresa ARMTEC – Tecnologia em Robótica.

Todos os ensaios de Módulos de Resiliência (M_R) foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS (Figura 3.15; Figura 3.16).



Figura 3.15 – Módulo de Resiliência – preparação da amostra - UFS



Figura 3.16 – Módulo de Resiliência –preparação e execução do ensaio - UFS

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados da fase experimental, descritos no Capítulo 3, obtidos com a realização dos ensaios de caracterização das propriedades físicas, mineralógicas e mecânicas das amostras de solo, e a classificação segundo a proposta de Rodrigues et al.(2010).

4.1 Determinação das Propriedades Físicas

Os resultados da distribuição dos tamanhos das partículas do solo, granulometria, obtidos por peneiramento estão no Anexo A.

As curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 4.1, na Figura 4.2 e na Figura 4.3, aos pares, representativas dos dois métodos utilizados.

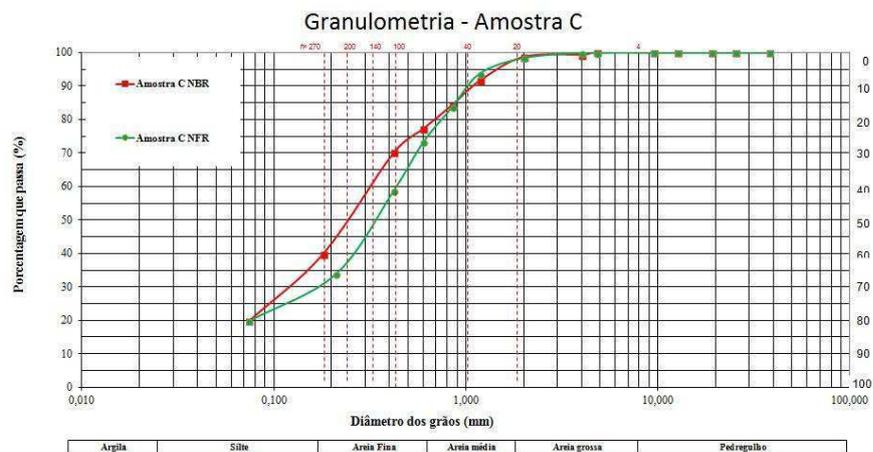


Figura 4.1 – Curva Granulométrica da Amostra C

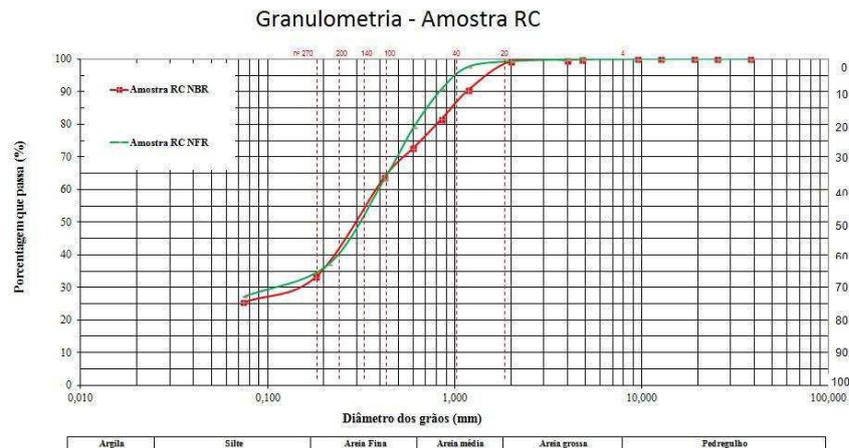


Figura 4.2 – Curva Granulométrica da Amostra RC

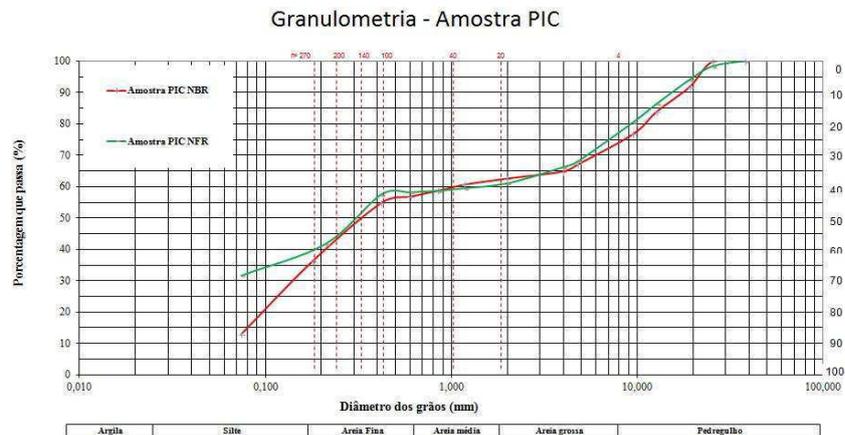


Figura 4.3 – Curva Granulométrica da Amostra PIC

Dos três solos estudados dois apresentaram claramente características arenosas, a Amostra C e a Amostra RC. A Amostra PIC, apesar de ter uma alta porcentagem de grãos retidos nas peneiras acima de 2mm (38%), apresentou um alto teor de finos e fragilidade nas concreções (torrões). A execução do ensaio pela norma brasileira para análise granulométrica de solos (ABNT - NBR 7181) não foi capaz de detectar essa peculiaridade.

Os resultados obtidos no ensaio realizado pela norma francesa, por sua vez, apontaram a tendência argilosa do material, devido à lavagem de todas as frações do solo em peneira de malha 0,08mm e posterior peneiramento, permitindo que as partículas finas fracamente aderidas aos grãos de maiores dimensões fossem diluídas e separadas, diminuindo assim o tamanho médio das partículas do solo.

Os parâmetros mais importantes para a classificação proposta por Rodrigues et al. (2010) são os percentuais de partículas com diâmetro menor que 80µm e menor que 2mm. Os resultados relativos às dimensões citadas estão inseridos na Tabela 4.1.

Segundo a metodologia proposta por Rodrigues et al (2010) e, baseado nos resultados dos ensaios de granulometria, podemos inferir que nenhuma das amostras é de Solos Pedregulhosos. As amostras C, e RC foram classificadas como Solos Arenosos e a Amostra PIC foi classificada como Solo Arenoso e Argiloso segundo resultados obtidos nos ensaios de granulometria preconizados pelas normas brasileira e francesa, respectivamente.

Tabela 4.1- Distribuição dos tamanhos das partículas do solo Norma Brasileira e Francesa

	Norma Brasileira		Norma Francesa	
Amostra C - Diâmetro Médio das Partículas (mm)	2,00	0,08	2,00	0,08
% que passa	98,76	19,91	98,41	19,85
Amostra RC - Diâmetro Médio das Partículas (mm)	2,00	0,08	2,00	0,08
% que passa	99,31	25,56	99,25	27,17
Amostra PIC - Diâmetro Médio das Partículas (mm)	2,00	0,08	2,00	0,08
% que passa	62,65	13,03	57,00	30,49

Os ensaios que determinam os Limites de Atteberg resultaram nos dados apresentados na Tabela 4.2. Os resultados indicam que os solos da Amostra C e PIC apresentam como materiais medianamente plásticos, o que pode sugerir o emprego de correções (estabilização química ou granulométrica) quanto a sua plasticidade, para o uso em pavimentação.

Tabela 4.2 – Limites de Liquidez e Plasticidade e Índice de Plasticidade das amostras do solos estudados

	LL	LP	IP
Amostra C	26,8%	18,3%	8,5%
Amostra RC	NL	NP	--
Amostra PIC	27,1%	18,5%	8,6%

4.2 Determinação dos Argilominerais e dos Constituintes Químicos

Na análise química convencional realizada foram detectados os constituintes químicos, os quais estão inseridos de forma resumida na Tabela 4.3.

Os resultados da análise química assemelham-se aos compostos químicos apontados no ensaio de EDX, conforme mostra a Tabela 4.4.

Os principais constituintes minerais dos solos finos são os argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. De acordo com Borba (1981), os elementos Si, Fe, e Al são considerados os elementos químicos mais importantes dos Solos Lateríticos. Observam-se, nos resultados contidos na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4, que os maiores percentuais na composição química do solo, estão nas seguintes formas: SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃. Isto corrobora como sendo possível inferir: “os resultados da análise química elementar e de EDX indicam que o material analisado tem características de um Solo Laterítico”, para as três amostras pesquisadas.

