

ESTADO DA ARTE SOBRE A UTILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

SÓNIA VANESSA MENESES DUTRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

Coorientador: Professora Doutora Cecília Maria Nogueira Alvarenga
Santos do Vale e Engenheiro Sérgio Cunha

SETEMBRO 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e ao meu noivo

A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las.

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor António Viana da Fonseca, diretor da Secção de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e a todos os Professores que, com as suas excelentes aulas, me levaram a decidir por este ramo.

Ao meu orientador, Professor Doutor António Campos e Matos, por ter sugerido uma dissertação acerca do tema laterites.

À Professora Doutora Cecília Vale, por me ter orientado, pelos contactos realizados que permitiram a realização do inquérito, e pelos documentos disponibilizados.

À Doutora Ana Cristina Freire, pela disponibilidade imediata com que sempre me recebeu, pelas sugestões e documentos disponibilizados.

Ao Professor Doutor Américo Dimande da Universidade Eduardo Mondlane em Moçambique, que se disponibilizou para enviar documentos.

Ao Engº Ricardo Ferreira, Engº José Carlos Almeida, Engº Paulo Guedes, Engª Marta Isidoro, Engº André Costa, Engº André Maurício, Engº Licínio Pereira e ao Engº Fernando Castelo Branco da MSF pela colaboração pronta na resposta ao inquérito sobre laterites.

Ao Engº Paulo Fonseca da Elevogroup, coordenador do grupo de trabalho de Pavimentos Rodoviários da Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção, pelo apoio no contacto com as empresas portuguesas que colaboraram neste trabalho.

Ao André Cunha e Marta Torneiro, pela ajuda na programação da base de dados.

À minha família que me deu sempre força para continuar, e que sempre acreditou em mim. À minha mãe, Rosa Meneses, às minhas tias, Paula Goulart e Sandra Meneses, e em especial à Cristina Oliveira, aos meus tios Nuno Goulart e Álvaro Oliveira, e ao Alexandre Faria, por todo o apoio que me permitiu chegar ao fim do curso. Ao meu pai, Arlindo Dutra pela ajuda na elaboração de imagens.

Ao meu noivo, César Duarte, por todo o apoio e força dados ao longo do curso, e que esteve sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis deste percurso. E à sua família, pelo apoio e carinho.

Aos meus colegas de curso que me aturaram por 6 longos anos, que me ajudaram nos estudos, e a passar os dias com mais alegria. Em especial ao Ângelo Pereira, Diogo Silva e Filipa Garrett pela ajuda.

A todos os que, injustamente, me esqueci de mencionar, o meu muito obrigada.

RESUMO

Esta tese no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, opção de Geotecnia, surgiu da necessidade de compilação da informação existente acerca de um tipo de solo residual tropical peculiar – as laterites/solos lateríticos. Este tipo de solo é muito utilizado nas zonas tropicais pela possibilidade mais económica, não só de utilizar os materiais disponíveis, mas também pela necessidade crescente de se recorrer a materiais mais sustentáveis.

A informação acerca deste tema encontra-se temporal e espacialmente dispersa, sendo a compilação um dos objetivos deste trabalho. Este foi alcançado através de uma pesquisa intensiva, tanto em bibliotecas reais como em bibliotecas digitais, e da criação de uma base de dados contendo os documentos encontrados acerca deste tipo de solo e da sua localização.

Outro dos objetivos consistia em aprofundar a pesquisa na área da aplicação em pavimentos, já que é a principal área de utilização das laterites, pelo que foi desenvolvido um capítulo acerca do tema.

O último dos objetivos foi recolher informação através de inquéritos dirigidos a engenheiros com experiência no emprego das laterites em engenharia civil, informação que foi tratada de forma qualitativa.

PALAVRAS-CHAVE: estado da arte, laterites, solos lateríticos, pavimentos rodoviários, avaliação do comportamento, solos residuais tropicais, ferramentas de apoio.

ABSTRACT

This thesis as part of the Master in Civil Engineering, Faculty of Engineering of University of Porto, Geotechnical Engineering option, arose from the need to compile the existing information concerning a peculiar type of tropical residual soil – laterites/ lateritic soils. This type of soil is widely used in the tropics for the economical opportunity, not only to use the available materials, but also for the growing need to use more sustainable materials.

The information on this subject is temporally and spatially dispersed, being the compilation one of the goals of the present work. This goal was achieved through intensive research, both in real libraries as digital libraries, and with the creation of a database containing the documents found about this type of soil and its location.

Another aim was to deepen the research in the area of application in pavements, as it is the main area of application of laterites, for what it has been developed a chapter on the subject.

The last of the goals was to gather information through surveys directed to engineers with experience in the use of laterites in civil engineering, information that has been treated qualitatively.

KEYWORDS: state of the art, laterites, lateritic soils, road pavements, behavior assessment, tropical residual soils, support tools.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ÂMBITO E ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	2
2. SOLOS LATERÍTICOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.1. SOLOS RESIDUAIS: ASPETOS GERAIS	4
2.1.2. INTEMPERISMO – O PROCESSO DE FORMAÇÃO	5
2.1.3. FATORES CONDICIONANTES E CARACTERÍSTICAS GERAIS	9
2.2. SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS	10
2.2.1. PROCESSO DE FORMAÇÃO	10
2.2.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA	11
2.2.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	13
2.2.3.1. Metodologia de Ensaios	13
2.3. LATERITES	17
2.3.1. DEFINIÇÃO DE LATERITE	17
2.3.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA	19
2.3.2.1. Laterites de África	20
2.3.2.2. Laterites da Índia	21
2.3.2.3. Laterites do Brasil	25
2.3.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	27
2.3.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA	27
2.3.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	28
2.3.6. UTILIZAÇÃO DE LATERITES EM ENGENHARIA CIVIL	30
2.3.7. BASE DE DADOS DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS RELACIONADAS COM LATERITES	31
2.4. CONCLUSÕES	33

3. APLICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	35
3.1. INTRODUÇÃO	35
3.2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: TIPOLOGIA, CONSTITUIÇÃO E MATERIAIS CORRENTES	36
3.3. ESPECIFICAÇÕES DE LATERITES PARA PAVIMENTOS	38
3.3.1. <i>GUIDE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES POUR LES PAYS TROPICAUX</i>	38
3.3.2. MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - DNIT	42
3.3.3. NORMA DNIT 098/2007 – ES (PAVIMENTAÇÃO-BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE COM UTILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO)	42
3.3.4. ESPECIFICAÇÃO 504 – CAMADAS DE DESGASTE DE ASFALTO	44
3.3.5. NORMAS DE UTILIZAÇÃO DE LATERITES AFRICANAS EM PAVIMENTOS	44
3.3.6. OUTRAS ESPECIFICAÇÕES	45
3.4. ESTABILIZAÇÃO DE LATERITES PARA PAVIMENTOS	46
3.4.1. ESTABILIZAÇÃO COM CAL	46
3.4.2. ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO	47
3.4.3. PRECIPITAÇÃO DE CALCITE POR ATIVIDADE MICROBIANA (MICP)	47
3.4.4. SOLO CIMENTO-LATERÍTICO	47
3.5. CASOS DE APLICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS	48
3.5.1. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL	48
3.5.1.1. Caso 1 – Classificação MCT para Caracterização de Solos Tropicais	48
3.5.1.2. Caso 2 – Utilização de solo laterítico em pavimentos e sua estabilização com cal	51
3.5.1.3. Caso 3 – Utilização de materiais lateríticos como bases de pavimentos	53
3.5.1.4. Caso 4 – Utilização de solo-cimento laterítico em pavimentos	53
3.5.2. EXPERIÊNCIA PORTUGUESA	54
3.5.2.1. Caso 1 – Aplicação de laterites em pavimentos - Angola	54
3.5.2.2. Caso 2 – Aplicação de laterites em pavimentos - Moçambique	55
3.5.2.3. Caso 3 – Aplicação de laterites em pavimentos – Guiné Equatorial	55
3.5.2.4. Caso 4 – Aplicação de laterites em subleito e leito do pavimento – Guiné Equatorial, Senegal, Costa do Marfim e Burkina Faso	56
3.5.2.5. Caso 5 – Aplicação de laterites em aterros de estradas - Senegal	56
3.5.2.6. Caso 6 – Aplicação de laterites em pavimentos e fundações de aterro - Senegal	56
3.5.2.7. Caso 7 – Aplicação de laterites em pavimentos – Gana (Acra)	57
3.5.2.8. Caso 8 – Aplicação de laterites em pavimentos e fundações – Gana	57
3.6. CONCLUSÕES	58

4.CONCLUSÕES	61
4.1. OBJETIVOS ATINGIDOS E CONCLUSÕES GERAIS	61
4.2. TRABALHO FUTURO	62
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo das Rochas e formação dos solos residuais	5
Figura 2.2 – Distribuição das zonas morfoclimáticas	6
Figura 2.3 - Grau de alteração no perfil típico de um solo residual	10
Figura 2.4– Perfil típico de um solo residual tropical	11
Figura 2.5 – Distribuição geográfica dos solos residuais tropicais	12
Figura 2.6 – Relação da classificação pedológica com o grau de alteração do solo	13
Figura 2.7. – Perfil de solo tropical em clima húmido vs. clima alternadamente húmido e seco	19
Figura 2.8 – Distribuição das diferentes formações lateríticas em África em 1983	20
Figura 2.9 – Distribuição das laterites (ferricretes) em África em 1991	21
Figura 2.10 – Evolução das laterites de Kerala	22
Figura 2.11 – Perfis lateríticos de regiões gnássicas em função do relevo (Kerala)	22
Figura 2.12 – Fração argilosa das amostras de laterites em Kerala e Kanara Sul	23
Figura 2.13 – Índice de vazios <i>in situ</i> de laterites em Kerala e Kanara Sul	24
Figura 2.14 - Distribuição das laterites (ferricretes) no Brasil em 1991	25
Figura 2.15 – Perfil 1 (Solo residual tropical da Região de Areia)	25
Figura 2.16 – Perfil 2 (Solo residual tropical da Região de João Pessoa)	26
Figura 2.17 – Perfil 3 (Solo residual tropical da Região de Sapé)	26
Figura 2.18 – Exemplo de dois registos na base de dados.	32
Figura 2.19 – Exemplo da ligação para a tabela que contém os títulos dos artigos.	33
Figura 2.20 – Tabela exemplo com os artigos e respetivos autores.	33
Figura 3.1 – Pavimento flexível	36
Figura 3.2 – Pavimento semirrígido – estrutura direta e estrutura inversa	37

Figura 3.3 – Pavimento rígido	37
Figura 3.4 – Ábaco para Classificação MCT	42
Figura 3.5– Curva granulométrica do solo estudado	50
Figura 3.6– Curva de compactação do solo estudado	50
Figura 3.7. – Variação do Limite de Liquidez com a % de cal	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1– Zonas Morfoclimáticas	7
Tabela 2.2– Fases de um solo residual tropical.....	12
Tabela 2.3– Ensaio realizados para classificação MCT	15
Tabela 2.4 – Propriedades comuns das laterites.....	19
Tabela 2.5- Critério de classificação granulométrica	27
Tabela 2.6-Classificação físico-química baseada na relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$	28
Tabela 3.1 – Especificações para colocação em obra de seixos lateríticos para a camada de sub-base	38
Tabela 3.2 – Classes de tráfego de acordo com o guia	39
Tabela 3.3 – Características dos seixos lateríticos adequados para classes de tráfego $\geq T3$	39
Tabela 3.4 – Especificações para colocação em obra de seixos lateríticos para a camada de base .	40
Tabela 3.5 – Características dos materiais possíveis de tratar com cimento ou cal	40
Tabela 3.6 - Valores admissíveis para classes T1-T3 e tráfego de eixo simples de 8 a 10 toneladas	41
Tabela 3.7 – Valores admissíveis para classes T4-T5 e tráfego de eixo de 13 toneladas	41
Tabela 3.8 – Recomendações para utilização de seixos lateríticos naturais	41
Tabela 3.9 – Características dos solos lateríticos adequados para base de pavimento.....	43
Tabela 3.10 – Normas de utilização de laterites africanas em pavimentos.....	44
Tabela 3.11 - Normas de utilização de laterites africanas em pavimentos revestidos	44
Tabela 3.12– Propriedades recomendadas para os SAFL	49
Tabela 3.13– Caracterização geotécnica pelos métodos clássicos	49
Tabela 3.14– Resultados dos testes preliminares	51
Tabela 3.15 – Resultados dos ensaios de laboratório	54

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- peneiro n°

ϕ' – Ângulo de atrito

c' – coesão

γ_{OPT} – Peso específico seco máximo

$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$ – Relação molecular sílica-sesquióxido

Al – Alumínio

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

$(\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$ – Caulinite

Ca – Cálcio

CaCO_3 – Calcite

Fe - Ferro

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro

K - Potássio

Mg - Magnésio

Na - Sódio

$(\text{N1})_{60}$ – valor corrigido do SPT

R_2O_3 – Óxidos Refratários (Neutros, Viscosos e Retardadores de Cristais)

SiO_2 – Dióxido de Silício ou Sílica

Ti - Titânio

u – unidade de massa atômica

W_{OPT} – Teor em água ótimo

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ACV – *Aggregate Crushing Value*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BS - (*British Standards* para Projetos de Pavimentação e Drenagem)

CBR – *California Bearing Ratio*

CHT – *Crosshole Test*

CPT – *Cone Penetration Test*

DHT – *Downhole Test*

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNER-ME - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IP – Índice de Plasticidade

LA – *Los Angeles*

LL – Limite de Liquidez

MCT - Miniatura Compactado Tropical

MCV - *Moisture Condition Value*

MDV – Ensaio Micro-Deval

MICP – *Microbial-Induced Calcite Precipitation*

OPM – Ótimo do Proctor Modificado

PLT – *Plate Load Test*

PMT – *Pressuremeter Test*

RIS - Relação Mini-CBRis/Mini-CBRhm

SAFL - Solos Arenosos Finos Lateríticos

SEM - *Scanning Electron Microscope*

SPT – *Standard Penetration Test*

SR – *Seismic Refraction* (Ensaio de Refração Sísmica)

UCS – *Unified Classification System*

USDA - *United States Department of Agriculture*

VST – *Vane Shear Test*

1

INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E ENQUADRAMENTO

Esta tese, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, opção de Geotecnia, surge da necessidade de compilar a informação existente acerca de laterites, já que esta se encontra muito dispersa tanto temporal como espacialmente.

Este é um tema que está a ganhar uma nova importância nas empresas portuguesas pois a necessidade da sustentabilidade no processo de internacionalização das mesmas impõe o recurso a opções mais económicas e sustentáveis na construção civil e que, em simultâneo, ofereçam vantagens competitivas através da diferenciação nos mercados onde atuam.

O clima tropical de regiões como África, Índia e Brasil leva à formação em larga escala de solos do tipo lateríticos, ausentes na Europa e em Portugal. Em resultado de estudos realizados durante o período de colonização de alguns destes países, conclui-se que este tipo de solos, pode ser melhorado do ponto de vista estrutural e, valorizado em detrimento da utilização de materiais granulares produzidos propositadamente para a construção das bases e sub-bases das estradas, frequentemente localizados a grande distância da zona da obra. Para além da sustentabilidade ambiental proporcionada pela utilização de materiais locais na construção de estradas, há ainda o reforço da competitividade pela utilização e valorização dos materiais existentes, utilizando-os em camadas mais nobres do pavimento, em substituição dos materiais granulares atrás referidos. No caso do continente Africano há ainda a dificuldade acrescida dos recursos se encontrarem a muitos quilómetros de distância, sendo essencial recorrer aos recursos disponíveis. Utilizando os materiais laterítico disponíveis para construção de estradas, inicia-se um processo de desenvolvimento económico e social do país.

O facto de haver pouco conhecimento técnico ou científico sobre o seu emprego na construção de estradas tem sido um constrangimento à sua utilização em maior escala pois, como em todos os materiais utilizados em engenharia civil é necessário conhecer bem o seu comportamento, de modo a assegurar a estabilidade e segurança da obra. Por essa razão, é fundamental identificar, estudar e desenvolver metodologias construtivas que permitam adquirir conhecimentos no que se refere à adição de ligantes hidráulicos, betuminosos ou produtos iónicos aos materiais lateríticos e que garantam um adequado comportamento estrutural das camadas granulares não ligadas, tendo em conta o tráfego a que determinada estrada irá estar sujeita.

As laterites são aplicadas em diversos tipos de construções, como em fundações para barragens de terra e para pavimentos e, em especial, na constituição do pavimento, como camada de sub-base ou base, dependendo das características, do comportamento e da qualidade da laterite. Devido à vasta utilização das mesmas em estradas, foi desenvolvido um capítulo dedicado ao tema.

Toda esta tese é, portanto, uma revisão de literatura existente, com o contributo de uma base de dados criada e do tratamento dos inquéritos realizados.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação foi a compilação da informação existente acerca de solos residuais tropicais e laterites, como meio de aumentar o conhecimento relativo à utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários, colaborando desta forma para a melhoria do desempenho das empresas portuguesas nos países africanos onde existem estes solos, como o caso de Angola, Moçambique, Senegal, Namíbia, Zâmbia, etc., pois, como já foi referido, este tipo de solos não existe na Europa e os poucos estudos existentes referem-se ao período da colonização.