Tabela 4.3 – Constituintes químicos das amostras dos solos estudados – Análise Química Convencional

Amostra C			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
PR	12,06%	Perda ao Rubro	
SiO ₂	42,60%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	38,85%	Óxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	5,50%	Óxido Férrico	Hematita
Na ₂ O	0,89%	Óxido de Sódio	

Amostra RC			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
PR	12,21%	Perda ao Rubro	
SiO ₂	41,54%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	33,93%	Óxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	8,52%	Óxido Férrico	Hematita
Na ₂ O	0,53%	Óxido de Sódio	

Amostra PIC			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
PR	9,32%	Perda ao Rubro	
SiO ₂	49,06%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	25,28%	Óxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	11,57%	Óxido Férrico	Hematita
Na ₂ O	0,64%	Óxido de Sódio	
K ₂ O	0,22%	Óxido de Potássio	Óxido de Potássio

Tabela 4.4 – Constituintes químicos das amostras dos solos estudados - Espectrometria

Amostra C			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
SiO ₂	50,42%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	45,10%	Trióxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	3,38%	Óxido Férrico	Hematita
TiO ₂	0,89%	Dióxido de Titânio	Titânia

Amostra RC			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
SiO ₂	47,48%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	45,99%	Trióxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	5,77%	Óxido Férrico	Hematita
TiO ₂	0,24%	Dióxido de Titânio	Titânia

Amostra PIC			
Composto	Quantidade	Nomenclatura	Nomenclatura Usual
SiO ₂	55,25%	Dióxido de Silício	Sílica/Quartzo
Al ₂ O ₃	35,09%	Trióxido de Alumínio	Alumina
Fe ₂ O ₃	7,13%	Óxido Férrico	Hematita
TiO ₂	1,30%	Dióxido de Titânio	Titânia
K ₂ O	0,76%	Óxido de Potássio	Óxido de Potássio
BaO	0,32%	Óxido de Bário	Barita Calcificada

Os resultados da análise por difração de raios-x dos solos estudados estão apresentados na Figura 4.4, Figura 4.5 e na Figura 4.6. Os picos presentes no difratograma para as três amostras de solos indicam a presença do quartzo (SiO_2) e do argilomineral caulinita ($2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

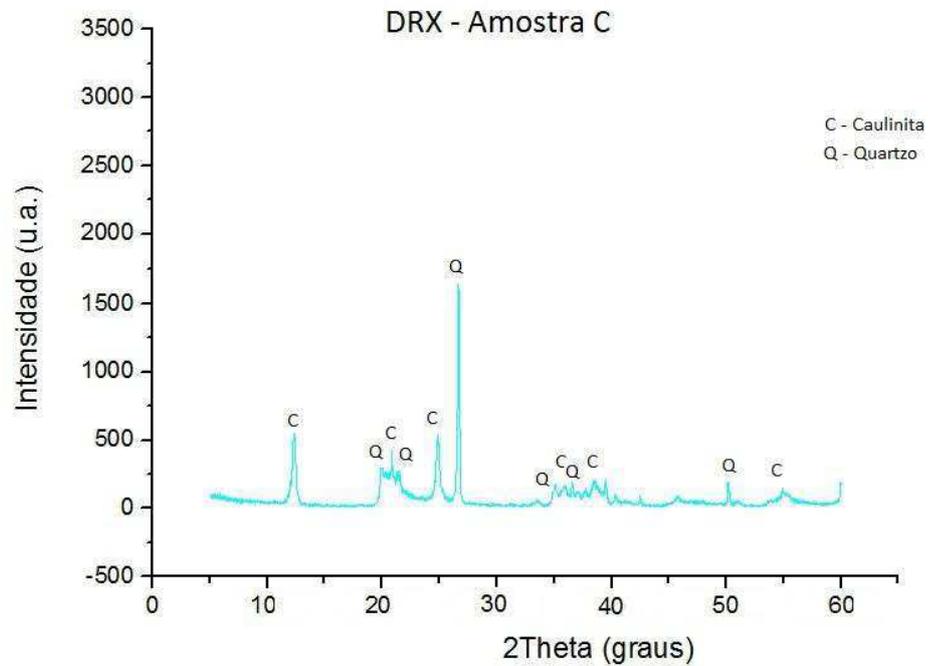


Figura 4.4 – Difração de Raio-X Amostra C

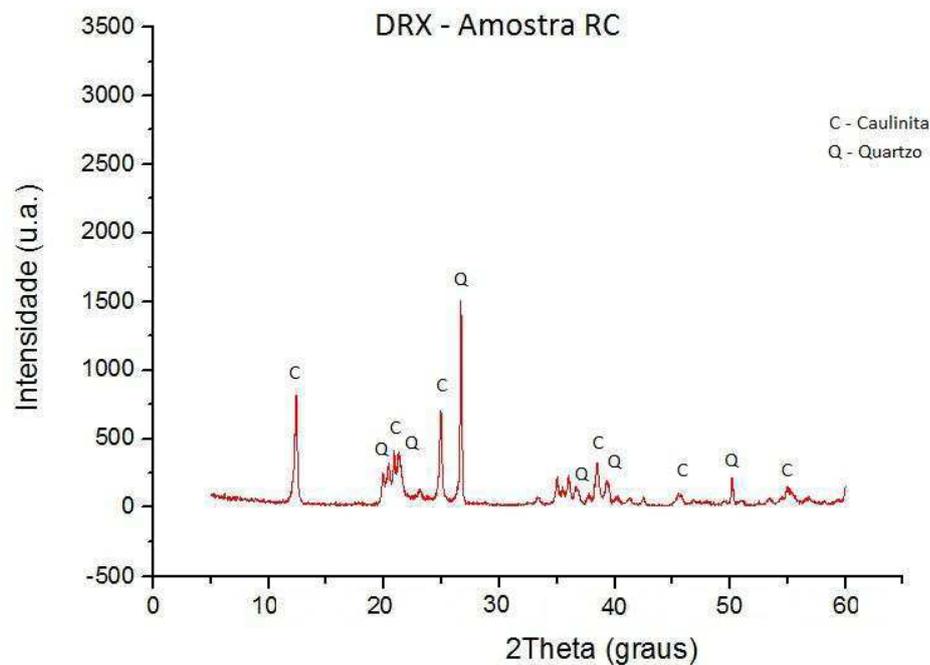


Figura 4.5 – Difração de Raio-X Amostra RC

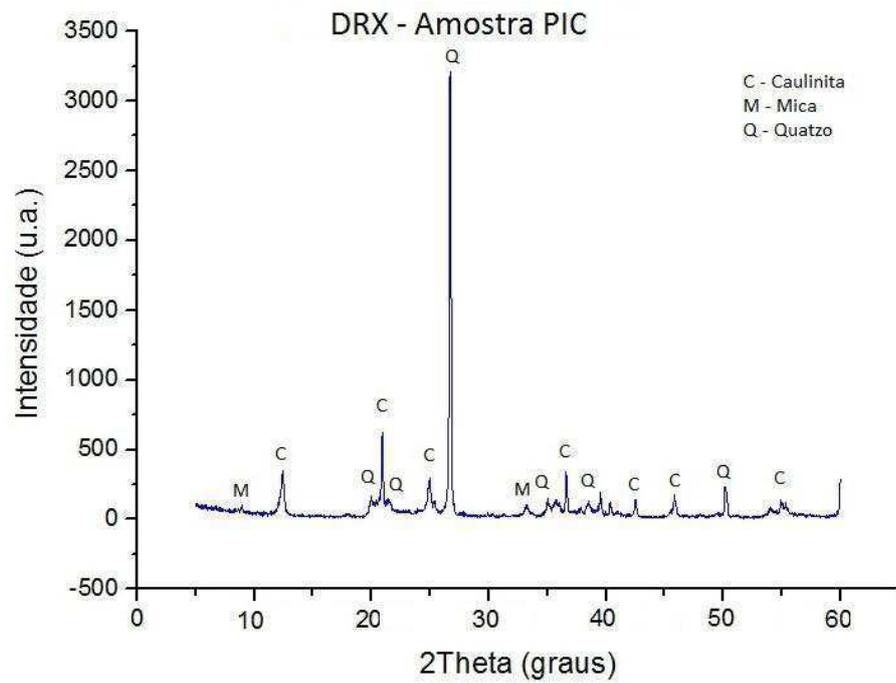


Figura 4.6 – Difração de Raio-X Amostra PIC

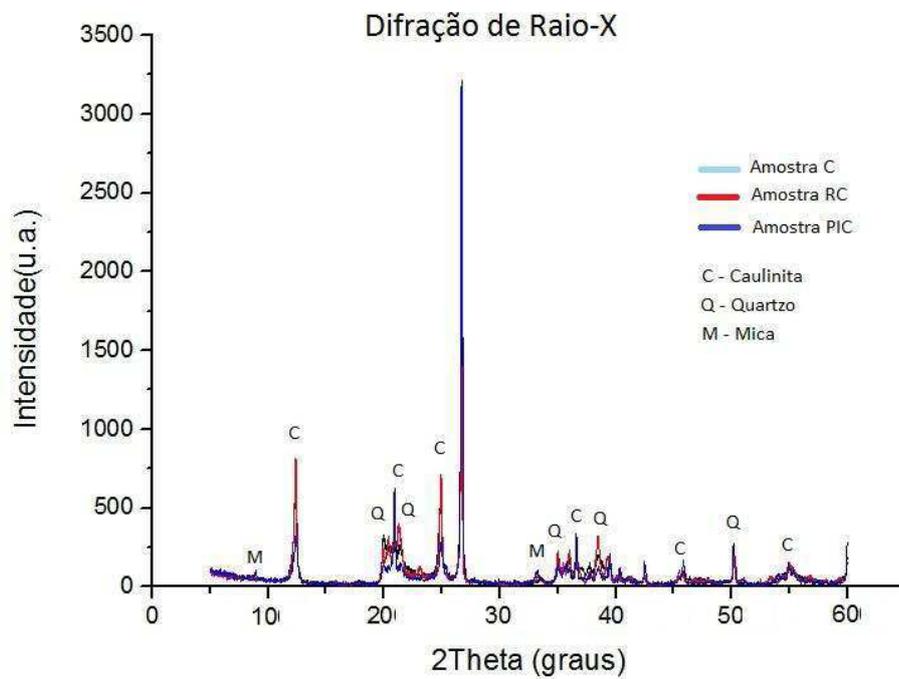


Figura 4.7 – Difração de Raio-X Amostras C, RC e PIC

Segundo Nogami e Villibor (1995), devido ao processo de laterização, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Portanto, os resultados obtidos com o auxílio do ensaio de difração de raios-X indicam que os materiais analisados (Figura 4.7) são Solos Lateríticos. Para a Amostra C, Quintans (2008) já havia detectado em seus estudos esta característica de argilominerais (Figura 4.8). Para a amostra PIC, entretanto, o ensaio denota a presença de Mica, o que pode indicar um solo em processo de laterização ou pouco evoluído.