Para alcançar este objetivo foi necessária a realização de uma pesquisa bibliográfica alargada sobre as características intrínsecas dos solos lateríticos e as suas propriedades geotécnicas, distribuição geográfica, possibilidades de aplicação em pavimentos, materiais, técnicas, procedimentos de melhoria e estabilização, e os principais ensaios laboratoriais para avaliação das características químicas, físicas e mecânicas. Como resultado da pesquisa bibliográfica, foi proposto o desenvolvimento de uma base de dados, que agregasse informações acerca de todos os documentos consultados, de modo a facilitar a pesquisa de documentos sobre solos lateríticos.

Outro dos objetivos consistia em aprofundar a pesquisa na área da aplicação em pavimentos, já que é a principal área de utilização das laterites, pelo que foi desenvolvido um capítulo acerca do tema.

O último dos objetivos pretendido era a recolha de informação sobre aplicações recentes, através da experiência prática de engenheiros portugueses, que ajudasse a comprovar alguns aspetos do comportamento (encontrados na literatura) deste tipo de solo. Para tal, foi estabelecido contacto com algumas empresas nacionais que utilizaram solos lateríticos na construção de pavimentos rodoviários, em África ou na América do Sul, tendo em vista recolher resultados da caracterização dos solos lateríticos aplicados, bem como do comportamento dos pavimentos construídos.

1.3 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

De modo a contextualizar este tema, o segundo capítulo (2. *Solos Lateríticos*) é iniciado com uma breve descrição dos solos residuais, sua origem, formação e outros aspetos importantes, para além do principal fenómeno de alteração das rochas que é o intemperismo. De seguida são descritas as laterites, ou seja, a sua definição, identificação e caracterização. Também são descritas características de algumas laterites estudadas em África, Brasil e Índia, visto estas serem as mais representativas por estarem registadas mais ocorrências nestes países, devido ao seu clima tropical.

O capítulo seguinte (3. *Aplicação de solos lateríticos em pavimentos*) centra-se na utilização das laterites em pavimentos, onde se pode encontrar alguns casos de estudo e ainda algumas recomendações para a metodologia de ensaios. É iniciado por uma breve explicação da constituição dos pavimentos, seguindo-se as especificações mais adequadas aos solos lateríticos.

Por fim, encontra-se um capítulo com as conclusões da tese (4. *Conclusões*).

2

SOLOS LATERÍTICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, define-se solos residuais, explica-se o processo de formação deste tipo de solos - o intemperismo - e distinguem-se sumariamente os tipos de intemperismo, descrevem-se os fatores condicionantes na formação dos solos residuais e as características gerais deste tipo de solo. Caracterizam-se os solos residuais tropicais e a sua distribuição geográfica, assim como um tipo peculiar de solo residual tropical - as laterites - que é o principal termo no qual se centra esta tese, sendo este termo definido, indicada a sua distribuição geográfica, e referida a sua aplicação em engenharia civil.

Começa por definir-se solo residual, explicar-se brevemente a sua formação, integrada no ciclo das rochas e distinguir-se os diferentes tipos de solos residuais: solo residual maduro ou eluvial, solos saprolíticos ou solo de alteração, e solos lateríticos.

Quanto ao processo de formação, distinguem-se: intemperismo químico; intemperismo físico ou mecânico; e intemperismo biológico. São ainda referidas as zonas morfoclimáticas (Tropical húmido, Tropical Húmido-Seco, Tropical Semiárido, Tropical Árido, Húmido de Média-Latitude, Seco Continental, Periglacial, Glacial, Montanhas) e a influência do clima nos diversos tipos de intemperismo.

Na categoria Solos Residuais existem três graus de alteração do solo: o Grau VI (solo residual), Grau V (completamente alterado) e Grau IV (muito alterado), e é referida a relação entre o grau de alteração do solo e o seu comportamento em engenharia civil.

Os fatores condicionantes na formação dos solos residuais são o clima, a rocha-mãe, o tempo, a topografia e a atividade biológica, sendo o clima o mais importante, conferindo características únicas aos solos residuais. São estas a espessura, horizontalidade e composição.

Quanto aos solos residuais tropicais, que são os solos encontrados nos trópicos, estes são distinguidos dos solos residuais normais porque nestas zonas o clima aumenta a intensidade do intemperismo e estes solos sofrem uma maior alteração. É indicada a distribuição geográfica destes solos, com distinção das fases fersialítica, ferruginosa e ferralítica, seguindo-se a caracterização física e mecânica deste tipo de solo.

Os ensaios de caracterização de solos residuais tropicais mais comuns são SPT, CPT, VST, PMT, CBR *in situ* e PLT, e na secção da caracterização (2.2.3 *Caracterização física e mecânica*) encontram-se aspetos importantes da metodologia de ensaios, assim como algumas recomendações na recolha e preparação das amostras e dos ensaios *in situ* e em laboratório.

Após caracterização dos solos residuais tropicais, inicia-se a definição e caracterização das laterites, explicando-se o seu processo de formação – a laterização. As laterites são solos ricos em óxidos de ferro e alumínio, óxidos estes que lhes confere uma cor avermelhada. É feita a distinção entre laterite e solos lateríticos.

É indicada a distribuição geográfica das laterites, que ocorrem com maior frequência em África, Índia e Brasil, pelo que foram descritos alguns casos de estudo acerca das laterites encontradas e analisadas nestes países, consideradas as mais representativas.

As caracterizações física, mineralógica e mecânica das laterites encontram-se também neste capítulo, no qual se referem alguns dos aspetos mais importantes acerca da resistência ao corte, dureza, compressibilidade, sucção, expansibilidade, plasticidade, atividade, limites de consistência e compactação.

A maior dificuldade da utilização das laterites em engenharia civil prende-se ao facto de este tipo de solo possuir pressões neutras negativas. Algumas desvantagens e vantagens deste solo são apontadas e são mencionados alguns casos de rotura de solos lateríticos.

A penúltima secção deste capítulo descreve a base de dados de referências bibliográficas relacionadas com laterites que foi criada.

Por fim, indicam-se as conclusões relativas a este capítulo.

2.1.1 SOLOS RESIDUAIS: ASPETOS GERAIS

Em engenharia Terzaghi e Peck, em 1967, definiram o solo como sendo qualquer material natural solto, não consolidado, facilmente desagregável, enquanto que Johnson e De Graff, em 1988, consideraram ser qualquer mineral com pouca resistência [1].

“Os solos residuais são aqueles que resultam da decomposição ‘in situ’ das rochas que lhe são originárias.”

Esta é a definição de solos residuais de Viana da Fonseca [2], referindo ainda que esta decomposição é gradual, com a fragmentação ou alteração química da rocha-mãe, e que são solos que dependem de diversos fatores como o clima, materiais de origem, topografia.

A origem dos solos residuais faz parte do ciclo das rochas, conforme a figura 2.1, onde a exposição dos três tipos de rochas (sedimentar, metamórfica ou ígnea) aos processos exogénicos (processos externos) provoca o intemperismo, também conhecido como meteorização, e a velocidade de decomposição da rocha é superior à velocidade de transporte de sedimentos. O processo de intemperismo é explicado no ponto 2.1.2.

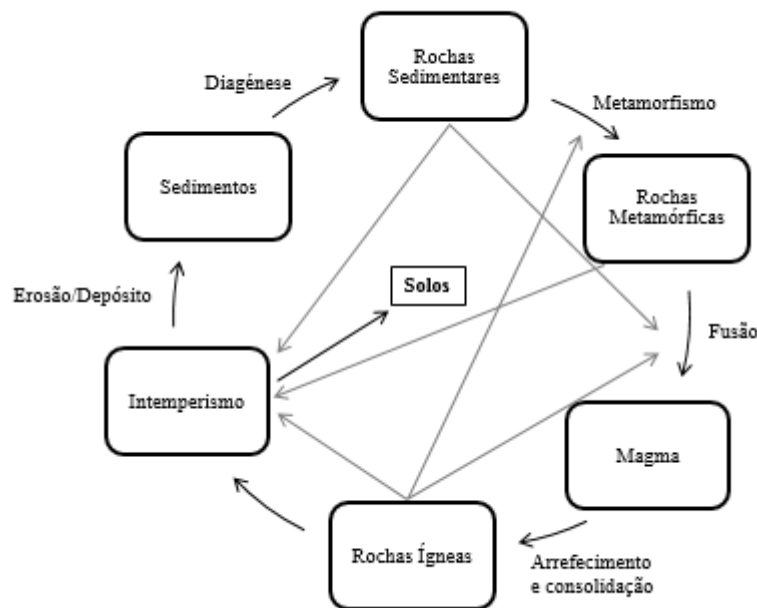


Figura 2.1 – Ciclo das Rochas e formação dos solos residuais

A rocha-mãe (sedimentar, metamórfica ou ígnea) é transformada *in situ* pelos diversos fatores associados ao intemperismo, resultando assim o solo residual. Segundo Huat et al [1], Singh e Kataria afirmam que durante e após a formação dos solos residuais há pouco ou nenhum transporte do mesmo.

Os fatores que mais influência têm na formação dos solos residuais são a composição química da rocha, os fatores ambientais e o tempo, sendo o clima o mais importante de todos, cuja influência será explicada no ponto 2.1.3 *Fatores Condicionantes e Características Gerais*.

Existem diversos tipos de solos residuais: solo residual maduro ou eluvial, que é o que está completamente exposto, tendo já perdido a estrutura original da rocha-mãe; solos saprolíticos ou solo de alteração que é um solo residual jovem e tropical; e solos lateríticos, que são o principal foco deste trabalho.

2.1.2 INTEMPERISMO - O PROCESSO DE FORMAÇÃO

O intemperismo é também conhecido como meteorização, tal como foi referido no início do capítulo. Este processo envolve um conjunto de alterações químicas e físicas das rochas, levando à sua degradação, podendo resultar na perda ou ganho de novos elementos ou compostos da rocha e dos minerais.

Existem diferentes tipos de intemperismo, uns mais dominantes que outros, dependendo da situação. Segundo as referências [1] e [3], os três tipos de intemperismo que ocorrem são:

- O intemperismo **químico** - cujo principal reagente é a água e, como o nome indica, há alteração química, sendo a decomposição dos minerais primários da rocha resultante de reações químicas como a dissolução, oxidação, hidratação, hidrólise e/ou acidólise. Huat et al [1] referem que, segundo Brand e Philipson, os solos residuais resultantes do

intemperismo químico não existem propriamente onde o clima é temperado, mas sim onde, por um período de tempo, houve clima quente e húmido.

- O intemperismo **físico ou mecânico** – é o que provoca a fragmentação das rochas, através da variação de temperatura e consequente dilatação ou contração e enfraquecimento da estrutura mineral.
- O intemperismo **biológico** – é o tipo de intemperismo que provoca a desintegração das rochas através dos organismos biológicos, que provocam a fracturação das rochas ou a produção de ácidos que reagem com as rochas, aumentando os processos químicos.

Os dois primeiros tipos de intemperismo muitas vezes atuam em conjunto, já que o intemperismo físico, ao desintegrar a rocha em vários fragmentos, está a acelerar o intemperismo químico.

A distribuição das zonas morfoclimáticas está indicada na Figura 2.2.

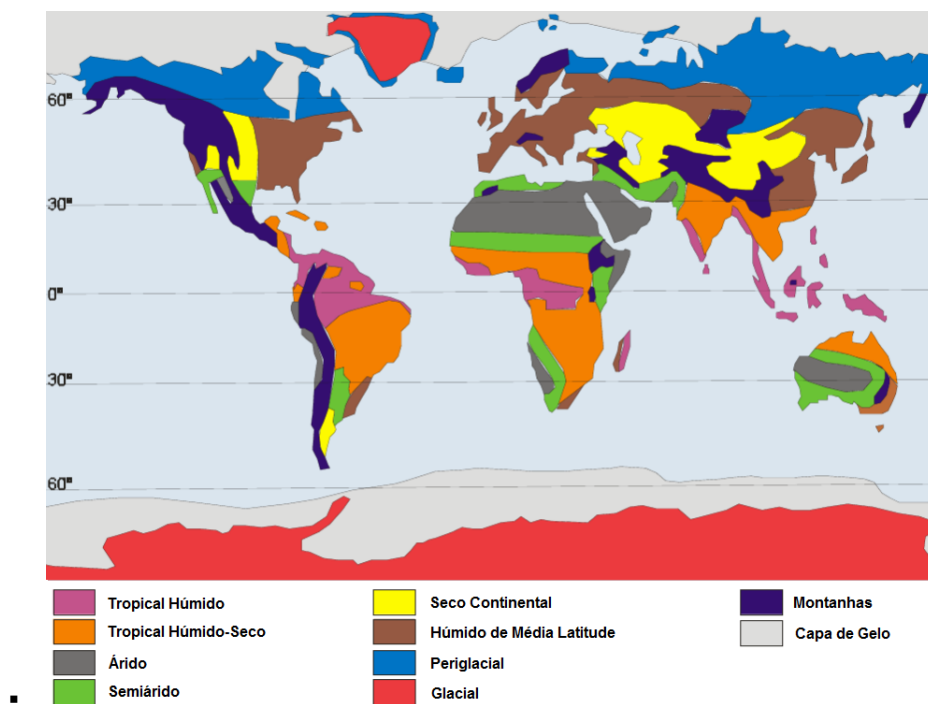


Figura 2.2 – Distribuição das zonas morfoclimáticas
(adaptado de [4])

A tabela 2.1 descreve as características de diferentes zonas morfoclimáticas e a respetiva importância dos processos geomórficos. Como pode ver-se pela tabela, o intemperismo químico tem predominância de ocorrência nas zonas tropical húmida, tropical húmida-seca e húmida de média-latidade.

Tabela 2.1– Zonas Morfoclimáticas (adaptado de [1])

Zona Morfoclimática	Temperatura Média Anual (°C)	Precipitação Média Anual (mm)	Importância relativa dos processos geomórficos
Tropical Húmido	20-30	>1500	Potencial de elevadas taxas de intemperismo químico; intemperismo mecânico limitado; ativo e episódico movimento do maciço; taxas de corrosão moderadas a baixas.
Tropical Húmido-Seco	20-30	600-1500	Intemperismo químico ativo durante a estação húmida; taxas de intemperismo mecânico baixas a moderadas; movimento do maciço bastante ativo; ação fluvial elevada durante a estação chuvosa; ação do vento normalmente mínima, mas localmente moderada na estação seca.
Tropical Semiárido	10-30	300-600	Taxas de intemperismo químico moderadas a baixas; intemperismo mecânico localmente ativo, especialmente nas margens mais secas e frias; movimento do maciço localmente ativo mas esporádico; taxas de ação fluvial altas mas episódicas; ação do vento moderada a elevada.
Tropical Árido	10-30	0-300	Taxas de intemperismo mecânico elevadas (em especial intemperismo com soluções salinas); intemperismo químico mínimo; movimento do maciço mínimo; taxas de atividade fluvial geralmente muito baixas mas esporadicamente altas; máxima ação do vento.

Húmido de Média-Latitude	0-20	400-1800	Taxas de intemperismo químico moderadas, aumentando para taxas elevadas a latitudes baixas; atividade do intemperismo mecânico moderada, com congelamento a latitudes altas; atividade do movimento do maciço moderada a elevada; taxas moderadas de processos fluviais; ação do vento confinada às zonas costeiras.
Seco Continental	0-10	100-400	Taxas de intemperismo químico baixas a moderadas; intemperismo mecânico, em especial ação de congelamento, sazonalmente ativo; atividade do movimento do maciço moderada e episódica; Processos fluviais ativos na estação húmida; ação do vento moderada localmente.
Periglacial	<0	100-1000	Intemperismo mecânico muito ativo, com ação de congelamento no máximo; taxas de intemperismo químico baixas a moderadas; movimento do maciço muito ativo; processos fluviais sazonais; taxa de ação do vento localmente alta.
Glacial	<0	0-1000	Taxas de intemperismo mecânico altas, especialmente a ação de congelamento; taxas de intemperismo químico baixas; taxas de movimento do maciço baixas, exceto localmente; ação fluvial confinada a um descongelamento sazonal; ação glacial máxima; ação do vento significativa.
Montanhas	Muito variável	Muito variável	Taxas de todos os processos variam significativamente com a altitude; ação mecânica e glacial ganham relevância a elevadas altitudes.

Como se verá na próxima seção, cada rocha tem uma certa resistência aos intemperismos, dependendo da rocha-mãe da qual derivou, já que alguns minerais são mais instáveis que outros, degradando-se mais rapidamente. Para além disso, o grau de meteorização depende também da temperatura e precipitação; da topografia; área de superfície exposta aos intemperismos; entre outros. Segundo Bell [3], Fookes *et al* afirmam exatamente isso, que o grau de meteorização depende não só da ação dos agentes que a provocam, assim como da durabilidade da rocha de que deriva o solo.

Acerca da influência do clima chegam-se às conclusões gerais de que em climas húmidos e quentes, a taxa de meteorização é maior, enquanto que em climas secos e frios, essa mesma taxa decresce[1].

Na referência [3] encontra-se uma tabela que relaciona o grau de meteorização da rocha com o seu comportamento quando aplicada a engenharia civil. No anexo I encontra-se essa relação, apenas para os graus de meteorização que interessam para este trabalho: Grau VI (solo residual - termo), V (completamente alterado) e IV (muito alterado), graus estes pertencentes à categoria Solo Residual[1].

2.1.3 FATORES CONDICIONANTES E CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os cinco fatores principais, segundo Huat *et al* [1] e Autret [5], responsáveis pela formação do solo residual são:

- O **Clima** - sendo este fator o que determina a precipitação e a temperatura, que por sua vez regulam a formação do solo, é o fator mais importante. Nos trópicos, a abundância de chuva, que é o principal reagente nos processos de meteorização, e as altas temperaturas implicam o aumento de reações químicas, logo, uma maior meteorização, enquanto que em climas mais frios e secos, a taxa de meteorização é menor. Como visto anteriormente, o clima varia nas diferentes zonas do globo, o que justifica os diferentes solos residuais que se encontram. No artigo[6], também é afirmado que o clima tem uma grande influência nas propriedades dos solos, em especial nos tropicais;
- A **Rocha-Mãe** - Como visto no ciclo das rochas na figura 2.1, o solo resulta da alteração e desintegração dos diversos tipos de rochas que se encontram expostas aos intemperismos, sendo estas as chamadas rocha-mãe. Segundo Huat *et al* [1], Gerrard afirma que, inicialmente, a rocha-mãe influencia o tipo de solo, já que as rochas diferem na composição, textura ou falhas. Quanto mais suscetíveis de alteração forem os minerais constituintes, maior será a taxa de meteorização;
- O **Tempo** - A espessura e alteração dos solos depende do tempo durante o qual os processos de formação do solo decorreram, daí que este seja um fator muito importante. Por exemplo, nos trópicos, os solos mais antigos são geralmente mais espessos e alterados. Com o tempo, ocorrem as alterações climáticas, o que modifica os processos de meteorização e erosão;
- A **Topografia** - Esta tem grande influência na orientação dos solos, na drenagem e erosão. Por exemplo, a altitude afeta a humidade do solo; o declive afeta o escoamento das águas superficiais e a erosão; o azimute é o componente da topografia que influenciará a humidade do solo, se este será mais seco e quente;
- A **Atividade Biológica** - A matéria orgânica fornecida pelas plantas e animais conduz à queda da vegetação morta e à produção de ácidos que reagem quimicamente com rochas alteradas, para além de que uma densa vegetação protege a superfície da erosão. Onde existem mais micro-organismos e plantas é normal o solo formar-se mais rapidamente e ser mais espesso, para além de que as raízes das plantas permitem que a meteorização química atinja profundidades maiores.

É sabido que os solos residuais têm características únicas. São estas:

- **Espessura** - formam camadas significativamente espessas acima do *bedrock*, dependendo dos processos de formação e de erosão em cada local (Bergman & McKnight) [1];
- **Horizontalidade** - o processo de lixiviação dá origem a visíveis horizontes distintos;
- **Composição** – inicialmente é definida pelo tipo de rocha-mãe da qual deriva o solo residual. Com o tempo, a lixiviação e a alteração química dificultam o reconhecimento da rocha-mãe.

A figura 2.3 mostra duas das características acima mencionadas, visíveis no perfil típico de um solo residual.

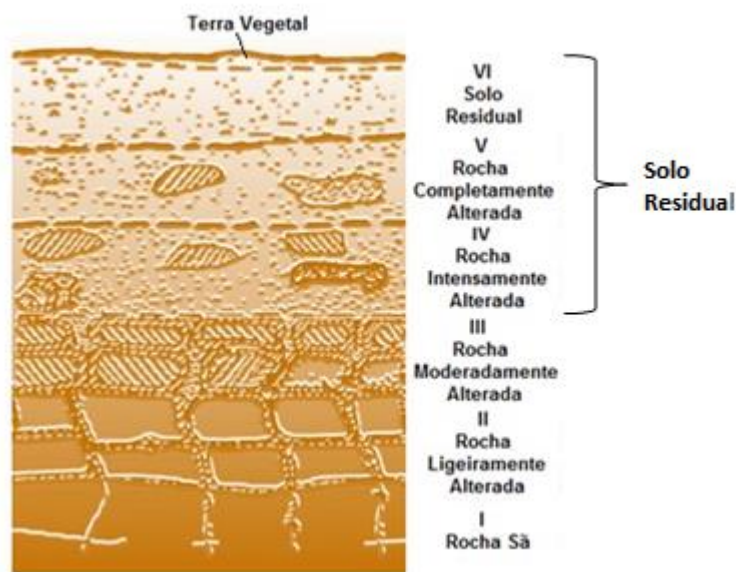


Figura 2.3 - Grau de alteração no perfil típico de um solo residual
(adaptado de [7])

Como foi visto anteriormente, os graus VI, V e IV são os que pertencem à categoria Solos Residuais, pelo que na figura 2.3 se verifica a espessura significativa que pode ocorrer acima da rocha sã. São também claramente visíveis as camadas horizontais distintas típicas dos solos residuais, devido à lixiviação.

2.2 SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS

2.2.1 PROCESSO DE FORMAÇÃO

Aos solos formados nos trópicos deu-se a designação de solos residuais tropicais. Quanto à composição mineralógica, são constituídos por minerais argilosos, minerais silicatados, óxidos metálicos hidratados, quartzo e SiO_2 , cuja proporção depende da intensidade do intemperismo e do avanço da degradação.

Segundo Cook e Newill [8], os solos que se encontram em zonas tropicais sofrem uma maior meteorização quando comparados com os solos que se encontram em zonas temperadas, o que exige

um maior cuidado na identificação e caracterização do solo, para que se possa proceder ao uso adequado do mesmo.

Nestas zonas morfoclimáticas (zonas tropicais), o intemperismo químico tem mais influência do que a desagregação mecânica[1], como se pode confirmar pela tabela 2.1. Nos trópicos há condições para uma intensa meteorização (acelerada pelas altas temperaturas e pela presença de água). Os solos residuais formados nestas áreas apresentam normalmente uma camada bastante espessa.

O perfil dos solos residuais tropicais consiste em camadas horizontais distintas mais ou menos paralelas à superfície e, simultaneamente apresenta um perfil vertical, que geralmente se encontra mais degradado quanto mais próximo da superfície devido às intempéries, como ilustrado na figura 2.4.

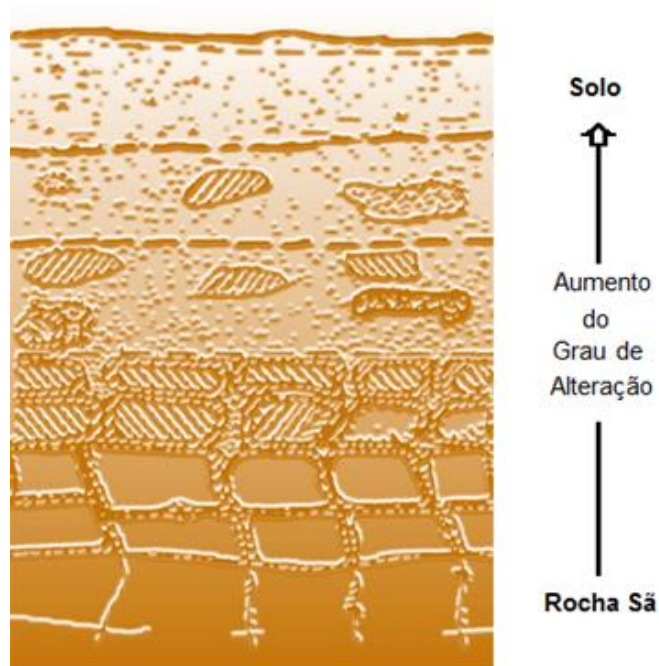


Figura 2.4– Perfil típico de um solo residual tropical
(adaptado de [1])

Com o passar do tempo, dá-se a alteração química, pelo que os perfis são alterados, através do fenómeno de laterização, o qual será descrito no subcapítulo 2.3 que concerne às laterites.

Dependendo se se trata de uma rocha ígnea ou metamórfica, o perfil sobre a rocha sã varia. Note-se que são estes os dois tipos de rochas típicos em zonas tropicais. Os perfis das rochas ígneas apresentam uns aglomerados arredondados e irregulares por não terem sido atingidos pelo intemperismo, enquanto que os perfis das rochas metamórficas apresentam normalmente diáclases-relíquia, descontinuidades e também aglomerados arredondados e irregulares[1].

2.2.2 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

Nas zonas tropicais húmidas encontram-se grandes extensões de solos residuais até grandes profundidades. Segundo Huat *et al* [1], em 1982 Duchaufour sugeriu uma classificação das fases dos

solos residuais, dependente do clima, a qual foi suportada por Fookes em 1997 e por White em 2006 [1]. As fases são: 1 – Solo Fersialítico, 2 – Solo Ferruginoso e 3 – Solo Ferralítico.

Um solo fersialítico tem uma proporção variável de óxidos de ferro, uma pequena quantidade de minerais caulínicos, uma relação $\frac{SiO_2}{R_2O_3} < 2$ e pode apresentar horizontes mais ou menos duros e proporção variável de concreções lateríticas [9]. Um solo ferruginoso é rico em óxidos de ferro e é principalmente constituído por caulinite, enquanto que um solo ferralítico é constituído por óxidos de ferro e alumínio e por minerais caulínicos, podendo o seu perfil apresentar concreções lateríticas [9].

A tabela 2.2 resume as três fases dos solos residuais propostas de acordo com as condições climáticas e, na figura 2.5, podemos ver a distribuição dos mesmos no globo.

Tabela 2.2– Fases de um solo residual tropical
(Traduzido de [1])

Fase	Zona climática	Temperatura Média Anual (°C)	Precipitação Anual (mm)	Época de Clima Seco	Tipo de Solo
3	Tropical	>25	>1,5	Não	Ferralítico
2	Subtropical	20-25	1,0-1,5	Por vezes	Ferruginoso
1	Subtropical	13-20	0,5-1,0	Sim	Fersialítico



Figura 2.5 – Distribuição geográfica dos solos residuais tropicais
(adaptado de [1])

Em *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering* [1] encontra-se a relação da classificação pedológica de Duchaufour com o grau de alteração:

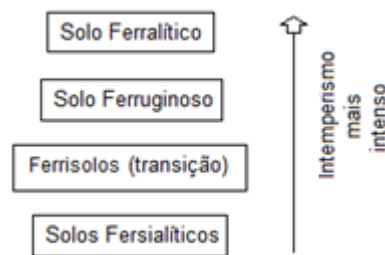


Figura 2.6 – Relação da classificação pedológica com o grau de alteração do solo
(adaptado de [1])

2.2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

As propriedades dos solos residuais são difíceis de testar em laboratório, pelo facto de ser um solo difícil de amostragem, logo, as propriedades são normalmente determinadas *in situ*. Os ensaios de caracterização de solos residuais tropicais mais comuns são os já conhecidos SPT, CPT, VST, PMT, CBR *in situ* e PLT, [8] que serão referenciados na secção 2.2.3.1 *Metodologia de Ensaaios*, com algumas recomendações. Refere-se que estes ensaios não são exclusivos para os solos residuais. Ainda segundo Cook e Newill [8], as amostras devem ser conservadas e estudadas no estado natural do solo, sem este ter sido remexido. A Metodologia MCT é também muito útil para identificar solos com comportamento laterítico, seguindo-se uma breve descrição desta metodologia, no ponto b) dos Ensaaios de Laboratório.

2.2.3.1 Metodologia de Ensaaios

Recolha e Preparação de Amostras

Já sabendo que os solos residuais são solos difíceis de amostrar, há que ter um certo cuidado neste campo. Vários autores criaram recomendações neste sentido, pelo que as mais pertinentes serão de seguida descritas, havendo um consenso geral quanto ao cuidado a ter na amostragem e transporte.

Segundo Huat *et al* [1], uma amostra de boa qualidade é “*a que não foi perturbada pela perfuração, amostragem e corte, mas na qual houve libertação de tensões*”, sendo que na realidade não existem amostras não perturbadas, dependendo então do grau de alteração do solo após ter sido removido; da representatividade do local; do método de amostragem; e do manuseamento da amostra.

No caso dos solos residuais, é muito importante conseguir amostras imperturbadas, pois os equipamentos mecânicos podem modificar a estrutura do solo, daí ser necessário utilizar equipamento mecânico adequado; para além de que permite identificar, classificar o solo e realizar ensaios representativos. O amostrador Mazier permite obter amostras na sua condição *in situ*[1], sendo portanto uma boa opção.

Os solos residuais tropicais são um caso mais complicado devido à sua heterogeneidade e anisotropia [1], daí ser importante definir bem o plano de amostragem para que este seja representativo do local

em estudo, como já foi antes referido ser importante. Para além disso, já foi referido que a Mecânica dos Solos Clássica não é completamente adequada para este tipo de solos, pelo que alguns testes podem não ser fiáveis neste tipo de solo, sendo preciso fazer ajustes. É então necessário que os testes sejam realizados por especialistas em amostragem e ensaios, e também ter sempre algum espírito crítico na análise dos resultados, já que a fricção durante o corte da amostra; a redução da pressão neutra quando as amostras emergem à superfície, a vibração aquando do transporte e os erros na preparação e ensaios, podem perturbar as amostras.

As amostras devem ser fechadas em recipientes de vidro ou plástico, sacos de plástico ou latas; e a estrutura do solo, índice de vazios, interligação entre partículas e teor em água, tendo muita influência na resistência ao corte, devem ser preservados, pois algumas das propriedades dos solos residuais tropicais são sensíveis como, por exemplo, o índice de vazios altamente variável, que pode levar a resultados enganadores da resistência ao corte e da permeabilidade. É ainda importante secar o menos possível as amostras, pois pode implicar a alteração da estrutura do solo e seu comportamento [1].

Ensaio de Laboratório

a) Determinação de Propriedades

Na determinação do teor em água do solo, segundo Huat *et al* [1], Fookes sugeriu que se realizem testes comparativos em amostras duplicadas, medindo o teor em água na secagem até que não haja perda de massa, pois alguns solos residuais tropicais podem conter água cristalizada na sua estrutura mineral, que se liberta para temperaturas entre 105 e 110°C, sendo um modo de identificar este tipo de água que faz parte das partículas sólidas já que este não deve ser contabilizado como teor em água.

Deve ser realizado o teste de retração, para definir a capacidade de retração ou expansão do solo, já que os solos residuais tropicais tendem a alterar consideravelmente o seu volume aquando da molhagem ou secagem, sendo importante, segundo Huat *et al* [1], distinguir os materiais que retraem de forma irreversível dos que voltam a expandir quando em contacto com a água. Estudos realizados por Mutaya e Huat concluíram que um solo menos argiloso e com menos teor em água tende a retrair menos [1].

Ao determinar a densidade das partículas, deve ser conservado o teor em água do solo e não deve ser realizado nenhum pré-tratamento, de modo a obter o valor correto.

b) Metodologia MCT

A Metodologia MCT, criada por Nogami e Villibor segundo o Manual de Pavimentação do DNIT[10], surge no âmbito da classificação geotécnica de solos tropicais, permitindo identificar o comportamento laterítico e é útil para os estudos dos solos em pavimentos e outras obras de terras. Mais tarde, Parsons introduziu o ensaio de compactação mini-MCV, que permite determinar a energia de compactação e teor de água mais adequados [10].

Os ensaios realizados para classificação MCT, a sua finalidade e os parâmetros medidos encontram-se enumerados na tabela 2.3. O procedimento encontra-se no Manual de Pavimentação do DNIT [10], do qual foi adaptada a tabela do anexo II, relativa aos solos com comportamento laterítico.

Tabela 2.3– Ensaios realizados para classificação MCT

(adaptado de [11])

Ensaio/referência	Finalidade	Parâmetros
Compactação miniatura (mini-Proctor) – DNER-ME 228/4	Definir parâmetros de compactação (teor em água ótimo e peso específico seco máximo)	$W_{ótimo}$ (%) e $\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
Compactação mini-MCV* - DNER – ME 258/94	Definir índices para classificação MCT	Índices c' , d' e e'
Perda de massa por imersão* - DNER – ME 256/94	Definir índices para classificação MCT	Perda de massa por imersão (P_i em %)
Mini-CBR e expansão – DNER 254/97	Avaliar a capacidade de suporte e o potencial de expansão	Índice mini-CBR (em %) e Índice RIS** (em %)
Contração por secagem ao ar – Nogami & Villibor	Avaliar o potencial de contração por secagem	Contração por secagem (em %)
Infiltrabilidade	Avaliar a velocidade de ascensão capilar	Coefficiente de sorção (s em cm/min ^{1/2})

*Ensaios destinados para classificação MCT do solo

** O índice RIS representa o inverso da perda percentual de capacidade de suporte (pelo mini-CBR) com a imersão

c) CBR

Em *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering* [1], é referido que Parker considera insuficientes 4 dias de embebição para terrenos lateríticos, então nos ensaios realizados e descritos nesta referência, aumentou-se o tempo de embebição, mas mesmo aos 7 dias de embebição nenhuma amostra se apresentava fissurada, pelo que ainda não será suficiente este tempo.

d) Ensaios de resistência ao corte

Normalmente recorre-se a ensaios de corte direto (em caixa de corte) ou a ensaios triaxiais para determinar a resistência ao corte do solo, sendo o primeiro preferível pelo facto de ser possível utilizar uma caixa circular, ideal para solos residuais tropicais que são sensíveis, por evitar as perturbações nos cantos da caixa, e também porque os ensaios triaxiais supõem completa saturação, o que não é comum nos solos residuais, pois estes apresentam-se em diversas condições, em especial na parcialmente saturada [1]. Apesar do ensaio de corte direto ser o mais utilizado, este tem as desvantagens de não ser

possível controlar a drenagem nem determinar a pressão neutra, e de só permitir determinar a tensão normal total.