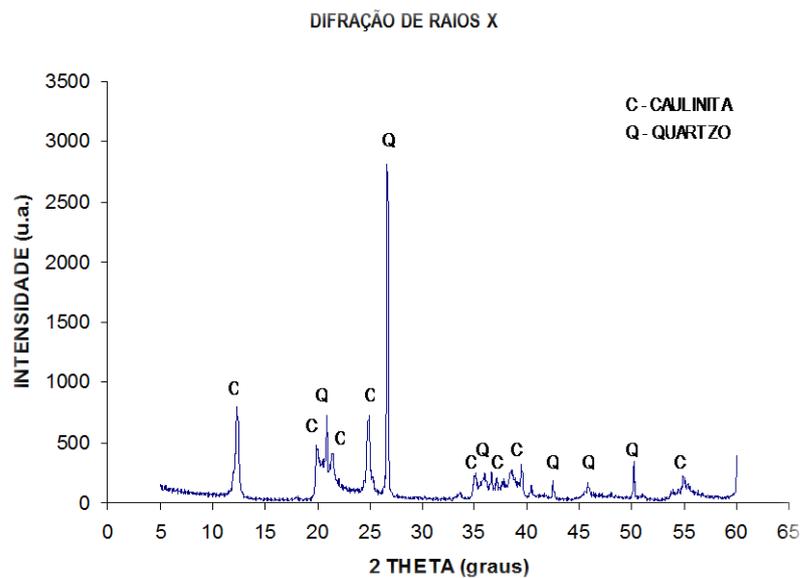


Figura 4.8 - Difração de raios-x Difração de Raio-X Amostra C [Obtida por Quintans, 2008]

As microfotografias das amostras do solo obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) estão apresentadas na Figura 4.9, correspondente à amostra C, na Figura 4.10, correspondente a amostra RC e na Figura 4.11, correspondente à amostra PIC, em ampliações de 1.000, 3.000, 5.000, 10.000 e 20.000 vezes.

Foi possível observar os padrões típicos de um material que sofreu o processo de laterização (característica marcante dos Solos Lateríticos) devido ao seu aspecto cimentado.

A partir das imagens contidas para as três amostras foi identificada a presença nítida do quartzo e novamente ocorrência da camada amorfa de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio envolvendo a caulinita no processo de laterização.

As diferenças observadas entre as imagens da Amostra RC e as imagens as Amostras C e PIC foram causadas provavelmente pela reação do solo ao processo de dispersão da amostra, ou pelas características da fração da amostra analisada. Pelos resultados obtidos no ensaio de MEV não há dúvida de que as três amostras analisadas têm composição química compatível com solos de origem laterítica. No Solo RC observa-se

nitidamente empilhamento do argilomineral Caulinta, com forma Hexagonal, que pode indicar baixo grau de laterização.

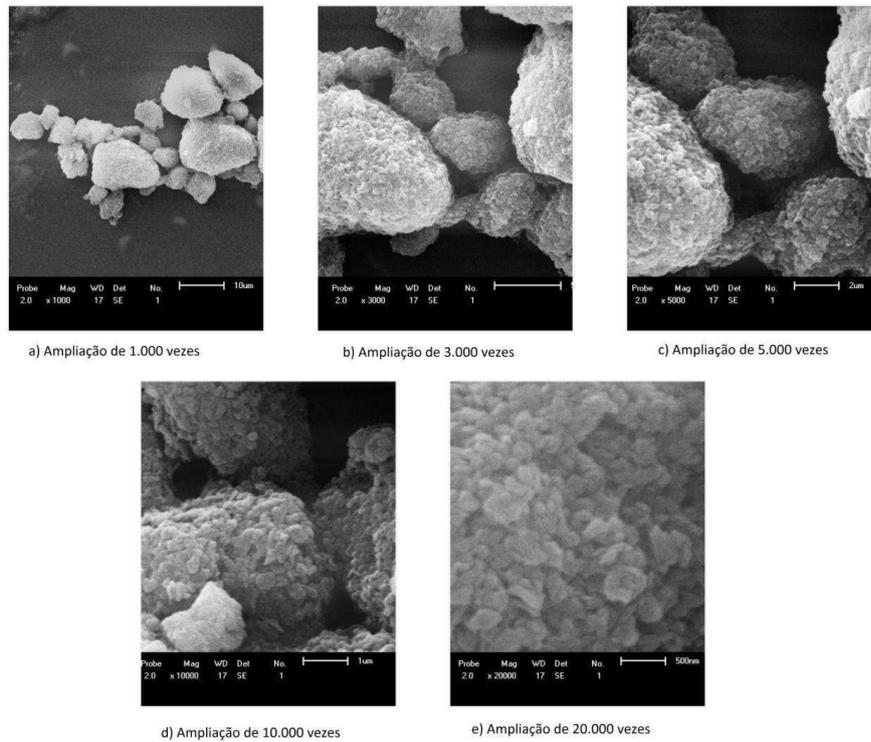


Figura 4.9 – Microfotografias da Amostra C

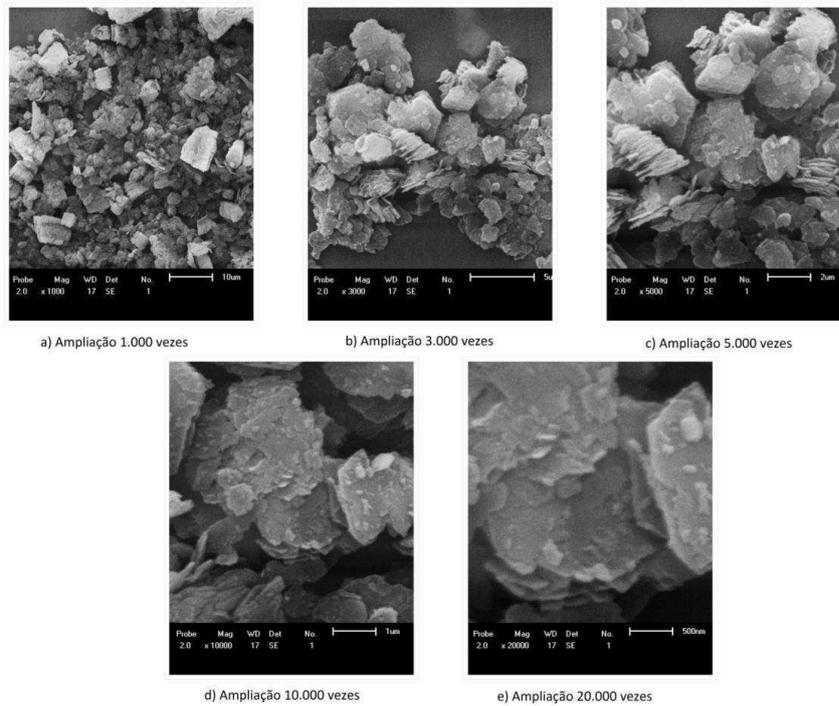


Figura 4.10 – Microfotografias da Amostra RC

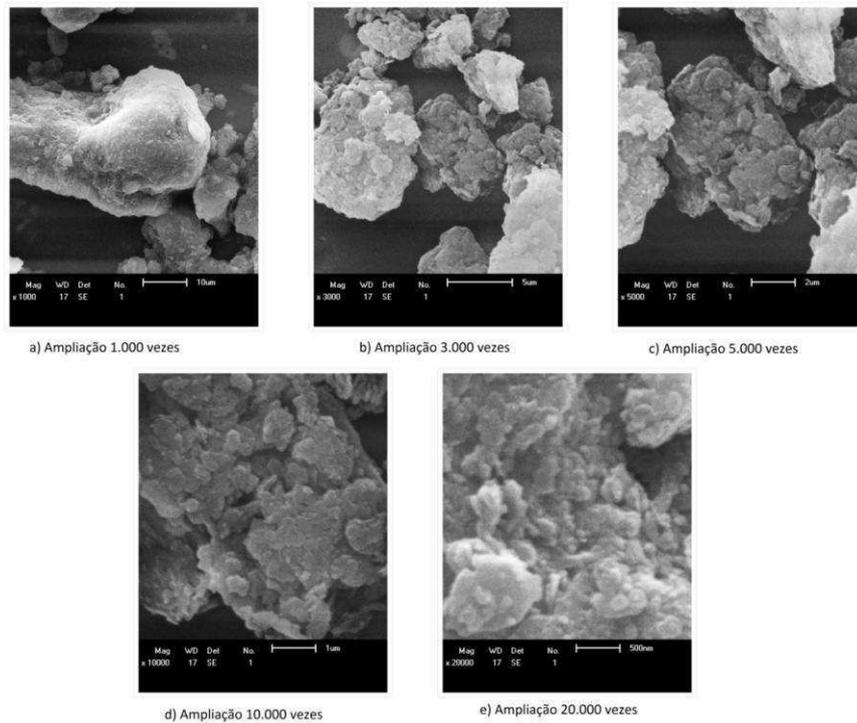


Figura 4.11 – Microfotografias da Amostra PIC

4.3 Determinação das Propriedades de Estado e Mecânicas

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Adsorção de Azul de Metileno, Determinação do Coeficiente de Friabilidade, Limite de Contração, Compactação e Índice de Suporte Califórnia – ISC ou CBR.