Segundo Huat *et al* [1], Blight sugeriu que as amostras sejam preparadas e colocadas na caixa de corte com as menores perturbações possíveis e sejam inundadas com água. Depois, aplica-se a tensão normal e realizam-se leituras até que a amostra pare de expandir [1]. Quanto aos ensaios triaxiais em solos residuais tropicais, as amostras devem ter 75 mm de diâmetro de modo a minimizar a perturbação das mesmas e assegurar a representatividade, sendo que no Brasil, Austrália e outros sítios, é comum utilizar o diâmetro 100 mm [1]. É também recomendado nesta referência que o diâmetro não seja inferior a oito vezes o tamanho máximo das partículas, e que a relação do comprimento com o diâmetro seja de 2:1.

e) Ensaios de pressão neutra e sucção

A sucção matricial é muito importante por ter muita influência na estabilidade da estrutura, na condutividade hidráulica, na resistência ao corte, rigidez e na variação de volume, existindo uma resistência adicional nos solos não saturados devido à sucção [1]. A sucção pode ser medida em laboratório, pelo método do papel filtro, ou *in situ* com tensiómetros. Na secção 2.3.5 *Caracterização Mecânica*, ponto c), está explicada a sucção.

Ensaios *In Situ*

a) Furos de sondagem, SPT, CPTU, PMT, PLT e DMT

Os furos de sondagem devem ser feitos com uma distância pequena uns dos outros, de modo a confirmar o local dos depósitos e espessura [12].

O SPT é o ensaio mais utilizado, pela sua simplicidade e capacidade de explorar camadas mais rígidas e duras, quando combinado com a perfuração rotativa. Os solos lateríticos geralmente apresentam um maior $(N1)_{60}$ [1].

O CPTU é também muito utilizado, pela vantagem de medir a pressão neutra, mas em solos não saturados, esta medição tem pouca aplicação [1].

Os resultados obtidos do PMT devem ser comparados com os resultados teóricos, ou seja, com a curva de pressão-expansão calculada, para que se possa assegurar que os parâmetros estão corretamente medidos [1]. Esta referência afirma ainda que este ensaio permite estimar o potencial de colapso de um solo residual, assim como o PLT *in situ*.

O PLT, apesar de ser um ensaio comum, tem a desvantagem de nos solos cimentados a sua modelação não ser fácil, o que exige uma análise numérica sofisticada. Estes solos apresentam ainda um mecanismo distinto, que não pode ser avaliado pelos métodos clássicos [1].

Quanto ao DMT, não se sabe ao certo como a estrutura cimentícia dos materiais coesivos interfere nos parâmetros medidos [1].

b) Ensaios sísmicos

Os ensaios sísmicos permitem identificar a espessura do estrato, a profundidade até ao *bedrock*, identificar cavidades, e identificar propriedades dos estratos e sua variação espacial, entre outras. Os ensaios sísmicos mais utilizados são o CHT, DHT e SR.

c) Caracterização das propriedades mecânicas

Os solos residuais tropicais são solos coesivos, pelo que se tende a ignorar a componente c' , correlacionando-se então os parâmetros *in situ* com ϕ' . Os ensaios PMT e PLT são os mais consistentes para determinar as propriedades mecânicas dos solos coesivos [1].

d) Compressibilidade e permeabilidade

Para determinar a compressibilidade de solos residuais tropicais, são mais comuns os ensaios SPT, PMT e PLT [1].

A permeabilidade dos solos residuais depende do tamanho das partículas, do índice de vazios, da mineralogia e do grau de fissuração e características das fissuras, e pode ser determinada *in situ*, sendo importante que o furo usado para o teste esteja limpo, para que o resultado seja preciso [1]. É necessário ter em conta a influência da sucção matricial na permeabilidade.

e) Ensaio para solos não saturados

Como já foi referido, os solos tropicais residuais podem estar parcialmente saturados, pelo que se deve ter este aspeto em conta na interpretação dos resultados dos ensaios. Para solos nesta condição, é muito importante definir a curva característica de água no solo, visto que esta fornece informação relevante como o comportamento mecânico e hidráulico do solo nestas condições [1].

Até hoje, foram propostos alguns modelos de análise de solos não saturados, dependentes da pressão média efetiva, tensão de desvio, sucção e volume específico, sendo portanto necessário medir a sucção matricial *in situ* [1]. No capítulo 4 de *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering* [1] encontra-se descrito o comportamento do solo nesta condição não saturada.

2.3 LATERITES

2.3.1 DEFINIÇÃO DE LATERITE

A primeira referência ao termo laterite, segundo Amu *et al* [12], e Bell [3], surgiu na Índia, em 1807, quando Buchanan observou que este solo, quando exposto ao sol, secava e ficava muito duro, podendo ser usado como blocos para construção. Daí ter derivado do termo later, que em latim significa “tijolo”. Contudo, em *Latérite et Graveleux Latéritique* de 1983 [5], Autret chama a atenção para o facto de esta definição de Buchanan ter apenas significado histórico, já que as laterites conhecidas atualmente nem permitem fazer tijolos para construção.

Já em 1959, a definição de laterite proposta em *As Laterites do Ultramar Português* [13] é a seguinte:

"Material de estrutura vacuolar, muitas vezes matizado, com cores variando do amarelo ao vermelho mais ou menos escuro e mesmo negro, constituído por uma crosta mais ou menos contínua de espessura e dureza variáveis, tendo muitas vezes o aspeto duma escória, ou ainda contendo concreções isoladas, oolíticas e pisolíticas de maior ou menor resistência e misturadas a uma parte argilosa."

Em 1975, Larousse [5] definiu laterite como:

"Solo vermelho vivo ou vermelho acastanhado, rico em óxido de ferro e alumínio, formado em clima quente. Os solos lateríticos são altamente lixiviados, ricos em ferro (minerais da Guiné) e contêm alumina livre. Na zona florestal equatorial húmida, são laterites argilosas. A norte e a sul, na estação seca, observa-se a formação de carapaças lateríticas, rochas muito duras, expostas na superfície nas zonas mais áridas e completamente inférteis."

As laterites devem ser distinguidas dos solos lateríticos, uma vez que estes últimos apresentam uma menor concentração de óxidos, refere-se no artigo [12], entre outros que fazem a mesma distinção. Na Classificação de USDA (Departamento de Agricultura dos Estado Unidos), o termo "laterite" é substituído por "plintita" e o termo "solos lateríticos" é também substituído por "oxissolos" [14].

Os solos lateríticos são caracterizados pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, resultantes da laterização, explicada após a definição de solo laterítico. As laterites têm tipicamente uma cor avermelhada, podendo ser mais amarelado ou acastanhado, dependendo da quantidade de óxidos ou hidróxidos de ferro presentes.

Em *As Laterites do Ultramar Português* [13], de 1959, define-se solo laterítico como:

"Solo cuja fração argilosa tem uma relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3} < 2$; apresenta baixa expansibilidade"

e terreno laterítico como:

"Terreno com percentagem significativa de laterites e (ou) de solo laterítico. Consideram-se percentagens significativas aquelas que conferem ao terreno um comportamento laterítico."

Em 1972, o Instituto Geológico Americano definiu laterite como:

"Subsolo vermelho ou material rico em óxidos de ferro e/ou alumínio secundários, altamente degradados, quase sem bases ou silicatos primários, e com possível conteúdo em grandes quantidades de quartzo e caulinite. Desenvolve-se em clima tropical ou em clima temperado florestal, e é um resíduo ou produto final do intemperismo. A laterite endurece após molhagem e secagem (...)"

e solo laterítico como:

"Um solo que contém laterite; e qualquer solo tropical avermelhado obtido através de um intenso intemperismo." [14].

O estudo realizado e descrito no artigo [15] demonstrou que as propriedades do solo laterítico dependem do teor de água e do grau de saturação do solo, podendo variar bastante, e refere ainda que a coesão do solo é mais influenciada pelo teor em água do que pelo ângulo de atrito.

A laterização é o processo responsável pela cor avermelhada dos materiais lateríticos e consiste na desagregação e lixiviação das rochas, aceleradas pela meteorização química típica dos climas tropicais, levando ao empobrecimento em bases solúveis - Na, Ca, Mg, K -e ao aumento das bases insolúveis - Fe, Al, Ti, etc. - resultando minerais argilosos (como a caulinite), entre outros, e uma acumulação de sesquióxidos - Fe_2O_3 e Al_2O_3 [1], [13]. Os minerais que resultam dos primários

dependem das condições climáticas, já que os solos em zonas cujo clima alterna entre época húmida e seca apresentam um perfil diferente dos que se encontram em zona sempre húmida, como se mostra na figura 2.7.

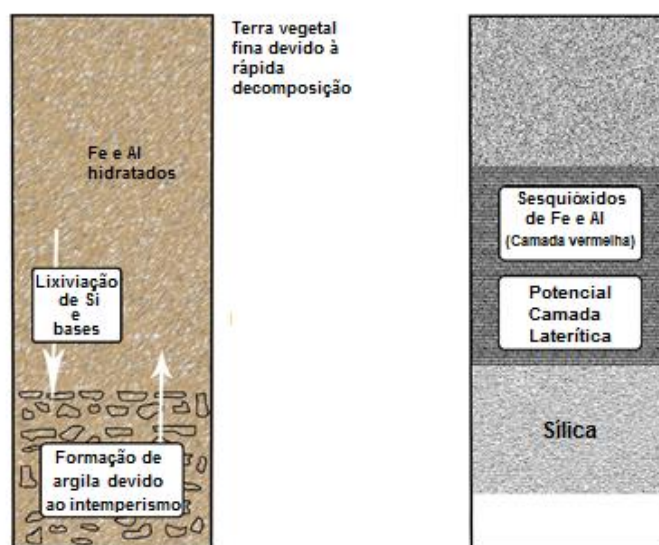


Figura 2.7. – Perfil de solo tropical em clima húmido vs. clima alternadamente húmido e seco (adaptado de [1])

2.3.2 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

As laterites surgem principalmente em Guiné, Angola, Moçambique e Índia, no Ultramar Português. Estão também registadas muitas ocorrências no Brasil e Austrália.

Os diversos tipos de laterites apresentam algumas propriedades em comum, as quais estão apresentadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Propriedades comuns das laterites (traduzido de [3])

Teor de água(%)	10-49
Limite de Liquidez (%)	33-90
Limite de Plasticidade (%)	13-31
Fracção Argilosa	15-45
Peso volúmico seco (kN/m^3)	15,2-17,3
Coesão, c_u (kPa)	466-782
Ângulo Interno de Atrito, ϕ_u (°)	28-35
Resistência à Compressão não confinada (kPa)	220-825
Índice de Compressibilidade	0,0186
Coeficiente de Consolidação (m^2/ano)	262
Módulo de Young (kPa)	$5,63 \times 10^4$

2.3.2.1 Laterites de África

As ocorrências de Moçambique surgem principalmente nas baixas litorais de Inhambane e nos planaltos de Vila Pery e Nampula. Em Angola, surgem principalmente nos planaltos de Nova Lisboa, Sá da Bandeira e Gabela.

Em *Laterita e Solos Lateríticos do Brasil* [16] é feita referência a estudos de laterites africanas, que puseram em causa a antiguidade, devido à observação de possível destruição de uma couraça pelo topo e reconstituição pela base, e também à observação de nódulos milimétricos das couraças que se desprendem e contribuem para a formação de concreções lateríticas.

Em *Latérite et Graveleux Latéritique* [5] encontra-se a distribuição das diferentes formações lateríticas em África (figura 2.8), em 1983. Já o artigo “*Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia*” [17], é um artigo onde pode encontrar-se características de laterites africanas (ferricretes) e sua distribuição em 1991 (figura 2.9). Este artigo refere ainda que as laterites africanas diferem das brasileiras devido à evolução paleoclimática (variação do clima ao longo da evolução da Terra), como se pode confirmar na distribuição de 1983 para a de 1991 (figura 2.9), em África.

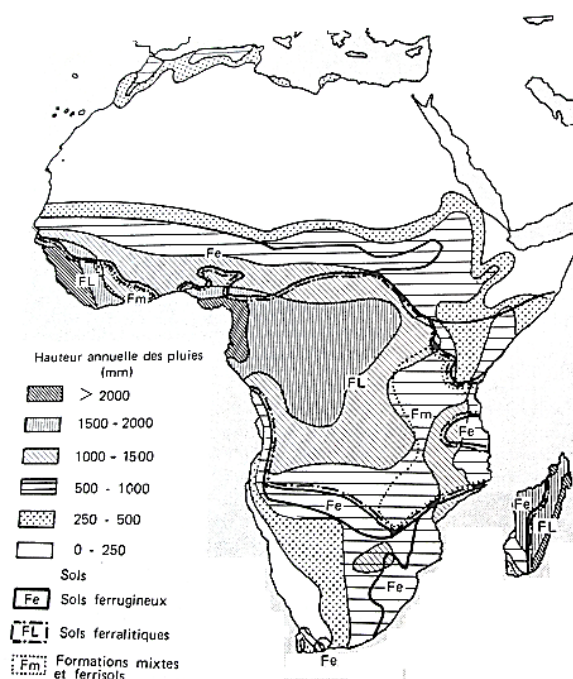


Figura 2.8 – Distribuição das diferentes formações lateríticas em África em 1983 [5]

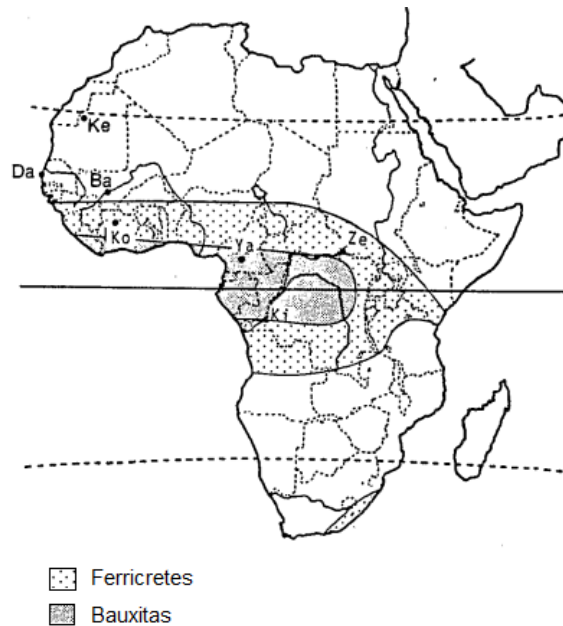


Figura 2.9 – Distribuição das laterites (ferricretes) em África em 1991 [18]

Um estudo realizado a bolsas lateríticas da Baixa de Jangamo (Moçambique) [19], umas mais laterizadas que outras, mostrou que as águas encontradas nessas bolsas apresentavam um pH entre 6,0 e 6,6, e que o transporte para o laboratório provocou a precipitação do óxido de ferro. As análises químicas indicaram um alto grau de hidratação dos óxidos, e as análises granulométricas mostraram que nas bolsas mais laterizadas a percentagem de finos é maior, devido à aderência dos óxidos de ferro ao quartzo, e que a percentagem de elementos menores que 2μ é de 35% a 40%. A identificação dos minerais permitiu concluir que a origem é uma rocha metamórfica argilosa e o corte mostrou manchas ferruginosas que aumentavam em quantidade e tamanho com a profundidade, tendo sido identificados grãos de quartzo e hematite.

Outro estudo de terrenos lateríticos de Nampula e António Enes (Moçambique) [20], mostraram que algumas características eram distintas nestes dois locais. Os terrenos de Nampula apresentavam poucas concreções, e eram constituídos por caulinite, gibsita, hematite e goethite, enquanto que os terrenos de António Enes continham maiores quantidades de óxidos de ferro e menor quantidade de caulinite, e continham também gibsita e concreções mais duras, mas em ambos os locais a quantidade de matéria orgânica era pouca.

2.3.2.2 Laterites da Índia

Na Índia, as laterites estão bastante espalhadas e contêm principalmente gibsita e alguma ou nenhuma boethite [18].