4.3.1 Adsorção de Azul de Metileno

Do ensaio da Mancha de Azul de Metileno foi obtido o ponto de viragem para cada uma das amostras conforme apresentado na Figura 4.12.

Para cada uma das amostras de solos foram realizados cálculos de acordo com as equações descritas abaixo, verificando-se que as amostras de solos denominados de C e PIC apresentaram adsorção de Azul de metileno superior a 1,5g/100g de solo, o que denota sua característica argilosa, enquanto que para a amostra do solo RC apresentou índice inferior, ressaltando sua característica siltosa.

Amostra C

$$VBS = \frac{V \cdot 0,01}{m_0} \times 100 = \frac{10 \cdot 0,01}{5} \cdot 10 = 2,0g \text{ de azul de metileno} / 100g \text{ de argila}$$

Amostra RC

$$VBS = \frac{V \cdot 0,01}{m_0} \times 100 = \frac{14,0,01}{5} \cdot 10 = 1,4g \text{ de azul de metileno}/100g \text{ de argila}$$

Amostra PIC

$$VBS = \frac{V \cdot 0,01}{m_0} \times 100 = \frac{10,0,01}{5} \cdot 10 = 2,0g \text{ de azul de metileno}/100g \text{ de argila}$$

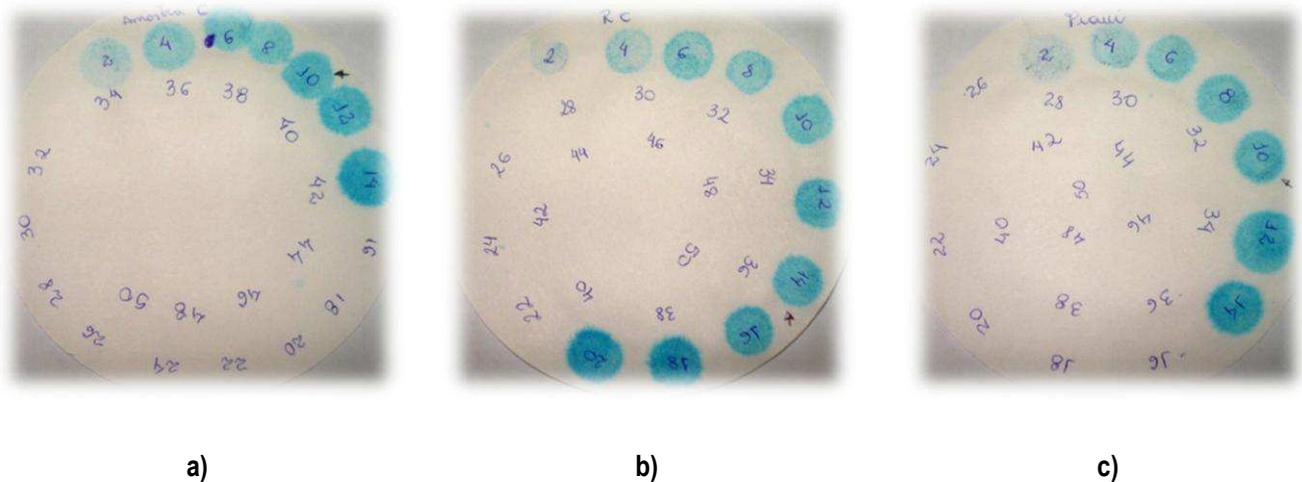


Figura 4.12 – Adsorção de Azul de Metileno Amostras a) C, b) RC e c) PIC

4.3.2 Coeficiente de Friabilidade

Os resultados dos ensaios de Friabilidade indicam que a fração arenosa dos três solos é bastante friável, sendo maior para a amostra de solo denominada PIC, que apresentou grande perda de massa durante o ensaio. A Tabela 4.5 exibe os parâmetros obtidos.

Tabela 4.5 – Coeficiente de Friabilidade da fração Arenosa

	Massa Seca Inicial (g)	Massa Superior a 0,1mm (g)	FS
Jazida C	500,00	341,18	31,8%
Jazida RC	500,00	312,94	37,4%
Jazida PIC	500,00	141,32	71,7%

4.3.3 Limite de Contração

Os resultados do ensaio de Limite de Contração ou Retração, baseado no deslocamento do volume de mercúrio, estão inseridos na Tabela 4.6. Observou-se que as três amostras de solo apresentaram a retração superior a 15%. Em ordem crescente de grandeza, as amostras denominadas RC, C e PIC apresentaram retração/contração significativa devido à presença do argilomineral caulinita.

Estes resultados evidenciam que, a provável utilização destes materiais como camadas de pavimentos deve ser realizada com procedimentos técnicos adequados, ou seja, execução da estabilização granulométrica para minimizar o efeito de retração causado pelo argilomineral caulinita, o que pode causar trincas de reflexão nas camadas superiores do pavimento.

Tabela 4.6 – Limite de Retração/Contração

	Massa da Pastilha Seca (g)	Volume Deslocado de Mercúrio (cm ³)	Densidade Real dos Grãos (g/cm ³)	Limite de Contração
Jazida C	16,92	10,6	2,819	27,1%
Jazida RC	11,19	7,6	2,311	24,6%
Jazida PIC	12,59	9,4	2,521	35,0%

4.3.4 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado como fase inicial do ensaio de CBR, gerando a umidade ótima, a partir da qual foram moldados os corpos de prova para o ensaio da capacidade de suporte (CBR). Os resultados indicam de uma forma lógica, que tanto o teor de umidade quanto a “densidade” do solo seco apresentam variações em função da energia de compactação como já havia observado Quintans (2008) em seu estudo sobre um Solo Laterítico Arenoso Fino (Figura 4.16, Figura 4.13, Figura 4.14, e Figura 4.15).