Em *Lateritas* [21] é representada a evolução das laterites de Kerala (figura 2.10) e também perfis lateríticos dessa região (figura 2.11), e é ainda referido um estudo de perfis lateríticos sobre basaltos, também na Índia, nos quais se constatou uma intensa lixiviação do cálcio, álcalis e de parte da sílica que se encontrava acima do nível de água, o que levou à formação de gibsita, enquanto que abaixo do nível da água, devido à má drenagem, formou-se caulinite.

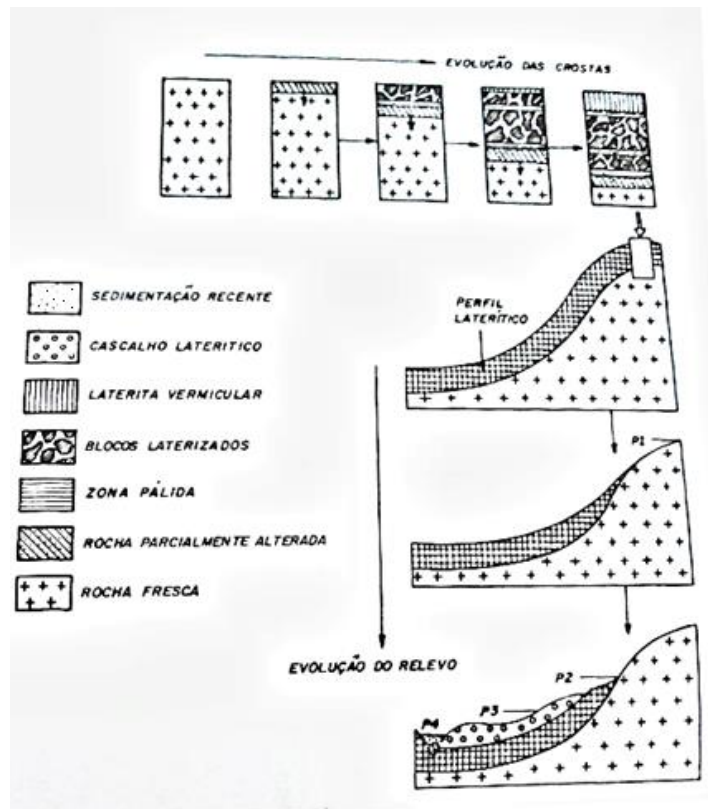


Figura 2.10 – Evolução das laterites de Kerala [21]

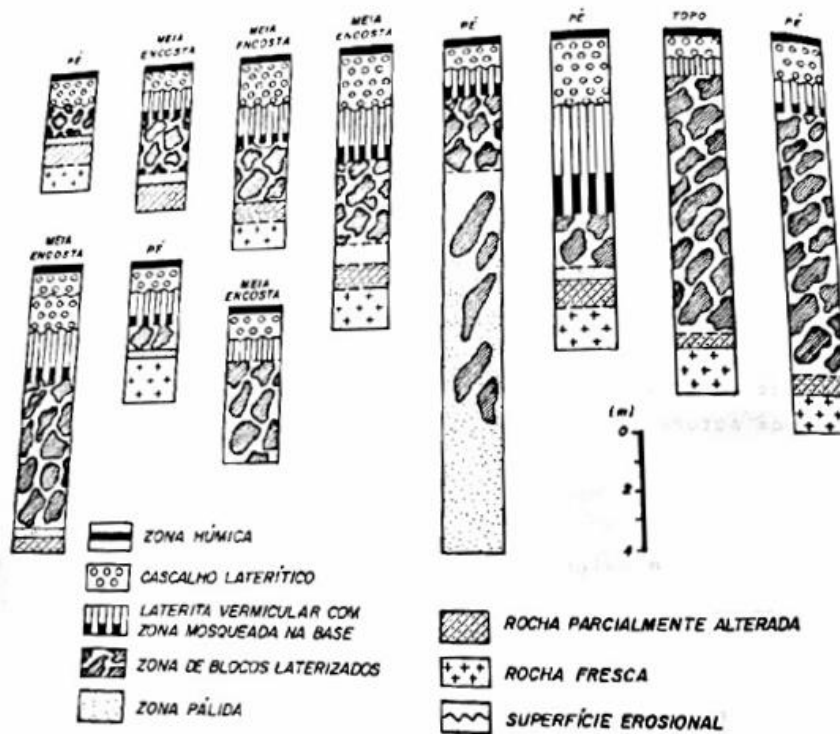


Figura 2.11 – Perfis lateríticos de regiões gnássicas em função do relevo (Kerala) [21]

As laterites estudadas na Índia [1], em Calicut (Kerala) e Rajahmundry (Andhra Pradesh), eram constituídas por haloisite, caulinite, goethite, gibbsite, e minerais de quartzo; apresentavam um pH de 6,1 a 6,9, ou seja, ácido; 7 a 10% de matéria orgânica, apesar de em Kerala central o conteúdo em matéria orgânica ser bastante inferior (de 0 a 1,3%); valores elevados de capacidade de permuta catiónica, devido à presença da haloisite mas, assim como ocorre com a matéria orgânica, a capacidade de permuta catiónica é bastante inferior nas laterites de Kerala central.

Quanto ao rácio $\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$, as laterites de Kerala apresentam $\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$ muito pequeno (0,1 a 0,54); 0,71 nas laterites de Andhra Pradesh; 0,18 nas laterites de Assam; 0,12 nas laterites de Maharastra; e 1,12 nas laterites de Madhya Pradesh, ou seja, pela classificação físico-química do ponto 2.3.4, pode concluir-se que são todas classificadas como solo de laterite ($\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3} < 1,33$).

Os gráficos seguintes mostram a distribuição da fração argilosa (figura 2.12) e o índice de vazios (figura 2.13) *in situ* das laterites de Kerala e Kanara Sul, concluindo-se que a maior parte das amostras continha pouco material argiloso e que a maioria tem um índice de vazios a variar entre 0,36 e 0,74.

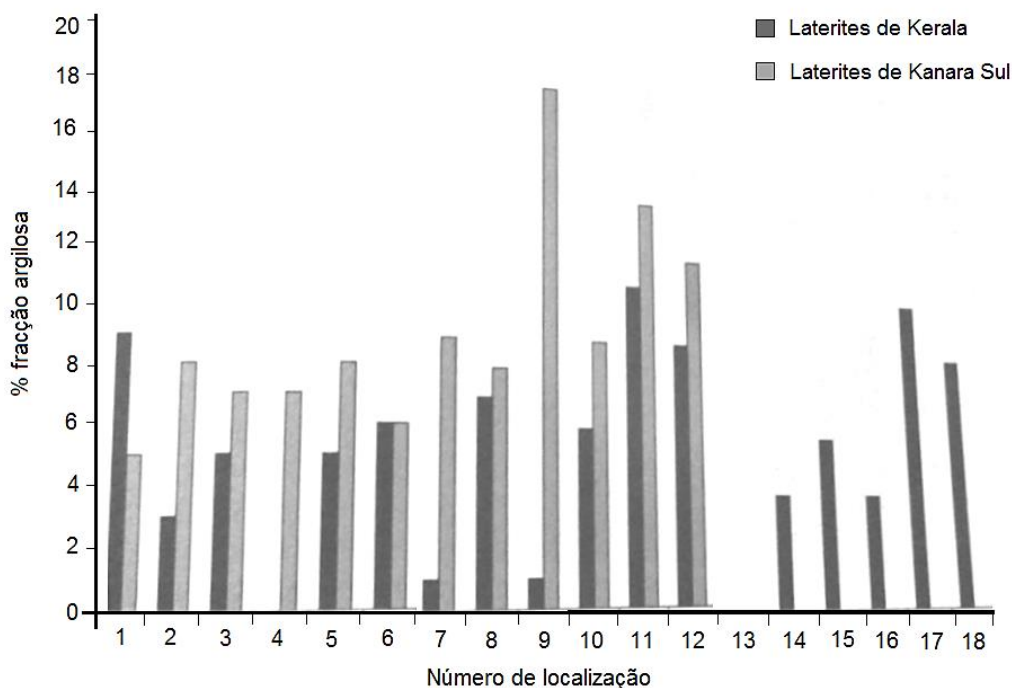


Figura 2.12 – Fração argilosa das amostras de laterites em Kerala e Kanara Sul
(adaptado de [1])

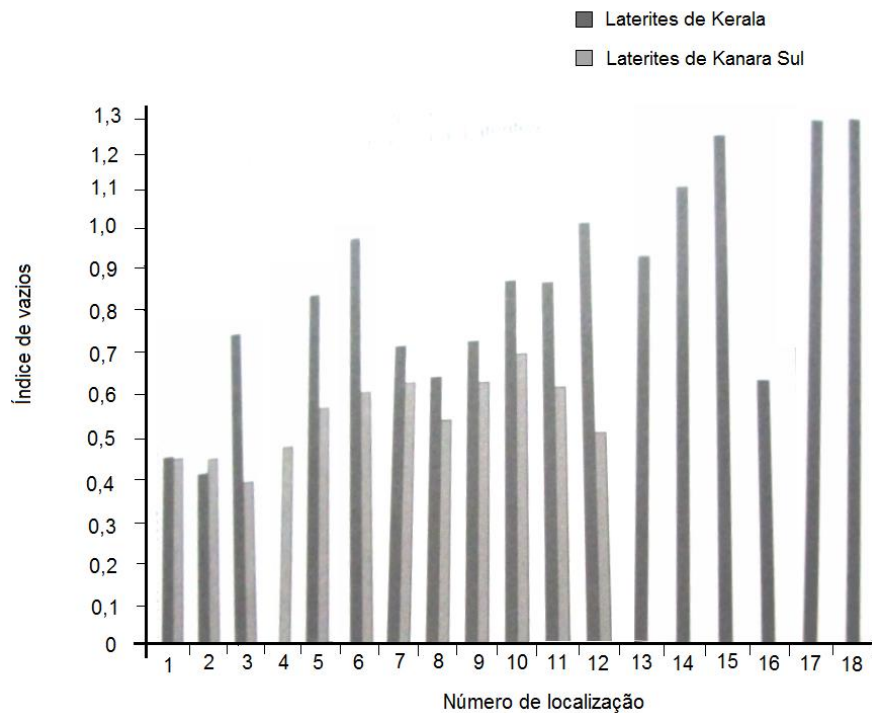


Figura 2.13 – Índice de vazios *in situ* de laterites em Kerala e Kanara Sul
(adaptado de [1])

Registaram-se ainda outros aspetos em gráficos do tipo dos anteriores (consultar *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering* [1]), como os valores do máximo peso específico seco e teor ótimo em água resultantes do Proctor, que variam entre 1,48 e 2 Mg/m³ e entre 14 e 23%, respetivamente, para a maioria das amostras; resistências à compressão entre 10 e 42 MPa; 10 a 81% de perda de resistência na molhagem; ângulos de atrito entre 25 e 35°; valores de coesão entre 4 e 10 kPa. Quanto ao SPT, foram registados 50 batimentos, pelo que se classificou a laterite como dura; não se encontrou o nível de água a 1,5 m.

2.3.2.3 Laterites do Brasil

O artigo [19] mostra a distribuição das laterites no Brasil (figura 2.14).

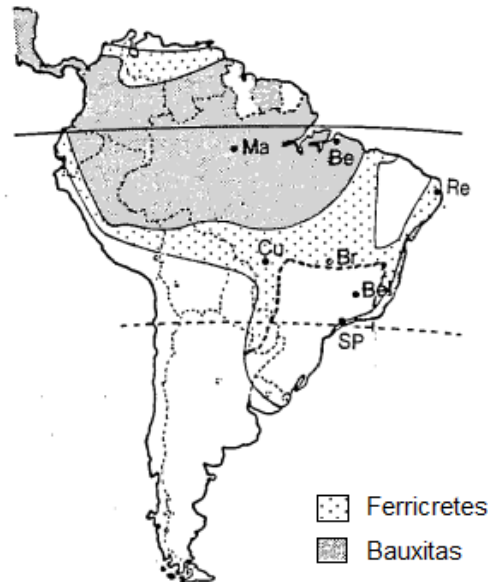


Figura 2.14 - Distribuição das laterites (ferricretes) no Brasil em 1991 [18]

No Estado de São Paulo, mais precisamente em Ribeirão Preto, foram encontradas laterites, as quais foram classificadas como latossolo vermelho distroférico, enquanto que em Barra Bonita foram relatados litossolos que formam uma crosta de aspeto ferruginoso, vermelha-amarelada [22].

A tese de mestrado [23] caracteriza três locais de solos residuais tropicais no Estado da Paraíba, cujos perfis estão representados nas figuras seguintes.

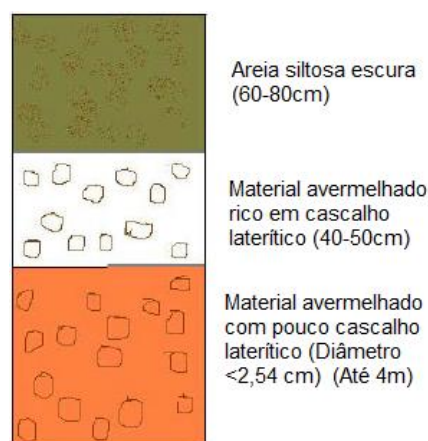


Figura 2.15 – Perfil 1 (Solo residual tropical da Região de Areia)
(adaptado de [23])

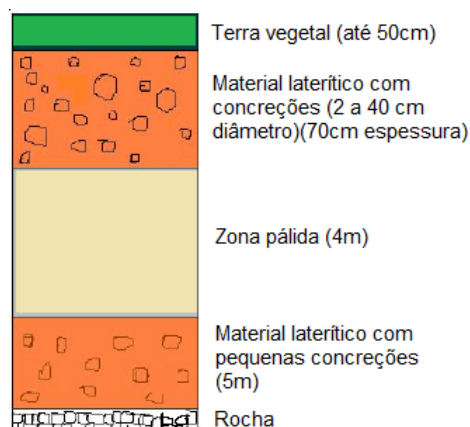


Figura 2.16 – Perfil 2 (Solo residual tropical da Região de João Pessoa)
(adaptado de [23])

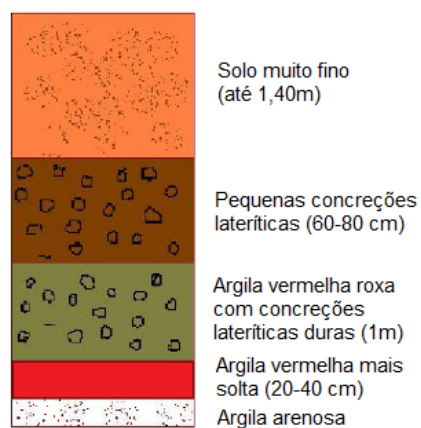


Figura 2.17 – Perfil 3 (Solo residual tropical da Região de Sapé)
(adaptado de [23])

O solo de Areia é um solo residual típico, apresentando gibsita e goethita e partículas de quartzo e mica muscovita junto do quartzo; o solo de João Pessoa é constituído por caulinita, gibsita, goethita e uma maior quantidade de quartzo, mostrando uma lixiviação maior; as amostras de Sapé revelaram a presença de hematite cimentada, gibsita e caulinita. O solo de João Pessoa continha mais argila e melhor graduação, o que leva a uma maior sucção.

Os ensaios concluíram que os solos apresentavam uma composição química típica de solos lateríticos, e que não continham argila natural, devido aos sesquióxidos de ferro unirem os constituintes argilosos [23]. O ensaio de Proctor revelou que teor ótimo em água era de 17,9 %, 20,4% e 18,9%, para as amostras de Areia, João Pessoa e Sapé, respetivamente, com pesos específicos máximos secos de 16,9, 16,8 e 17,0 kN/m³.

Os pH variaram de 4,7 a 5,3, sendo portanto ácidos, como é típico dos solos lateríticos e a matéria orgânica está presente em pequena quantidade, assim como os solos estudados na Índia. A autora da tese, Martinez [23], concluiu ainda que a compressibilidade diminui com o aumento da sucção.

Aconselha-se a consulta da tese [23] para informação mais exaustiva acerca do estudo destes solos.

2.3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Em 1959, de acordo com o documento *As Laterites do Ultramar Português* [13], várias eram as classificações para os solos lateríticos propostas até à data. Alguns autores baseavam-se no grau de avanço do processo de laterização; outros no processo de formação ou condições de ocorrência; nas quantidades de hidróxidos de ferro e alumínio; ou ainda, na relação molecular $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ ou $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ da fração argilosa. Ainda segundo *As Laterites do Ultramar Português* [13], a classificação litológica baseada na cor, dimensão das partículas, grau de concreção e dureza das partículas, era a classificação mais importante em geotecnia. No entanto, com o evoluir dos estudos, chegou-se à conclusão de que estes caracteres macroscópicos não eram suficientes para classificar os materiais lateríticos. Assim, introduziram-se novos parâmetros como a expansibilidade e a petrificação para uma melhor caracterização destes materiais.

Na tabela 2.5 apresenta-se o critério granulométrico para classificação proposto em *As Laterites do Ultramar Português* [13]. Normalmente, as laterites apresentam uma curva granulométrica muito bem graduada, contendo desde argila a cascalho, ou até partículas maiores [3].