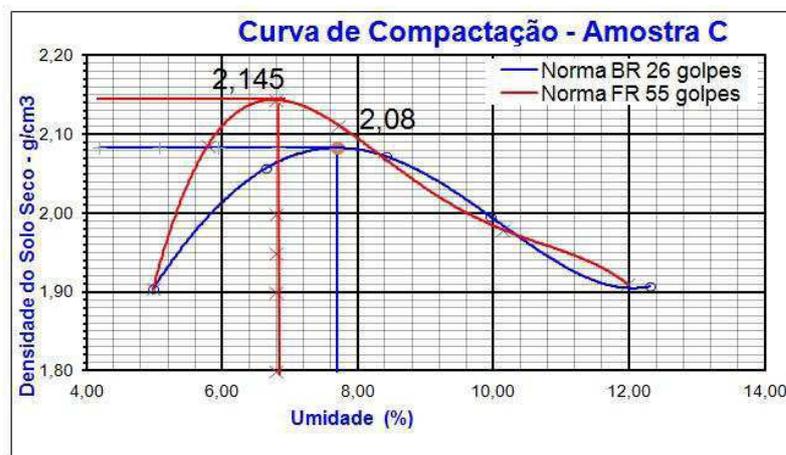


Figura 4.13 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra C

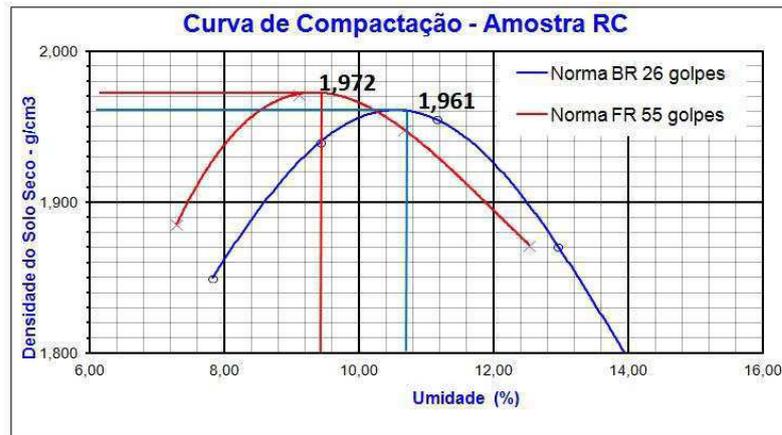


Figura 4.14 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra RC

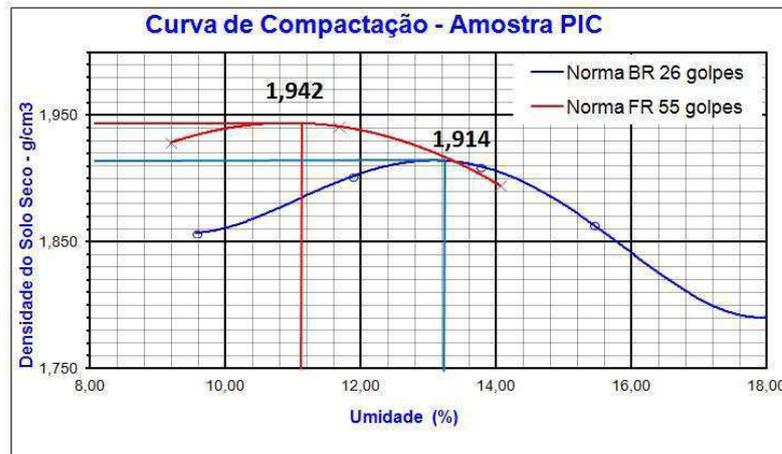


Figura 4.15 – Curvas de Compactação pelas normas brasileira e francesa – Amostra RC

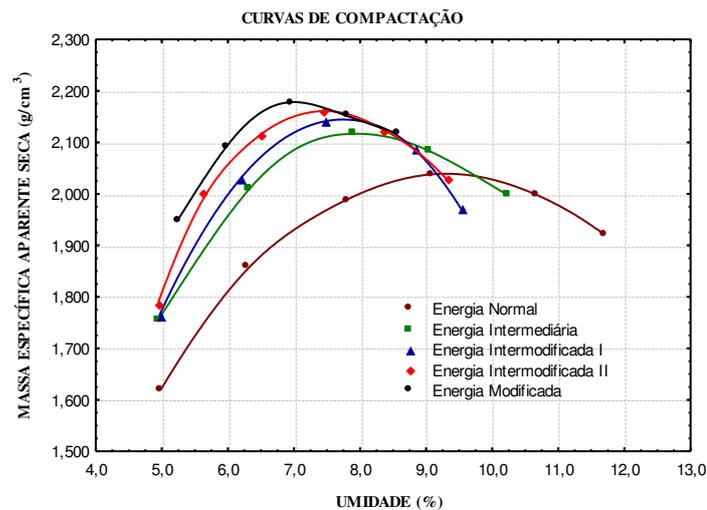


Figura 4.16 – Curvas de compactação do solo nas energias normal, intermediária, intermodificada I, intermodificada II e modificada [Fonte: Quintans, 2008]

4.3.5 Índice de Suporte Califórnia – CBR

A capacidade de carga avaliada para as três amostras, em função do CBR, foi bastante variada, convergindo, entretanto, para valores aproximados quando comparados os métodos francês e brasileiro, respeitadas as energias de compactação utilizadas.

A seguir estão representadas as curvas Pressão *versus* Penetração para as três amostras, segundo as duas normatizações utilizadas (Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19).

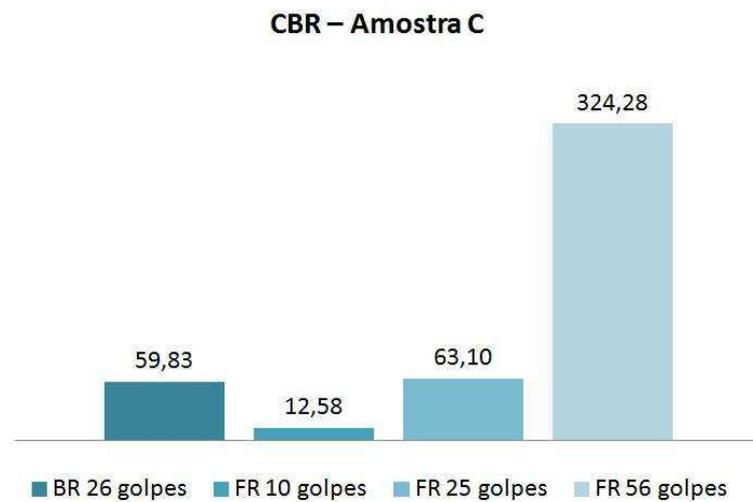


Figura 4.17 – Valor de CBR para a Amostra C, pelas normas brasileira e francesa

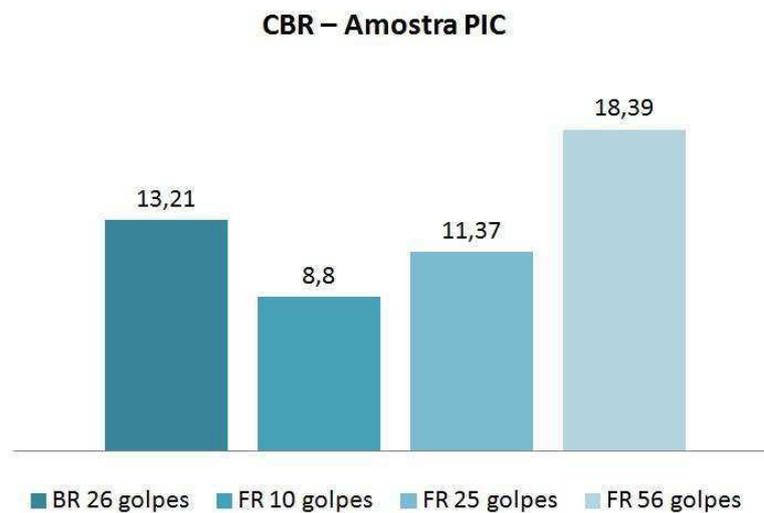


Figura 4.18 – Valor de CBR para a Amostra RC, pelas normas brasileira e francesa

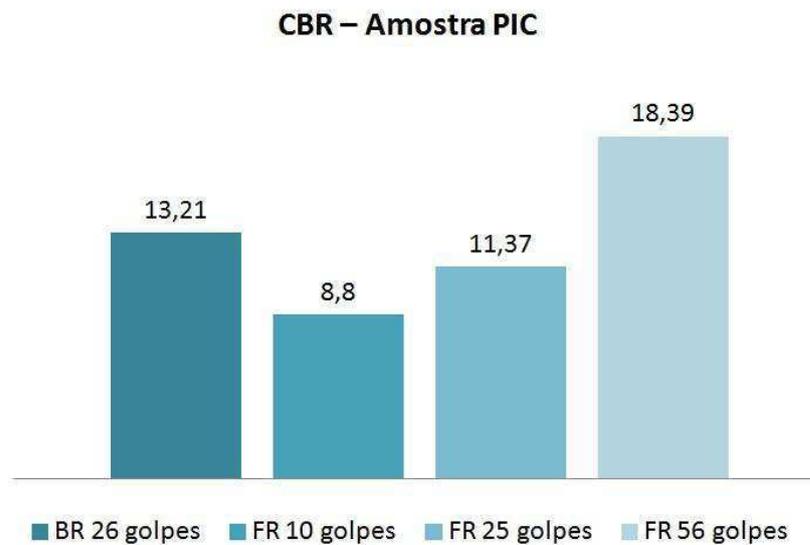


Figura 4.19 - Valor de CBR para a Amostra PIC, pelas normas brasileira e francesa

Os valores de CBR para os corpos de prova ensaiados encontram-se na Tabela 4.7. Pelo método brasileiro, foram ensaiados três (3) corpos de prova, para cada amostra de solo, para obtenção do valor de CBR por média aritmética. Segundo a norma francesa, o valor de CBR deve ser escolhido, entre as três energias de compactação da moldagem, a critério da experiência do engenheiro e da utilização do material. Neste trabalho, foi admitida a energia intermediária de compactação como mais apropriada, em virtude da utilização dos solos classificados como camadas de pavimentos de baixo custo.

Tabela 4.7 – Valores de CBR para as amostras de solos estudadas

	CBR BR (Média)	CBR FR 10 golpes	CBR FR 25 golpes	CBR FR 56 golpes
Amostra C	62,45%	12,58%	63,10%	324,28%
Amostra RC	12,37%	7,64%	14,68%	79,25%
Amostra PIC	13,21%	8,80%	11,37%	18,39%

Observou-se durante o ensaio que, mesmo após imersão por quatro dias, a umidade dos corpos de prova diminuiu. Tal fato é devido à fragmentação das partículas de solo durante apiloamento, aumentando a superfície de contato e a absorção de água, portanto. Repetiram-se os ensaios para confirmação deste fato.

4.3.6 Módulo de Resiliência – MR

Para a moldagem dos corpos de prova necessários à realização do ensaio de Módulo de Resiliência, foi utilizada a teor de umidade ótimo obtido com energia de compactação do Proctor Intermediário, norma brasileira. Os graus de compactação obtidos estão dentro dos limites toleráveis de $\pm 2\%$, como se observa na Tabela 4.10.