Tabela 2.5- Critério de classificação granulométrica [13]

Argilas lateríticas	< 0,002 mm
Siltes lateríticos	> 0,002 mm; < 0,06 mm
Areias lateríticas	> 0,06 mm; < 2 mm
Seixos lateríticos	> 2 mm; < 60 mm
Pedras e cascos lateríticos	> 60 mm

2.3.4 CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA

Uma das condições mineralógicas dos solos lateríticos é a cimentação, que diminui o volume de vazios, preenchendo as fraturas provocadas pelo intemperismo, conferindo estabilidade aos microagregados [23]. A cimentação pode resultar da cimentação dos grãos devido ao que sobra da rocha-mãe e contribui para a coesão [10], influenciando a compactação, a sucção e aumenta o ângulo de atrito.

Os solos lateríticos tendem a ser ácidos devido à concentração dos sesquióxidos de ferro e alumínio, como se confirmou na descrição das laterites africanas, brasileiras e indianas da secção 2.3.2 *Distribuição Geográfica*. O seu pH varia entre 5 a 7,7 segundo *As Laterites do Ultramar Português* [13]. Já segundo Martinez [23], Queiroz e Carvalho afirmaram que o pH varia de 4,6 a 6,6. Em *Lateritas* [24] pode encontrar-se mais informação acerca da influência do pH.

Em 1959, um dos critérios mais conhecidos para classificação físico-química era o de Martin e Doyne, que se baseava na relação molecular $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ da fração argilosa, mas outros autores preferiram a relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$, a qual é considerada a mais apropriada em *As Laterites do Ultramar Português* [13]. Esta última referência, e também Latérite et Graveleux Latéritique [5], classificam o tipo de solo como:

Tabela 2.6-Classificação físico-química baseada na relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ [13]

Tipo	Relação
Solo de laterite	<1,33
Solo laterítico	>1,33; <2,00
Solo não laterítico	>2,00

Em *As Laterites do Ultramar Português* [13] é salientado que esta relação é apenas complementar, não podendo ser admitida como conclusiva.

Outros autores recomendam ainda uma caracterização baseada nos processos pedogénicos [5].

2.3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Como já foi referido, o clima é muito importante, tendo um papel decisivo na saturação do solo. Por evaporação pela superfície ou por evapotranspiração de uma camada de vegetação, a água é removida do solo. Por outro lado, a chuva provoca a saturação do solo. Ao ser influenciada a distribuição da pressão neutra, resulta uma diminuição ou aumento de volume do solo. A alteração da pressão neutra negativa devido a chuvas intensas é a causa de muitos deslizamentos e aumentos da pressão neutra estão também associados a reduções da capacidade de carga e do módulo de elasticidade. Percebemos então que as pressões neutras negativas desempenham um papel fundamental no comportamento mecânico dos solos não saturados.

Os solos residuais estão normalmente situados acima do lençol freático, daí que não seja comum estarem saturados e, portanto, têm pressões neutras negativas. Certos solos, ao serem molhados, têm tendência a aumentar muito o volume ou a expandir, devido ao aumento da pressão neutra, que tende para valores positivos, ou tendem ainda a uma perda significativa da resistência ao corte. O volume do solo, as propriedades hidráulicas e a resistência ao corte variam face às variações climáticas como, por exemplo, a evaporação, infiltração e transpiração, que influenciam o volume de água e as pressões neutras negativas.

Seguem-se alguns aspetos do comportamento mecânico, relativos a características não só intrínsecas do material, como a resistência e dureza, mas também a características extrínsecas, como a compactação.

a) Resistência ao Corte e Dureza

Os ensaios mais utilizados para avaliar a resistência ao corte são os ensaios triaxiais, CPT e SPT, ensaios de corte direto e ensaios de carga. Segundo Martinez [23], Leroueil e Vaughan afirmam que a resistência ao corte dos solos depende do arranjo das partículas e da cimentação natural do mesmo [23]. Sugere-se a leitura do capítulo 6 de *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering* [1], acerca do modelo de resistência ao corte em solos residuais tropicais.

Quanto à dureza, as partículas concrecionadas são classificadas como concreções brandas e concreções duras [13]. As primeiras desfazem-se por pressão entre os dedos, e nas segundas isso já não se verifica. O endurecimento das laterites, quando expostas ao ar, pode ser devida a uma alteração na hidratação dos óxidos presentes, explica Bell (1993) em *Engineering Geology*[3].

b) Compressibilidade

A compressibilidade é a capacidade de um solo se deformar, com diminuição de volume, se submetido a uma força de compressão.

A compressibilidade, assim como a resistência ao corte, depende do arranjo das partículas e da cimentação natural do solo e a cimentação típica dos solos lateríticos tende a restringir a compressibilidade [23]. Ainda segundo esta fonte, para avaliar a compressibilidade realizam-se ensaios edométricos com controlo de sucção.

c) Sucção

Quando o solo se encontra não saturado, as pressões da água do mesmo são iguais ou inferiores à pressão atmosférica, sendo essa pressão designada de sucção, que se divide na sucção matricial e na sucção osmótica.

A sucção depende da granulometria, estrutura, mineralogia do solo, assim como das trajetórias de molhagem e secagem [23]. É ainda relacionável com a humidade relativa do ar nos poros do solo, utilizando a equação de Kelvin [25]:

$$\frac{R\theta}{m_w} \log_c (RH) = h \quad (1)$$

com

R – constante universal dos gases perfeitos (R=8,31J/mol)

Θ – temperatura absoluta (K)

m_w – massa molecular da água (H₂O=18 u)

RH – humidade relativa

h – altura da coluna suspensa de água

Segundo Huat *et al* [1], é importante ter em conta a influência da sucção matricial na resistência ao corte e na permeabilidade do solo, para além de que esta sucção representa uma componente adicional da tensão efetiva.

d) Expansibilidade, Plasticidade e Atividade

Expansibilidade é a propriedade de aumento de volume de um solo, devido ao aumento da humidade. Apesar de as laterites e os solos lateríticos terem, normalmente, baixa expansibilidade, visto que a humidade tem grande influência na variação de volume dos solos, é importante realizar ensaios que determinem o potencial de expansão.

É importante determinar a fração argilosa, pois sendo a parte ativa do solo, é a principal causa da expansão mas, por outro lado, também depende da capacidade de permuta catiónica [13]. A atividade dos solos lateríticos é normalmente muito baixa.

A plasticidade das laterites varia de baixa a média [13].

e) Limites de Consistência

Ensaio realizados em 1959, descritos em *As Laterites do Ultramar Português* [13], permitiram concluir que quanto maior for a temperatura de secagem, menores serão os limites de liquidez e os índices de plasticidade; e que quando a secagem era feita à temperatura ambiente, os resultados não eram inferiores aos da secagem feita em estufa. Foi ainda concluído que a remodelagem tem grande influência nos limites de consistência.

f) Compactação

Blight e Leong [25] afirmam que, apesar dos solos residuais serem especiais, e não deixando de ter isso em conta, quase todas as tecnologias de compactação aplicadas a solos transportados se podem aplicar a solos residuais. Atribui ainda importância à rocha-mãe, pois para as especificações de compactação serem cumpridas, é necessário conhecer a dimensão das partículas, a coesão, e outros aspetos importantes do solo que estarão ligados à rocha da qual derivou.

Os solos lateríticos com bom comportamento são os que não estão demasiado compactados, já que isso conduz a uma desagregação da estrutura natural do terreno, como é explicado em *As Laterites do Ultramar Português* [13]. A compactação excessiva pode ser devida à sua realização com um teor de água superior ao ótimo ou, devido à ação mecânica, à destruição das partículas grossas, mas estes efeitos não estão relacionados com o facto de o solo ser laterítico [13].

Diversas referências afirmam que a compactação deve ser realizada com o teor em água acima do ótimo, neste tipo de solos.

2.3.6 UTILIZAÇÃO DE LATERITES EM ENGENHARIA CIVIL

A grande questão nos solos residuais é não terem o comportamento típico descrito na mecânica clássica dos solos saturados, sendo que o facto dos solos residuais apresentarem três fases é o que torna mais difícil o seu uso em engenharia. O comportamento pouco comum deste tipo de solos em estudo deve-se principalmente às suas pressões neutras negativas.

Para o uso das laterites em engenharia civil, é importante conhecer bem outros aspetos, como o perfil do solo, o seu grau de alteração e a sua cimentação. Definir o perfil do solo é muito importante, pois assim é possível determinar o grau de alteração em profundidade, o que é um fator decisivo na escolha dos métodos de trabalho e de melhoramento do solo.

As laterites são aplicadas em diversas áreas, como em fundações para barragens de terra ou fundações para pavimentos, e como camada de sub-base ou de base do pavimento. A área de maior aplicação das laterites é a pavimentação, que será aprofundada no capítulo 3. *Aplicação de Solos Lateríticos em Pavimentos Rodoviários*. Encontram-se ainda aplicações em aterros para barragens de terra, aterros para estradas e fundações para estruturas mais leves.

A maior vantagem das laterites é serem um recurso económico e abundante em zonas tropicais, pelo que é muito utilizado em obras de pavimentação e de terra, mas com a desvantagem de ser um solo cujo comportamento não está ainda completamente caracterizado. Outra desvantagem é a dispersão da pouca informação atualmente existente acerca do tema e a falta de ensaios de caracterização. O facto de o solo laterítico ser muito sensível à água, em conjunto com a falta de informação e caracterização, tornam a sua utilização mais difícil e menos segura. De seguida apresentam-se alguns casos de insucesso e suas possíveis causas.

Casos de Rotura/Acidentes

Um estudo feito e descrito em *The field description and identification of tropical residual soils* [8] concluiu que a rotura de um talude de solo laterítico compactado se deu devido à erosão dos depósitos de cascalho que se encontravam por baixo. Em *Slope failures in tropical residual soils* [26] encontram-se também seis casos de rotura de taludes.

Em “*Review of International Practice for the Sampling and Testing of Residual Soils*” [27] é referido que a rotura de aterros de solos residuais de autoestradas de Gana e da Austrália são idênticas, e ainda que Gidigas afirma que estes problemas podem ser evitados se o teor de água e a densidade forem compatíveis com os valores estáveis do ambiente em que se encontra o aterro, devendo sempre existir uma adequada drenagem, de modo a que o pavimento tenha um bom desempenho. Também estão registadas bastantes roturas de aterros de barragens, que geralmente são construídas sobre solos residuais.

Em “*Highway Geotechnical Properties of Some Lateritic Soils from the Sedimentary Terrain of the Lagos – Ibadan Highway*” [28] é referido o caso de roturas localizadas na estrada Lagos – Ibadan, que já provocou acidentes fatais, devido às sub-bases de material laterítico não cumprirem as especificações, tendo sido realizados estudos que apontam para o excesso de finos como causa da perigosa e excessiva ondulação que se observa nesta estrada. Outros estudos apontaram para outras causas, como a expansão devido ao contacto dos agregados com água ou ainda devido a fatores geotécnicos.

Na referência [25] é afirmado que são raros os casos de rotura, apesar da grande utilização em pavimentos, e quando esta ocorre, que se deve normalmente à falta de drenagem adequada.

Adequada drenagem, proteção de taludes, bermas, ancoragens e pregagens, ou ainda preenchimento de falhas, são algumas das medidas que se podem tomar para evitar acidentes graves pelo deslizamento de terras [1].

2.3.7 BASE DE DADOS DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS RELACIONADAS COM LATERITES

De modo a facilitar a pesquisa acerca de solos residuais tropicais e de laterites em específico, foi criada uma base de dados com os documentos acedidos acerca deste tema.

Esta base de dados agrega informações como o título, os autores, o ano, o tipo de publicação, o local do solo estudado e ainda o formato e o local onde se encontra o documento ou a *hiperligação* através do qual pode ser acedido na internet, conforme se pode ver no exemplo da figura 2.18. Os documentos estão organizados por ordem cronológica.

Nesta base de dados é possível encontrar 21 documentos referentes a pavimentação; 7 acerca do melhoramento e estabilização dos solos tropicais residuais e/ou lateríticos; 16 documentos de caracterização e classificação de solos residuais tropicais residuais e/ou lateríticos; e 22 documentos que abordam uma variedade de outros temas, para além destes, como a aplicação em fundações, a estabilidade de taludes e ensaios.

Os tipos de publicação são: livros técnicos, teses, artigos, compilação de artigos, boletins técnicos, memórias, publicações, relatórios, especificações e manuais de instruções.

Distinguem-se dois formatos de documentos consultados: documentos digitais e documentos impressos.

Foram consultados documentos publicados internacional e nacionalmente, de 1951 a 2013, acerca de solos residuais tropicais e de laterites.

Laterites/Solos Residuais Tropicais							
Ano de publicação	Autor	Título	Tipo de publicação	Área de estudo	Local de publicação	Local do solo/ensaio	Formato
2013	N. W. Soon, L. M. Lee, T. C. Khun, H. S. Ling	Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation	Artigo técnico	Melhoramento do solo	Coreia	Kuala Lumpur	Documento digital
							Disponível online: http://link.springer.com/article/10.1007%2F9512205-013-0149-8#page-1
2012	Alayaki F. M.	Water Absorption Properties of Laterite Soil in Road Pavement: A Case Study (Ife-Ilesha Highway, South Western Nigeria)	Artigo de investigação	Pavimentos	Índia	Nigéria	Documento digital
							Disponível online: http://www.ijetae.com/files/Volume2Issue1/IJETA_E_1112_05.pdf

Figura 2.18 – Exemplo de dois registos na base de dados.

Para os livros que consistiam numa compilação de artigos, foi criada uma funcionalidade para abrir um nova janela com os artigos de maior interesse encontrados nesse livro (figura 2.20), ao clicar na célula “Clique para ver artigos” (figura 2.19).

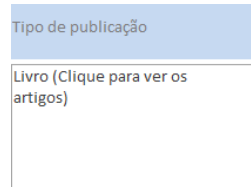


Figura 2.19 – Exemplo da ligação para a tabela que contém os títulos dos artigos.

Tropical Residual Soils Engineering Query	
Autor	Artigo
Singh, Huat	Origin, formation and occurrence of tropical residual soils
Huat, Alias, Jamaludin	Sampling and testing of tropical residual soils
Maaíl, Huat, Jamaludin	Index, engineering properties and classification of tropical residual soils
Ali, Rahardjo	Unsaturated soil
Shaw-Shong	Slope failure in tropical residual soil
Hussein, Omar, Jamaludin	Slope assessment and management
See-Sew, Yean-Chin	Guidelines for development on hill-sites
hui, Nithiaraj	Characterization of tropical soils in the design of materials as natural foundation and fill
Siswosoebrotho, Hossain, Alias, Huat	Stabilization of tropical residual soils
Yean-Chin, Chee-Meng	Slope stability and stabilization
Abidin, Hui	Soil erosion and sedimentation assessment, control and management plan for the tropical region
Taha, Ahmad, Aziz, Chik	Geoenvironmental aspects of tropical residual soils
Mahmud, Mohamed Shariff, Mansor	Development and application of a spatial database for residual soils
B.K. Tan	Country case study: engineering geology of tropical residual soils in Malaysia

Figura 2.20 – Tabela exemplo com os artigos e respetivos autores.

2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo, pretendeu-se caracterizar os solos residuais tropicais, principalmente os solos lateríticos.

Da síntese bibliográfica apresentada neste capítulo, salientam-se os seguintes pontos:

- O clima é o fator mais importante na formação do solo residual, porque a temperatura e a precipitação regulam a formação de um solo, e nos trópicos há uma intensa meteorização devida à abundância de chuva e às altas temperaturas;
- A intensidade e tipo de intemperismo levam à formação de diferentes tipos de solos residuais, sendo que as laterites e os solos residuais tropicais em geral estão sujeitos a um intemperismo mais intenso;
- O intemperismo químico é o tipo dominante nas zonas tropical húmida, tropical húmida-seca e húmida de média latitude;
- A resistência ao intemperismo depende da rocha-mãe da qual derivou o solo, pois quanto mais suscetíveis de alteração forem os minerais constituintes, maior será a taxa de meteorização;
- Os solos residuais tropicais são constituídos por minerais argilosos, minerais silicatados, óxidos metálicos hidratados, quartzo e sílica;

- Para as condições de compactação serem cumpridas, é importante conhecer a rocha-mãe da qual o solo derivou, e os aspetos ligados a esta, como a dimensão das partículas e a coesão;
- Os solos residuais têm características únicas: espessura significativa e camadas horizontais bem distintas no perfil; e composição, que se altera com o tempo devido à lixiviação e alteração química da rocha;
- O perfil dos solos residuais tropicais varia de acordo com a rocha da qual derivaram;
- Os solos residuais apresentam três fases, dependendo do clima. São estas: 1 – solo fersialítico; 2 – solo ferruginoso e 3 – solo ferralítico. O facto de terem três fases dificulta a sua aplicação em engenharia civil;
- Para ensaios de solos residuais é importante obter amostras imperturbadas, no estado natural do solo, de modo a obter resultados representativos;
- A Metodologia MCT é útil para identificar solos com comportamento laterítico;
- Alguns solos residuais tropicais podem conter água cristalizada na sua estrutura mineral, que não deve ser contabilizada como teor em água;
- Os solos residuais tropicais apresentam-se, na maioria das vezes, na condição parcialmente saturada;
- A sucção confere uma resistência adicional aos solos não saturados, influenciando na permeabilidade, estabilidade, entrada de água, resistência ao corte, rigidez, variação de volume e compressibilidade;
- As pressões neutras negativas desempenham um papel fundamental no comportamento mecânico dos solos não saturados. As laterites apresentam-se, geralmente, na condição parcialmente saturada;
- As propriedades dos solos lateríticos dependem do teor em água e do grau de saturação do solo;
- As laterites são ricas em óxidos de ferro e alumínio, que lhes conferem uma cor tipicamente avermelhada, e devem ser distinguidas dos solos lateríticos, por estes apresentarem uma menor quantidade de óxidos;
- O endurecimento das laterites, quando expostas ao ar, pode ser devido a uma alteração na hidratação dos óxidos presentes;
- As laterites podem diferir de um local para o outro, e até mesmo no mesmo local, de x em x anos, devido à evolução paleoclimática;
- As laterites apresentam normalmente pH abaixo de 7, sendo consideradas ácidas; contêm pouca matéria orgânica; apresentam uma curva granulométrica bem graduada, contendo desde argila a cascalho ou partículas maiores; apresentam sempre uma cimentação que contribui para a coesão, logo para a resistência ao corte, e que influencia também a compactação, a sucção, ângulo de atrito e volume de vazios;
- Na classificação mineralógica das laterites, a relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ é a favorita;
- É importante que haja uma adequada drenagem quando se utilizam laterites, garantindo que o teor em água e a densidade são compatíveis com os valores estáveis em que se encontra a obra. A maior parte dos casos de rotura de laterites deve-se à falta de drenagem adequada;
- A base de dados criada é uma ferramenta útil, visto a informação acerca de laterites estar muito dispersa, já que as ocorrências registam em locais bastante diferentes como África, Índia, Brasil e Austrália, agregando assim os documentos existentes acerca da formação, ensaios, locais de ocorrência, aplicações, tratamento, etc.

3

APLICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, aborda-se a utilização das laterites em pavimentos, iniciando-se com uma breve definição de pavimento, os tipos de pavimentos existentes e materiais mais comuns para constituição dos mesmos. Indicam-se algumas das normas mais utilizadas para aplicação de laterites em pavimentos, referem-se os tipos de estabilização de laterites para pavimentos e enumeram-se alguns casos de aplicação de solos lateríticos, de acordo com a experiência internacional e nacional.

Existem pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos, cujas diferenças são apontadas na primeira secção deste capítulo.

Quanto às especificações, o *Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux* é dos mais adequados para dimensionamento de pavimentos em países tropicais, referindo especificamente a utilização dos seixos lateríticos em camadas de sub-base e de base. A norma DNIT 098/2007 é também muito importante por especificar o uso de solo laterítico em base de pavimento.

Por vezes pode ser necessário ou imposto melhorar as características mecânicas do solo. A estabilização dos solos lateríticos pode ser feita com cal, cimento, precipitação de calcite por atividade microbiana (MICP) ou recorrendo a solo-cimento laterítico.

Após indicação destas técnicas de melhoria dos solos, são descritos alguns casos de aplicação de solos lateríticos em pavimentos (experiência internacional): um caso da utilização da Metodologia MCT para caracterização do solo; um caso de aplicação de solo laterítico em pavimento e sua estabilização com cal; um caso de utilização de materiais lateríticos em bases de pavimentos; um caso da utilização de solo-cimento laterítico em pavimentos; e um caso de utilização de seixos lateríticos em pavimentos. Relativamente à experiência nacional, foram obtidas informações acerca de laterites africanas analisadas por engenheiros portugueses: casos da aplicação de laterites em pavimentos ou aterros de estradas em Angola, Moçambique, Senegal, Guiné Equatorial, Costa do Marfim, Burkina Faso e Gana.

No final do capítulo, apresentam-se as conclusões relativas ao mesmo.

3.2 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: TIPOLOGIA, CONSTITUIÇÃO E MATERIAIS CORRENTES

Um pavimento é, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT [10],

“ (...) a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espço considerado teoricamente como infinito - a infraestrutura ou terreno de fundação – a qual é designada de subleito.”.

Os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semirrígidos ou rígidos, sendo que no primeiro as camadas sofrem deformação significativa ao serem carregados; os semirrígidos são caracterizados por uma base cimentada por um aglutinante com propriedades cimentícias; e nos rígidos o revestimento recebe praticamente todas as tensões do carregamento, pois tem uma elevada resistência, relativamente às camadas inferiores [10].

Os pavimentos flexíveis ou semirrígidos são constituídos por uma camada de desgaste, uma camada de regularização, uma camada de base e uma camada de sub-base. Estes pavimentos podem ser revestidos ou não-revestidos, sendo que estes últimos são conhecidos como estradas de terra. Refere-se que os pavimentos não revestidos não proporcionam a impermeabilização das camadas não ligadas da estrutura o que no caso da utilização de laterites é situação indesejável.

As estradas não revestidas apresentam defeitos como a secção transversal inadequada, por impedir o escoamento correto das águas; drenagem lateral inadequada devido às valetas ficarem cobertas de vegetação ou entulho; corrugação (ou ondulação); buracos; formação de nuvens de poeira; ou ainda segregação dos agregados, devido ao tráfego [29].

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma laje de betão de cimento que tem funções estruturais semelhantes às três primeiras camadas dos pavimentos flexíveis, e por uma camada de sub-base de betão pobre, solo-cimento ou ABGE (agregado britado de granulometria extensa) com cimento.

Para melhor percepção da constituição de um pavimento flexível (figura 3.1) vs. pavimento semirrígido (figura 3.2) vs. pavimento rígido (figura 3.3), de seguida, apresenta-se um esquema do corte transversal de cada um.

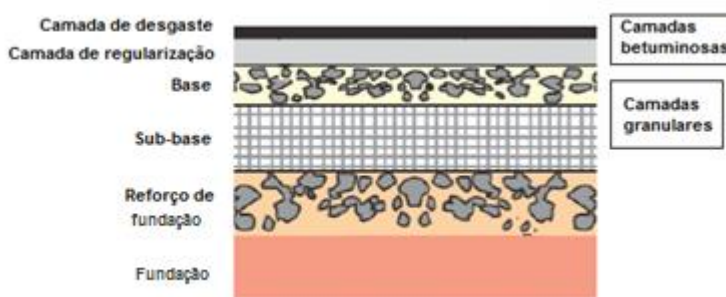


Figura 3.1 – Pavimento flexível (adaptado de [30] e [31])

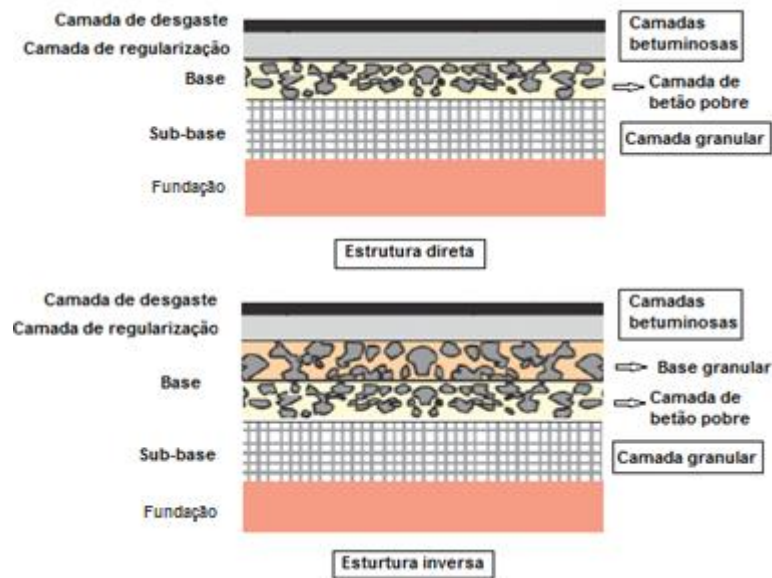


Figura 3.2 – Pavimento semirrígido – estrutura direta e estrutura inversa (adaptado de [30] e [31])

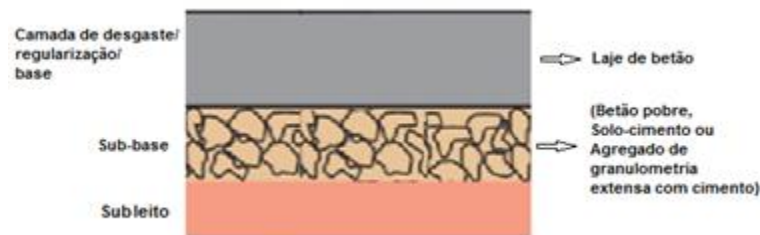


Figura 3.3 – Pavimento rígido (adaptado de [30] e [31])

Nos pavimentos flexíveis, os materiais usualmente utilizados para camadas de sub-base são solos selecionados, agregado britado de granulometria extensa (ABGE) ou ainda agregado reciclado. Para camadas de base, para além de poder utilizar-se os últimos dois tipos referidos para as camadas de sub-base, ou seja, ABGE, também se pode considerar agregado reciclado. Refere-se que as laterites são mais utilizadas na camada de base ou de sub-base do pavimento, sendo os seixos lateríticos muito aplicados.

3.3 ESPECIFICAÇÕES DE LATERITES PARA PAVIMENTOS

De seguida, indicam-se as especificações e recomendações mais importantes para o presente trabalho:

3.3.1 GUIDE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES POUR LES PAYS TROPICAUX

(Manual de Dimensionamento de Pavimentos para Países Tropicais) [32]

Este guia, para além dos princípios de base do dimensionamento, refere especificamente a utilização de seixos lateríticos naturais em camadas de sub-base e de base, indicando que o espalhamento deve ser realizado com bulldozer ou motoniveladora, com camadas de espessura mínima de 10 cm e máxima de 25 cm; o teor em água de compactação deve ser $W_{OPT} \pm 2$ e a taxa de compactação deverá ser no mínimo $95\% \gamma_{d\ OPT}$; e que a compactação deve ser realizada com rolos pneumáticos pesados (carga por roda superior a 3 toneladas). Ainda para a camada de sub-base, refere-se os seixos lateríticos tratados com cimentos ou com cal, que devem ser compactados com um teor em água entre W_{OPT} e $W_{OPT} - 2$ com taxa de compactação mínima de $95\% \gamma_{d\ OPT}$, com rolo vibratório ou pneumático. Este conjunto de especificações para colocação em obra encontra-se resumido na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações para colocação em obra de seixos lateríticos para a camada de sub-base [32]

Especificação		Valor imposto
Seixos lateríticos normais	Espessura das camadas	10 cm < espessura < 25 cm
	Teor em água	$W_{OPT} \pm 2$
	Taxa de compactação	$95\% \gamma_{d\ OPT}$
	Equipamento de compactação	Rolos pneumáticos pesados
Seixos lateríticos tratados com cimento ou cal	Teor em água	Entre W_{OPT} e $W_{OPT} - 2$
	Taxa de compactação	$95\% \gamma_{d\ OPT}$
	Equipamento de compactação	Rolo vibratório ou pneumático (carga/roda > 3 toneladas)

De acordo com as classes de tráfego utilizadas neste guia [32], explícitas na tabela 3.2, deverá ser cumprido um índice de plasticidade máximo de 20 para as classes de tráfego T3, T4 e T5 e de 30 para as classes T1 e T2.

Tabela 3.2 – Classes de tráfego de acordo com o guia [32]

Classe	Tráfego Diário Médio
T1	<300
T2	300 a 1000
T3	1000 a 3000
T4	3000 a 6000
T5	6000 a 12000

Dependendo da importância do tráfego, a densidade seca mínima requerida é de 1,8 a 2 ton/m³. Os seixos lateríticos que são adequados para classes de tráfego mais importantes ($\geq T3$) têm as seguintes características:

Tabela 3.3 – Características dos seixos lateríticos adequados para classes de tráfego $\geq T3$ [32]

Características	Valores
Dimensão máxima	10-50 mm
Percentagem do material passado de 80 μ m	<35 %
Índice de Plasticidade	<30
Módulo de Plasticidade (do material passado no #0,425) $\times$ IP	< 2500
Teor em matéria orgânica	<1,5%

Se for necessário tratar o solo com cimento ou cal, o tratamento só é considerado adequado se o CBR após tratamento for superior a 100, ou a 60 no caso do tratamento com cal. No caso do tratamento com cal, o Índice de Plasticidade deve ser superior a 10 e a percentagem do material passado no #0,425 deve ser superior a 15%.

Quanto às camadas de base, as características até dos melhores depósitos lateríticos normalmente não são adequadas para classes de tráfego T4 e T5. Para 95% $\gamma_{d\text{ OPT}}$ o CBR deve ser superior a 80, se não, o material deve ser melhorado. Os seixos lateríticos naturais são adequados se a percentagem de finos for inferior a 20%, e se após a compactação o aumento da percentagem de finos não for superior a 8%. O teor em água aquando da compactação deve ser de $W_{\text{OPT}} \pm 1$ para 95% $\gamma_{d\text{ OPT}}$, com rolos pneumáticos pesados (carga por roda superior a 2 toneladas). Estas especificações encontram-se resumidas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Especificações para colocação em obra de seixos lateríticos para a camada de base [32]

Especificação		Valor imposto
Seixos lateríticos normais	Espessura das camadas	< 25 cm
	Teor em água de compactação	$W_{OPT} \pm 1$
	Taxa de compactação	$95\% \gamma_{d OPT}$
	Equipamento de compactação	Rolos pneumáticos pesados (carga/ roda > 2 toneladas)
Seixos lateríticos tratados com cimento ou cal	Teor em água de compactação	Entre W_{OPT} e $W_{OPT} - 2$
	Taxa de compactação	$95\% \gamma_{d OPT}$
	Equipamento de compactação	Vibrador pesado e rolo de pneus (carga/ roda > 4 toneladas)

A compactação deve ser realizada nas três horas seguintes ao tratamento (duas horas se o tratamento for com cimento) Os materiais que podem ser tratados apresentam as características resumidas na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características dos materiais possíveis de tratar com cimento ou cal [32]

Características	Valores
Dimensão máxima	10-50 mm
Percentagem do material passado de 80 μ m	<35
Índice de Plasticidade	<25
Módulo de Plasticidade	< 2000
Teor em matéria orgânica	<1%

A camada de base pode sofrer um grande desgaste com o tráfego, principalmente se não estiver endurecida, porque a resistência ao corte ficará totalmente ao encargo do atrito entre partículas. A deformabilidade da camada de base deve ser avaliada por ensaios de carga em placa ou medindo as deformações. A resistência à fragmentação e ao desgaste devem ser avaliadas pelo ensaio de Los Angeles (LA), ensaio Micro-Deval (MDV), ou ainda, pelo ensaio do esmagamento do agregado (ACV – *Aggregate Crushing Value*), cujos valores admissíveis estão expressos nas tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 - Valores admissíveis para classes T1-T3 e tráfego de eixo simples de 8 a 10 toneladas
(traduzido de [32])

Ensaio	Agregado	Agregado com ligantes
LA	≤45	<50
MDV	≤15	<20
ACV	<32	<35

Tabela 3.7 – Valores admissíveis para classes T4-T5 e tráfego de eixo de 13 toneladas
(traduzido de [32])

Ensaio	Agregado	Agregado com ligantes
LA	≤30	<40
MDV	≤12	<18
ACV	<25	<30

Em *Latérite et Graveleux Latéritique* [5], relativamente à utilização dos seixos lateríticos em pavimentos, no manual de dimensionamento de pavimentos em países tropicais, apresentam-se resumidas na tabela 3.8 as características recomendadas.

Tabela 3.8 – Recomendações para utilização de seixos lateríticos naturais (adaptado de [5])

Importância do Critério	Características	Camada	Classe de Tráfego				
			T1	T2	T3	T4	T5
Critério de Aceitabilidade	Índice CBR	F	>25	>30	>30	>30-35	>30-35
		B	>60	>80	>80	-	-
Critérios seletivos ou Índices de qualidade	Dureza Los Angeles	F	<60	<60	<55	<50	<50
		B	<45	<45	<40	-	-
	Teor em finos < 0,08 mm	F	<25	<25	<20	<20	<20
		B	<15	<15	<15	-	-
	Índice de Plasticidade	F	<25	<25	<20	<20	<20
		B	<20	<15	<15	-	-
	Expansão linear	F	1	a	2%		Máx
		B	0,5	a	1%		Máx
	Peso volúmico seco máximo	F			>18,63 kN/m ³		
		B			>28,44 kN/m ³		

3.3.2 MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – DNIT

Este manual brasileiro [10] faz referência aos materiais lateríticos e à metodologia MCT, já anteriormente explicada. Nas “especificações gerais” são fixados valores para expansão, granulometria e durabilidade da fração grossa, e ainda para os índices de consistência.

Segundo o manual, o CBR é:

$$CBR = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \quad (2)$$

Quanto à classificação MCT, utiliza-se o ábaco da figura 3.4 para classificar os solos como de comportamento laterítico ou não laterítico. No anexo II encontra-se a tabela de classificação MCT.