Tabela 4.8 – Parâmetros de Compactação e Graus de Compactação obtidos na moldagem

	W_{ot} (%)	γ_{dmax} (KN/m ³)	GC obtido (%)
Jazida C	7,8	20,81	101
Jazida RC	10,7	19,61	100
Jazida PIC	12,9	19,24	98

Durante a fase de preparação dos corpos de prova houve algumas perdas e foi preciso fazer modificações, como a moldagem dos corpos de prova com auxílio de invólucro entre a massa de solo e o molde metálico, para posterior separação dos mesmos. Na fase de condicionamento da amostra um dos corpos de prova rompeu, muito provavelmente por falha na moldagem. Os demais corpos de prova apresentaram comportamento normal, sem rompimento quer na fase de condicionamento quer na fase de ensaio (Figura 4.20).



Figura 4.20 – Rompimento dos corpos de prova durante a fase de preparação para o ensaio de Módulo de Resiliência

Na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10 estão inseridos os modelos para os Módulos de Resiliência estudados bem como os resultados dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos com o ajuste dos modelos A, B e C, respectivamente.

Tabela 4.9 – Modelos utilizados para a representação do Módulo de Resiliência

Modelo	Equação do modelo	Equação
A	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	3.3
B	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	3.4
C	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	3.5

Tabela 4.10 – Parâmetros Obtidos no Ensaio Triaxial Dinâmico (Módulo de Resiliência)

Amostra	Modelo A Função da Tensão de Confinamento			Modelo B Função da Tensão Desvio			Modelo C Função da Tensão de Confinamento e Desvio			
	K ₁	K ₂	R ²	K ₁	K ₂	R ²	K ₁	K ₂	K ₃	R ²
Jazida C	229,0	0,231	0,527	157,9	0,128	0,243	257,6	0,277	-0,009	0,564
Jazida RC	68,8	-0,236	0,392	76,0	-0,255	0,687	73,9	0,029	-0,305	0,789
Jazida PIC	1073,2	0,542	0,928	562,9	0,400	0,760	1145,3	0,418	0,192	0,965

Os resultados obtidos indicam que para todos os solos estudados (C, RC e PIC), o modelo mais adequado para determinação do Módulo de Resiliência é o Modelo C, em função da Tensão de Confinamento e da Tensão Desvio (Modelo Composto). O segundo modelo que melhor representa o M_R para os solos C e PIC é o Modelo A, em função da Tensão de Confinamento, e para o solo RC, o segundo modelo que melhor se aplica é o Modelo B.

De acordo com Quintans (2008) *apud* Ferreira (2002), o Modelo C constitui o modelo com o qual se obtém o melhor ajuste e que, estatisticamente, melhor descreve o comportamento mecânico (M_R) de solos arenosos.

4.3.7 Classificação dos solos estudados

Os parâmetros requeridos na Classificação Universal para Solos Lateríticos proposto por Rodrigues et al (2010) dos solos estudados estão inseridos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Parâmetros para Classificação Universal para Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)

Ensaio		Amostra C	Amostra RC	Amostra PIC
Norma Brasileira	% < 0,08mm	19,91	25,56	13,03
	% < 2,00mm	98,70	99,31	62,65
Norma Francesa	% < 0,08mm	19,85	27,17	31,52
	% < 2,00mm	98,41	99,25	60,96
Coeficiente de Fragmentação		--	--	--
Coeficiente de Degradabilidade		--	--	--
VBS (g/100g)		2,0	1,4	2,0
Coeficiente de Friabilidade (%)		31,8	37,4	71,7
Limite de Contração (%)		27,1	24,6	35,0
CBR (%)		62,45	12,37	13,21
Coeficiente de Determinação para o Modelo Composto para o Módulo de Resiliência (R ²)		0,564	0,789	0,965

Figura 4.21 – Amostra C - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)

Amostra C - Classificação

SOLOS LATERITICOS [SL] [Composição Química e Genese]						
80 µm ≤ 30%						
2 mm > 30%						
Solos Lateríticos Arenosos [SL _A]						
VBS ≤ 1,5						
FS ≤ 60		FS ≤ 60		FS > 60		VBS > 1,5
LC ≥ 15%		LC < 15%				
CBR ≥ 30%	CBR < 30%	CBR ≥ 30%	CBR < 30%			
SL _{A1}	SL _{A2}	SL _{A3}	SL _{A4}	SL _{A5}	SL _{A6}	
Sem Estabilização						
ESTABILIZADO						
SUB-BASE [CBR ≥ 30% ; LR ≥ 15%]						
Sem Estabilização CBR ≥ 10%						
ESTABILIZADO						
REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 15%]						

Figura 4.22 – Amostra RC - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)

Amostra RC - Classificação

SOLOS LATERITICOS [SL] [Composição Química e Genese]					
80 µm ≤ 30%					
2 mm > 30%					
Solos Lateríticos Arenosos [SLA]					
VBS ≤ 1,5					
FS ≤ 60		FS ≤ 60		VBS > 1,5	
LC ≥ 15%		LC < 15%			
CBR ≥ 30%	CBR < 30%	CBR ≥ 30%	CBR < 30%		
SLA ₃₁	SLA ₃₂	SLA ₃₃	SLA ₃₄		
Sem Estabilização					
ESTABILIZADO					
SUB-BASE [CBR ≥ 30% ; LR ≥ 15%]					
Sem Estabilização CBR ≥ 10%					
ESTABILIZADO					
REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 15%]					

Figura 4.23 – Amostra PIC - Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)

Amostra PIC - Classificação

SOLOS LATERITICOS [SL] [Composição Química e Genese]					
80 µm ≤ 30%					
2 mm > 30%					
Solos Lateríticos Arenosos [SLA]					
VBS ≤ 1,5					
FS ≤ 60		FS ≤ 60		VBS > 1,5	
LC ≥ 15%		LC < 15%			
CBR ≥ 30%	CBR < 30%	CBR ≥ 30%	CBR < 30%		
SLA ₃₁	SLA ₃₂	SLA ₃₃	SLA ₃₄		
Sem Estabilização					
ESTABILIZADO					
SUB-BASE [CBR ≥ 30% ; LR ≥ 15%]					
Sem Estabilização CBR ≥ 10%					
ESTABILIZADO					
REFORÇO DO SUBLEITO [CBR ≥ 10% ; LR ≥ 15%]					

Analisados todos os parâmetros, a classificação a que chegamos está detalhada na Tabela 4.15. Em síntese os solos estudados foram classificados como sendo Lateríticos Arenosos com alta retração e de

capacidade de suporte alta, para a Amostra C e de média a baixa para as Amostras RC e PIC, necessitando assim, de estabilização granulométrica ou química para evitar as fissuras, em todos os casos, e melhorar a capacidade de suporte para serem utilizados como material de sub-base e base de pavimentos de baixo volume de tráfego, no caso das Amostras RC e PIC.

Ficou evidente, que com a energia do Proctor Modificado a capacidade de suporte aumentou, porém devido à alta retração e com a necessidade de estabilização, os resultados após a estabilização provavelmente serão compatíveis com a capacidade de suporte exigida para as camadas de sub-base e de base de pavimentos de baixo volume de tráfego, não sendo necessários gastos adicionais com o aumento de energia de compactação.

Tabela 4.12 – Classificação Universal de Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010)

Amostra	Classificação Universal de Solos Lateríticos
Jazida C	Solo Laterítico Arenoso SLA_A
Jazida RC	Solo Laterítico Arenoso SLA_{S2}
Jazida PIC	Solo Laterítico Arenoso / Solo Laterítico Fino SLA_A / SLF_{S1}

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA AS FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

As amostras analisadas, coletadas em três diferentes estados do Nordeste Brasileiro, pertencem a Solos Lateríticos, de acordo com os resultados obtidos nas análises química convencional, espectrofotogramétrica, difratométrica e microscópica eletrônica de varredura, embora as amostras RC e PIC demonstrem baixo nível de laterização.

Foi constatada a aplicabilidade do Método de Classificação proposto por Rodrigues et al. (2010) para Solos Lateríticos, e conforme os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, mecânica e de estado, os três solos podem ser classificados como Solos Lateríticos Arenosos.

Pode-se inferir, a partir deste, que a avaliação do solo segundo a nova proposta de Classificação é satisfatória, uma vez que o método foi capaz de denotar as peculiaridades de cada solo, e indicá-los, segundo suas restrições, para uso em camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego.

Referente aos parâmetros utilizados, foi observado que o limite superior para o diâmetro das partículas menores que $80\mu\text{m}$ representaria melhor os solos analisados se alterado para 35%. Em virtude das observações feitas durante a fase experimental desta pesquisa, sugere-se que tal representatividade se consolidará quando avaliada uma quantidade maior de amostras.

Em se tratando da utilização da normatização francesa, esta pode ser qualitativamente substituída pelas normas em vigor no Brasil, sem grandes perdas para o sistema de Classificação proposto por Rodrigues et al. (2010). A utilização das Normas Brasileiras pode difundir a metodologia de Classificação, dado seu caráter simplificado frente às normas francesas.

No que se refere à avaliação da resposta do material compactado às tensões de trabalho, o método proposto pode ser melhorado se incluídas as informações sobre o comportamento mecânico, Módulo de Resiliência, resultando em análises racionais dos Solos Lateríticos.

Estes estudos indicam que o uso da energia de compactação modificada poderia compensar a necessidade de estabilização dos solos, mas que, entretanto, não evitaria a tendência contrátil dos materiais ricos em caulinita. Desta forma, conclui-se que a energia de compactação intermediária é a mais adequada para utilização nesta Classificação.

5.2 Sugestões para as futuras pesquisas

Com a finalidade de melhorar e dar continuidade e aprofundamento do objeto desta pesquisa sugere-se os seguintes temas:

Analisar a aplicação da Classificação Universal para Solos Lateríticos proposta por Rodrigues et al. (2010) à Solos Lateríticos Finos e Pedregulhosos.

Estudar os parâmetros adequados para implementar o Ensaio Triaxial Dinâmico à proposta de Classificação Universal para Solos Lateríticos.

Realizar estudo sobre as vantagens da Classificação Universal para Solos Lateríticos sobre os diversos métodos de Classificação existentes.

Estudar a influência da umidade de compactação nos resultados do Teste de Capacidade de Suporte (CBR) em Solos Lateríticos, analisando a absorção d'água durante a quebra mecânica dos grãos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKROYD, L. W., "Formation and Properties of Concretionary and Non-Concretionary Soils of Western Nigeria." Proc, 4th Regular Conf. African Soil Mech. and Found. Engeneering, Balkema, Cape Town, South Africa, 47-51. (1967).
- ALCOCK. RAMMED EARTH TECHNIQUE IN WEST AFRICA, Housing and town and country planning Bulletin N. 4. United Nation Organization (1950).
- ARAÚJO, RAIMUNDO NONATO A., Estabilização dos solos lateríticos da região NE com emulsão asfáltica catiônica. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: Heber C. Ferreira. (1982).
- AUBERT, G. Extrait des Actes et Comptes Rendus du V Congrès International de la Science du Sol, Léopoldville, 16-21 août 1954, Volume I, pp. 103-118. Les Sols Latéritiques PAR (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, France). (1964).
- AUTRET, P., Latérites et graveleux latéritiques. Institut des sciences et des Techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement. Études. Laboratoire Central des Pontes et Chaussées. (1983).
- BARROSO, S. H. A., Estudo dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para a Aplicação na Engenharia Rodoviária. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. (2002).
- BORBA, S. M. C. Estudo das Propriedades Químicas e Mineralógicas dos Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. (1981).
- BOURGEON G., GUNNELL Y., La latérite de Buchanan. Étude et Gestion des Sols, Volume 12, 2, - pages 87 à 100. (2005).
- BRAGA, CÍCERO C. DE A., Contribuição ao estudo da permeabilidade e das características mecânica de um solo laterítico estabilizado com cimento. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: J. J. Crispel. (1979).
- CAMAPUM, JOSÉ DE CARVALHO, Influência das energias térmicas e mecânicas em propriedades de alguns solos lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: João B.Q. de Carvalho. (1981).
- CAPUTO, H. P., Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Livros Técnicos e Científicos, 5ª edição, Rio de Janeiro, RJ. (1978).

CARVALHO, J. B. Q., Soil Properties Affecting the Lime Stabilization of Red Tropical Soils from Northeast Brazil. Thesis for degree of Doctor of Philosophy. Department Civil Engineering. University of Leeds, England. (1979).

CARVALHO, J. B. Q., Amorphous Constituents in Red Tropical Soils: State of the Art and Significance to 84 Geotechnical Properties. Current Practices in Geotechnical Engineering. v.1. International Book Traders Delhi – Índia. (1985).

CARVALHO, J. B. Q. et al., Estudo de Solos Lateríticos: Definição e Classificação. 21^a Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, Bahia. (1986).

CARVALHO, J. B. Q., SIMONS, J. V., Mineralogy and Microstruture. Prepared by Technical Committee 25 on the Properties of Tropical and Residual Soil of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Balkema/Rotterdam/Brookfield. (1997).

CENTRE EXPERIMENTAL DU BATIMENT ET DE TRAVAUX PUBLICS (CEBTP), Normes de Dimensionnement des routes dans les pays tropicaux. (1972).

CHAGAS FILHO, M. B., Estudo de Agregados Lateríticos para Utilização em Concretos Estruturais. Tese de Doutorado. UFCG, PB. (2005).

CHARMAN, J. H., Laterite in Road Pavements. Construction Industry Research and Information Association. London. (1988).

CHEN, T.J. SOUZA SANTOS, P. FERREIRA, H.C., CALIL, S.F., ZANDONADI, A.R. E CAMPOS, L.V. Determinação da Capacidade de Troca de Cations e da Area Especifica de Algumas Argilas e Caulins Cerâmicos Brasileiros pelo Azul de Metileno e sua Correlação com Algumas propriedades Tecnológicas, Cerâmica. XX, N. 79, São Paulo. (1974).

COLEMAN, J.D., FARRAR, D.M. The Moisture Characteristics, Composition and Structural Analysis of a Red Clay Soil From Nyeri - Kenya, Geotechnique, 14:3. (1964).

COMMITTEE ON TROPICAL SOILS OF THE ISSMFE. Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. ABMS. Progress Report (1982-1985). São Paulo, SP. (1985).

CUNHA, JOSÉ EDUARDO VILAR, Solos lateríticos estabilizados com cimento através da metodologia ABCP e DNER. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: Heber C. Ferreira. (1992).

DE GRAFT-JOHNSON, J. W. S., BHATIA, H. S. AND YEBOA, S. L. "Influence of Geology and Physical Properties on Strength Characteristics of Laterite Gravels for Road Pavements." Hwy. Res. Board Record, 405, 87-104. (1972).

DE GRAFT-JOHNSON, J.W.S., BHATIA, M.S., GIIDIGASU, M.D. Engineering Properties of Lateritic soils, General Report, Proc. Special Session Engineering Prop. Lateritic Soils, 7Th Int. conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pg 13-43. (1970).

DINIZ, AÍLTON ALVES, Resistência à compressão simples para Solos Lateríticos: avaliação da metodologia e influência dos efeitos da temperatura de secagem e energia mecânica. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1984).

DIRECTION DES ETUDES GENERALES ET DE LA NORMALISATION – DEGN. Pour l'Utilisation en Corps de Chaussée de Graveleux Latéritiques Naturels. République du Cameroun. Recommandation, Edition provisoire. (1984).

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, CLA-259/96. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. (1996).

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES., ES – 098/07. Pavimentação de base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. (2007).

DOUGLAS O. A. OSULA. Evaluation of Admixture Stabilization for Problem Laterite. Journal of Transportation Engineering, Vol 115. N. 6 (1989).

ENUVIE G., AKPOKODJE and PETER P. HUDEC, Factors Controlling Properties and Durability of Laterite Gravel Aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 4, No. 1, February, ASCE, ISSN0899-1561/92/0001. No. 412. (1992).

FABBRI, G. T. P., Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. (1994).

FALL, MEISSA., Identification et caracterisation mecanique de graveleux lateritiques du Senegal: Application au domaine routier. These de Doctorat INPL (ENSG-Nancy). (1993).

FALL, MEISSA., Genèse et Formation des Sols Latéritiques. Faculté des Sciences et Techniques-UCAD. Note sur les Matériaux Latéritiques et Quelques Résultats sur les Latérites du Sénégal. INPL Nancy-France. (1993).

FERRO, JOSÉ GERALDO DE O., (1979). A influência da cal nas propriedades de engenharia de solos lateríticos. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: J. G. Cabrera.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION - FAO. A Framework for International Classification, Correlation and Communication. World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports. Rome, 103. ISSN 0532-0488. (2006).

GALVÃO, CASSIA DE BRITO. EISHARIEF, AHMED. SIMÕES, GUSTAVO FERREIA. Effects of Lime on Permeability and Compressibility of Two Tropical Residual Soils. Journal of Environmental Engineering. ASCE Vol. 130. N. 8. (2004).

GIDIGASU, M. D., Laterite soil engineering. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. (1976).

GIDIGASU, M.D. AND BANI, S.K. Geotechnical Characteristics of Troublesome Laterite Materials, in Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2, pp. 89–96. (1973).

GIDIGASU, M.D. Identification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering: A review, Transportation Research Record, 497, 96–111. (1974).

GRIM, R. E., Clay Mineralogy in Relation to the Engineering Properties of Clay Materials, Applied Clay Mineralogy. Mc Graw-Hill. (1962).

ISTED & LCPC., Latérites et Graveleux Latéritiques. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement & Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. France. ISSN 0989-64241. (1983).

ISTED, Utilisation des Graveleux Latéritiques en Technique Routière. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement, Paris. France. ISSN 0989-64241. (1990).

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – LNEC. Engineering Properties of Lateritic Soils VII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico. (1969).

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, LABORATORIO DE ENGENHARIA DE ANGOLA, LABORATORIO DE ENSAIOS DE MATERIAIS E MECÂNICA DOS SOLOS. As Lateritas do Ultramar Português. Ramos, Afonso & Moita, Ltda. Lisboa, Portugal. (1959).

LAWAL A. Réflexions sur les études routières dans les pays sahéliens. Travail de fin d'études ENTPE effectué au LCPC. (1981).

LECOMTE-NANA, G.L., E. LESUEUR, J.P. BONNET, G. LECOMTE. Characterization of a lateritic geomaterial and its elaboration through a chemical route. Construction and Building Materials. ELSEVIER. N. 23, 1126–1132. (2008).

LIMA, CANROBERT G., Estudos sobre a reatividade a cal de solos lateríticos visando sua estabilização: aplicação a um solo laterítico de Nova Floresta – Estado da Paraíba. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: Heber C. Ferreira. (1983).

LIMA, RICARDO CORREIA, Granulometria dos solos lateríticos: metodologia, efeitos das energias térmica e mecânica e relação com a composição química mineralógica. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: João B. Q. de Carvalho. (1983).

LYON ASSOCIATES INC., Une Etude Géotechnique pour Agence pour le Développement International, Les Sols Latéritiques et d'Autres Sols Difficiles d'Afrique. Baltimore, Maryland, U.S.A. Building & Road Research Institute. (1971).

MAIGNEIN, R., Review of Research Laterites. Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-mer. Paris. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Place de Fontenoy, Paris-7. Printed by Vaillant-Carmanne, Liège. (1966).

MAIOR, IVANISE SOUTO, Influência da qualidade de cal na estabilização de solos lateríticos. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: Heber C. Ferreira. (1983).

MARTINS, LINEY B., Localização e descrição de várias jazidas de solos lateríticos do Norte e Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: João B.Q. de Carvalho. (1983).

MEDINA, J. MOTTA, L.M.G. SANTOS J.D.G., Deformability characteristics of brazilian laterites. Geotechnical and Geological Engineering. 24: 949–971. Springer (2006).

MESSOU MENIN. Comportement Mécanique d'une Couche de Base en Graveleux Latéritiques Améliorés au Ciment : Cas des routes en Côte d'ivoire. Ecole National des Ponts et Chaussées. Paris. (1980).

MILLOGO YOUNOUSSA. HAJJAJI, M. OUEDRAOGO, R. GOMINA, M. Cement-lateric gravel mixtures: Microstructure and strenth characterisitics. Construction and Building Materials. Elsevier. (2008).

MOH, ZA-CHIEN & MAZHAR, M.F., Effects of Method of Preparation on Index Properties of Lateritic Soil. Proceeding of the Specialyty Session. Engineering Properties of Lateritic soils. VII ICSMFE, volume 1, Asian Intitute of Technology, Bangkok, Thailand. (1969).

MOIZINHO, JOEL CARLOS, Influência da energia térmica em propriedades mecânicas e físicas de agregados lateríticos utilizados em concretos betuminosos. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1994).

NEWILL, D., A Laboratory Investigation of Two Red Clays From Kenya, Geothechique, London, Volume 2. (1961).

NF P 94-068, Mesure de La capacite d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Norme Française. (1998).

NF P94-066, Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux. Norme Française. (1992).

NF XP P 94-060-1, Essai de Dessiccation. Détermination conventionnelle de La limite de retrait sur Le passant à 400 μm d'un matériau. Norme Française. (1997).

NF XP P94-078, Mésure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Norme Française. (1997).

NOGAMI, J. N. ET VILLIBOR, DOUGLAS FADUL., Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo. Villibor. (1995).

NOVAIS, FERREIRA, H. AND MEIRELES, J.M.F., Influência nas Propriedades Geotécnicas de Solos Lateríticos, do Umedecimento e da Temperatura. Laboratorio de Engenharia de Angola, N. 164, pp 251-259. (1972).

NUNEZ, W. P., LOVATO, R. S., MALYSZ, R., CERATTI, J. A. P. Revisiting Brazilian State Road 377: Well-Succeded case of lime-stabilized road base. 2° Symposium International. Traitement et Retraitement des Matériaux pour Travaux des Infrastructure. TREMTI. Paris. (2005).

NWAIWU, C. M. O. ALKALI, I. B. K AND AHMED, U. A. Properties of Ironstone Lateritic Gravels in Relation to Gravel Road Pavement Construction Geotechnical and Geological Engineering, 283–298. Springer. (2006).

PALHANO, LUCERNA ANGELA B., Uso de um sistema de informação geográfica em gerência de pavimentos construídos com Solos Lateríticos. Orientador: John Kennedy G. Rodrigues, UFCG. (2000).

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. Presença de Componentes amorfos nos Solos Lateríticos, Anais da 18 Reunião de Pavimentação, Porto Alegre. (1983).

QUINTANS, ANDRÉ LUIZ L., Estudos das propriedades físicas, mecânicas e químicas/mineralógicas de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) utilizado na pavimentação do complexo aeroportuário da Grande Natal-RN/NE. Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: John Kennedy G. Rodrigues. (2008).

QUINTANS, FRANCISCO DE ASSIS, Estudo do comportamento mecânico de um Solo Laterítico compactado e submetido a estado de tensões triaxiais. Orientador: J.J. Crispel, UFCG. (1979).

RODRIGUES, JONH KENNEDY G., Avaliação estrutural de um pavimento flexível de base constituída de Solo Laterítico através de ensaios deflectométricos e pressiométricos. Orientador: Heber C. Ferreira, UFCG.(1992)

RODRIGUES, JOHN KENNEDY G., Rationalisation de L'utilisation de Sols Lateritiques en Plateformes de Chaussees Durables et de Faible Cout. Rapport Stage Pos-Doctorale. LCPC, Paris (2010).

- SANTOS, WASHINGTON JOSE, Avaliação do Uso de Emulsão Asfáltica na Estabilização Química de Três Solos de Sergipe. Orientador: Erinaldo Hilário Cavalcante, UFCG. (2009).
- SHELLMANN, W., An Introduction in Laterite. <http://www.laterite.de/index.html>. (2009).
- SEGALEN, P. Le fer dans sols. Directeur de Recherches de l'O.R.S.T.O.M. P A R I S. (1964).
- SHARP K.G., VUONG, B.T., ROLLINGS, R.S., BARAN, E., FOLEY, G.D., JOHNSON-CLARK, J.R. & METCALF, J.B., An Evaluation of the Field and Laboratory Properties of Lateritic Gravels. ARRB Transport Research Ltda. Vermounth South, Victoria. Research Report ARR 343. 65 pages. (2001).
- SIKALI, F. Caractéristique et Comportement élastoplastique d'une Latérite pour son Utilisation en Couche de Chaussée (Thèse – Master's degree – Yaoundé). (1979).
- SILVEIRA, LUIZ CARLOS S. DA, Plasticidade de Solos Lateríticos: métodos de ensaios e efeitos da temperatura de secagem. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1984).
- SOARES MINA, A.J. Cura Acelerada do Sistema Solo-Cal por Tratamento Térmico, Aplicada a Solos Latéuticos. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Brasil. (1993).
- SOUZA, GIOCONDA SANTOS E, Avaliação do efeito da cal na resistência ao cisalhamento dos Solos Lateríticos. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1993)
- SOUZA, JORGE LUIS F. DE, Estudo da durabilidade de concretos e argamassa através de RAA em agregados convencionais da região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas. Orientador: Milton Bezerra Chagas, Filho, UFCG. (2007).
- TARDY Y. Pétrologie des Latérites et des Sols Tropicaux. Masson, Paris, 459. (1993).
- TERZAGHI, K. The Design and Performance of the Sasumua Dam. I.C.E. Volume 9. (1958).
- TOWNSEND, F.C., MANKE, P.G. AND PARCHER, J.V. Effect of Remolding on the Properties of a Lateritic Soil. H.R.R. N.284. (1969).
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, SOIL TAXONOMY. A Basic System of Soil Classification for Making an Interpreting soil Surveys, Second Edition, N. 436. (1999).
- V. COSTA, CARLOS ROBERTO, Índice de Suporte Califórnia de Solos Lateríticos: avaliação da metodologia e influência dos efeitos das energias térmica e mecânica. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1983).

- V. FILHO, ORLANDO CAVALCANTI, Estabilidade de Solos Lateríticos da região Nordeste do Brasil com cimento. Orientador: Heber C. Ferreira, UFCG. (1985).
- VALLERGA, B.A. Engineering study of laterite and soils in connection with construction of roads, highways and airfields. ,U.S. Agency Inst. Dev. AID/CSD, 1810. (1960).
- VARGAS, M. O Uso dos Limites de Atterberg na Classificação dos Solos Tropicais, VII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife, Brasil. Volume 5. (1982).
- VILARIM, SANDRA COURA, Estabilização de Solos Lateríticos com cal: avaliação por um processo de cura acelerado. Orientador: João B. Q. de Carvalho, UFCG. (1995).
- VILLIBOR, DOUGLAS FADUL & NOGAMI, JOB SHUJI., Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos Lateríticos. São Paulo, Brasil. Arte & Ciência. ISBN 9788561165345. (2009).
- WINTERKORN, F.M., CHANDRASEKHARAN, E.C. Lateritic Soil and Their Stabilization, HRB, Bulletin No. pg. 10-29. (1951).

ANEXOS