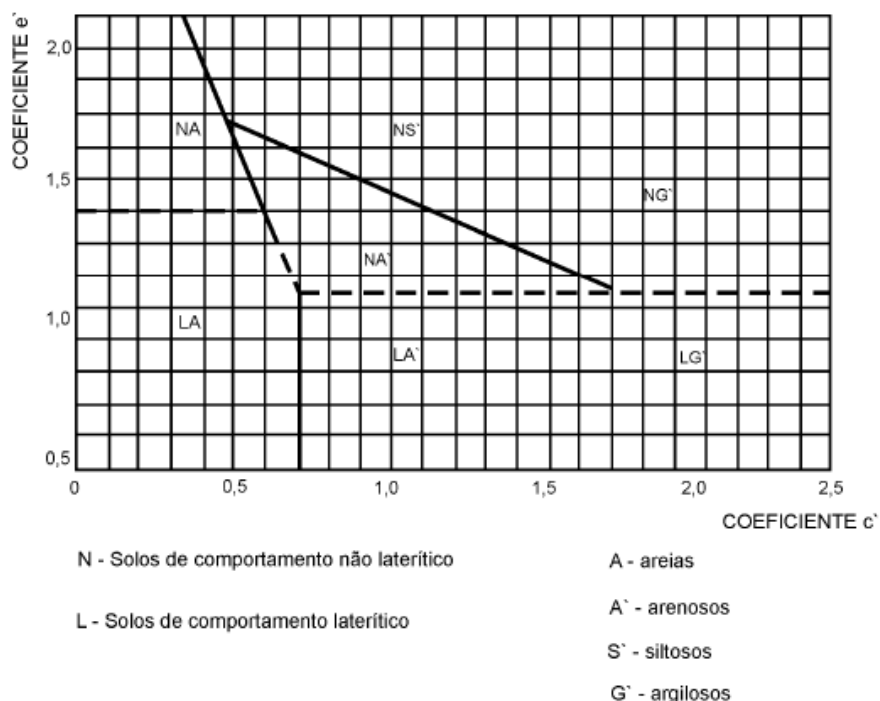


Figura 3.4 – Ábaco para Classificação MCT [10]

Este manual não é específico para laterites, apesar de referi-las, mas o DNIT possui uma especificação de serviço para base de solo laterítico, a qual se refere no ponto seguinte (3.3.3).

3.3.3 NORMA DNIT 098/2007 – ES (PAVIMENTAÇÃO – BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE COM UTILIZAÇÃO DE SOLO LATERÍTICO – ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO)

Esta norma [33] sistematiza a execução da camada de base com material laterítico, e estabelece requisitos para o material, equipamento, execução da base, manejo ambiental, e ainda inspeção e critérios de medição.

Os solos lateríticos adequados para camada de base devem possuir uma graduação graúda, uma relação molecular sílica-sesquióxido (equação 3) inferior a 2, a expansibilidade inferior a 0,2%, e estes materiais não devem ser aplicados em dias chuvosos.

$$\frac{S}{R} = \frac{SiO_2/60}{Al_2O_3/102 + Fe_2O_3/160} \quad (3) \quad [33]$$

É considerado nesta norma que os solos lateríticos podem ser beneficiados por britagem, mistura com solos arenosos, desagregação na pista ou peneiramento com ou sem lavagem. Independentemente de serem solos melhorados ou não, estes devem apresentar as características resumidas na tabela 3.8 quando submetidos aos ensaios DNER-ME 054/97, DNER-ME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94.

Tabela 3.9 – Características dos solos lateríticos adequados para base de pavimento [33].

Ensaio	Características impostas
CBR para $N \leq 5 \times 10^6$	$\geq 60\%$
CBR para $N > 5 \times 10^6$	$\geq 80\%$
Compactação*	26 ou 56 golpes/camada
LL dos passados no #40	$\leq 40 \%$
IP dos passados no #40	$\leq 15 \%$
LA do agregado retido no #2	$\leq 65\%$
Equivalente em Areia	$> 30\%$
% Passados #200	$< 2/3 \%$ Passados no #40

*Compactação em laboratório segundo a norma DNER-ME 49/74

N – número de operações do eixo padrão de 8,2 toneladas para o período do projeto

Se os solos lateríticos apresentarem um $IP > 15\%$, podem ser utilizados em misturas como outros materiais de $IP \leq 6\%$, desde que se cumpram todos os requisitos da especificação.

Na execução da camada de base, o teor em água de compactação deve ser o que garante o CBR mínimo especificado pelo projeto, com uma camada de espessura mínima de 10 cm após compactação.

Quanto ao controle do material, devem ser realizados ensaios de caracterização do material espalhado na pista usando os métodos DNER-ME 054/97, DNER –ME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94 em locais aleatórios; ensaios de compactação de acordo com DNER-ME 129/94 (Método C); ensaios CBR e de expansão pelo método o DNER-ME 049/94.

De modo a controlar a execução, devem ser realizados ensaios de humidade higroscópica do material utilizando os métodos DNER-ME 052/94 ou DNER-ME 088/94; ensaios de massa específica aparente seca *in situ*, por DNER-ME 036/94 e DNER-ME 092/94.

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, CBR e granulométrico, devem ser realizados de modo a verificar a aceitação do serviço. Deve ainda ser controlado o grau de compactação.

3.3.4 ESPECIFICAÇÃO 504 – CAMADAS DE DESGASTE DE ASFALTO

Nesta especificação [34] das Estradas Principais da Austrália Ocidental é descrita a utilização de vários tipos de asfalto em camadas de desgaste de pavimentos, incluindo misturas com laterites, assim como algumas recomendações.

As misturas asfálticas lateríticas devem possuir um tamanho nominal de 7mm, ou de 10mm, se forem usadas em faixas para autocarros ou bermas, não sendo recomendado a utilização do asfalto laterítico em faixas de tráfego geral. O conteúdo da laterite de 10mm deve estar entre 3% e 6%.

Não se recomenda o uso de areia nas misturas lateríticas e estas misturas devem conter pigmento de óxido de ferro vermelho.

3.3.5 NORMAS DE UTILIZAÇÃO DE LATERITES AFRICANAS EM PAVIMENTOS

O *Manuel sur les Routes dans les Zones Tropicales et Désertiques* (Manual de Estradas em Zonas Tropicais e Desérticas) contém os seguintes quadros 3.10 e 3.11, com algumas normas de utilização de laterites africanas em pavimentos.

Tabela 3.10 – Normas de utilização de laterites africanas em pavimentos [5]

	Senegal	Costa do Marfim
% Passados #2	60	30-65
% Passados #0,08	20-35	16-30
Índice de Plasticidade	10-25	15-28

Tabela 3.11 - Normas de utilização de laterites africanas em pavimentos revestidos [5]

	Costa do Marfim	Moçambique	África do Sul	Rodésia do Sul	Rodésia do Norte
Camadas de sub-base:					
Índice de Plasticidade	20	12		18	25
Índice CBR	30	45			
% de finos	20%	50%			

	Costa do Marfim	Moçambique	África do Sul	Rodésia do Sul	Rodésia do Norte
Camadas de base:					
Índice de Plasticidade	12		8	6	10
Índice CBR	60 (para 95% OPM)	67	75		
% de finos	15%	25%			20%
Limite de Liquidez			30		
Contração linear			4%		
Expansão máxima para o w_{OPT} do Proctor Modificado			0,5%		

3.3.6 OUTRAS ESPECIFICAÇÕES

As normas aqui indicadas são importantes na utilização de solos residuais, mas não são completamente adequadas aos solos lateríticos, visto não existirem secções específicas para este tipo de solo, como este o merece.

a) AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

Esta associação criou um conjunto de normas e especificações quanto à classificação dos solos; ao transporte de materiais; métodos de amostragem e ensaio; diversos tipos de pavimentos; etc., mas não possui uma especificação para o uso de laterites e solos lateríticos, pelo que há que ter algum espírito crítico quando se seguem estas especificações, nunca esquecendo que os solos lateríticos são especiais.

Em *As Laterites do Ultramar Português* [13], foi adotada a norma AASHTO, entre outras, para preparação de amostras e ensaios, tendo sido sugeridas algumas alterações à norma, de modo a adaptar-se aos solos lateríticos.

b) ASTM - *American Society for Testing and Materials*

Esta sociedade também desenvolveu normas técnicas para diversos materiais, incluindo amostragem e ensaios.

Em *As Laterites do Ultramar Português* [13] foi também seguida esta norma, para os ensaios geotécnicos, tendo sido também indicadas algumas reservas quanto a esta norma.

c) B.S. – *British Standards*

Entre estas normas *standard*, distingue-se a BS 1377 (*Methods of Test for Soils for Civil Engineering*), por normalizar os ensaios de solos.

d) Compactação, Drenagem e Outros Aspectos

Em *Latérite et Gravelux Latéritique* [5] encontram-se quadros que resumem especificações brasileiras, normas de utilização das laterites em pavimentos revestidos e não revestidos, entre outros. Refere ainda a especificação francesa.

No que diz respeito à compactação de aterros para vias de comunicação, esta é muito importante, já que a lixiviação dos solos lateríticos lhes confere uma estrutura solta. Sendo os solos residuais tropicais sensíveis à secagem, esta não deve ser feita antes de se testar a compactação em laboratório [1], pois o comportamento do solo depois da compactação no campo seria diferente do esperado.

Em *Mechanics of Residual Soils* [25] é recomendado testar a compactação *in situ*, de modo a verificar o comportamento após compactação, já que os parâmetros de compactação determinados em laboratório podem não ser exatamente aplicáveis ao equipamento de compactação ou às condições *in situ*. Recomenda ainda que se siga a mecânica dos solos não saturados, já que após a compactação, os solos ao diminuírem o seu teor em água, tornam-se não saturados, não deixando de ter em conta a influência do clima no local da construção.

É necessário proceder a uma drenagem adequada, pois a água tem tendência para amolecer os solos, enfraquecendo-os, ou seja, provocando uma diminuição da resistência dos mesmos, o que pode ter graves consequências. A falta de uma drenagem adequada traduz-se na redução da capacidade de suporte do subleito e eventual expansão; perda da capacidade de suporte das restantes camadas pelo bombeamento dos finos; e arrastamento das partículas devido à velocidade do fluxo da água [10].

Já que a laterite, apesar de compactada, tende a corrugar com o tráfego, é aconselhável revestir a superfície, para evitar a perda de finos [12].

3.4 ESTABILIZAÇÃO DE LATERITES PARA PAVIMENTOS

É sabido que a estabilização dos solos é usada para melhorar e estabilizar as características do mesmo, como aumentar a resistência de corte, durabilidade, permeabilidade, deformação, ou até mesmo para reduzir a expansão, entre outras. É também de senso comum que só se deve proceder à estabilização do solo caso seja mais económico tratá-lo do que encontrar um novo solo com as características pretendidas e transportá-lo.

Apesar de a estabilização ser feita noutras áreas, é muito utilizada na área da construção de estradas, pelo que este subcapítulo foi inserido precisamente no tema dos pavimentos.

Existem duas categorias de estabilização: a estabilização mecânica e a estabilização química, sendo a primeira conseguida pela estabilização granulométrica ou pela compactação.

De seguida, descrevem-se alguns dos tipos de estabilização mais utilizados nesta área, assim como técnicas mais recentes de melhoria de solos.

3.4.1 ESTABILIZAÇÃO COM CAL

Pertence à categoria da estabilização química, sendo dos processos mais antigos, e segundo *Amu te al* [12], Garber & Hoel admitem poder ser usado tanto em materiais para sub-bases como para bases de pavimento. Estes mesmos autores afirmam que a cal hidratada e a dolomite são as utilizadas para estabilização de solos, normalmente, já que a cal viva é mais perigosa de utilizar.

Para além de melhorar a resistência, o uso da cal melhora a trabalhabilidade do solo, reduz o potencial de expansão e também a plasticidade, melhorias estas que são imediatas e de longo prazo.

Para cada tipo de solo existente, existe uma percentagem ótima de cal que deve ser utilizada na sua estabilização, mas de acordo com *The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement* [12] sabe-se que, para a maioria dos solos finos e dependendo do seu peso seco, essa percentagem é de 3 a 10%.

Na secção 3.5 *Casos de aplicação de solos lateríticos em Pavimentos* encontra-se um caso de estudo de um solo laterítico estabilizado com cal.

3.4.2 ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO

Quando os solos podem ser tratados com cimento, deve-se respeitar uma granulometria e plasticidade específicas. Este tipo de estabilização pode tornar-se inviável economicamente, caso não se consiga respeitar a plasticidade exigida, pois isso implica utilizar grandes quantidades de cimento[13].

Os resultados dos ensaios descritos em *As Laterites do Ultramar Português* [13] mostraram que para baixas percentagens de cimento obtiveram-se boas resistências.

Segundo Autret [5], na Costa do Marfim foi publicada uma recomendação para a utilização em pavimentos de seixos lateríticos estabilizados com cimento e, nessa recomendação, afirmam a preferência pelo ensaio CBR, com o objetivo de determinar o teor em cimento necessário à estabilização.

3.4.3 PRECIPITAÇÃO DE CALCITE POR ATIVIDADE MICROBIANA (MICP)

Este tipo de melhoramento do solo surgiu recentemente como uma alternativa sustentável, já que a cal, o cimento e outros químicos utilizados para estabilização podem contaminar os solos e as águas subterrâneas, ao contrário deste processo biológico. Ensaio realizados em solos melhorados através desta técnica [35] mostraram que esta é eficaz, aumentando a resistência ao corte e diminuindo a condutividade hidráulica em solos residuais. O tratamento MICP é conseguido devido à biocimentação, resultando materiais que ligam as partículas, e também devido à redução da condutividade hidráulica que resulta do preenchimento dos vazios. Continuam a ser estudados diversos micro-organismos, para se identificar o mais eficiente.

3.4.4 SOLO-CIMENTO LATERÍTICO

Surge também como alternativa sustentável, e foi estudado em *An investigation of lateritic soil cement for sustainable pavements* [36], no âmbito da utilização como camada de base de pavimento, tendo sido concluído que é apropriado como camada de base, já que tem uma elevada resistência ao corte.

O solo-cimento é obtido misturando cimento com solo, e uma certa quantidade de água é adicionada, de modo a ocorrer o processo de hidratação, que leva à cimentação. Posteriormente, ocorre a troca de cátions e reações pozolânicas, que fazem com que a resistência do solo aumente com o tempo.

As suas propriedades físicas são influenciadas pelo tipo de solo, quantidade de cimento, quantidade de água, mistura, tempo de cura e compactação [36].

Em *Stabilization of tropical residual soils* [37] é encontrado um capítulo dedicado à estabilização e compactação dos solos residuais tropicais, pelo que se aconselha a consulta deste livro e em *Eletrokinetic treatment on a tropical residual soil* [38] é estudado o tratamento eletrocinético de solos residuais tropicais. Em *Laterite soils and their stabilization* [39] é também referida a estabilização dos solos lateríticos.

O caso 4 da secção 3.5 *Casos de aplicação de solos lateríticos em Pavimentos* é acerca da utilização de solo-cimento laterítico em pavimentos.

3.5 CASOS DE APLICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS

A utilização de solos lateríticos em pavimentos surge como uma alternativa económica, pelo que nas últimas décadas têm sido estudados e caracterizados para que se possa proceder à correta e segura utilização dos mesmos. O uso das laterites para este propósito funciona bem se as características especiais deste tipo de solo estiverem bem estudadas e reconhecidas. Para tal, é necessário proceder ao reconhecimento geotécnico, testando o solo seguindo normas adequadas.

Segundo Amu *et al* [12], Gidigasú afirma que o comportamento das laterites em pavimentos depende, para além do tráfego a que está sujeito e condições ambientais, das características granulométricas, da natureza e resistência da fração grossa, assim como do grau de compactação. A utilização de laterites mais duras é, em princípio, adequada para bases, enquanto que as laterites menos duras servirão para sub-bases, assim como os solos lateríticos de melhor qualidade.

O uso de seixos lateríticos bem graduados em pavimentos é limitado, pelo facto de a fração fina e a resistência das partículas grossas serem variáveis, assim como pela percentagem de vazios se a fração fina for reduzida [12]. Para uso de tal material em pavimentos, é necessária uma drenagem e compactação adequadas, de modo a que a água não enfraqueça o material, nem a compactação seja tal que enfraqueça as partículas. Este material pode ser usado como subleito, sub-base ou base, em pavimentos revestidos, ou pode ser usado como camada de revestimento em estradas de terra, dependendo da sua qualidade [5]. Nesta referência encontra-se descrito mais pormenorizadamente o uso dos seixos lateríticos nos pavimentos com e sem revestimento.

Seguem-se alguns casos de estudo e de aplicação de laterites, relatados em diversos documentos consultados, e também a experiência dos engenheiros portugueses, com a informação obtida em inquéritos realizados a engenheiros com experiência na área.

3.5.1 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

3.5.1.1 Caso 1 – Classificação MCT para caracterização de solos tropicais [11]

Os SAFL (Solos Arenosos Finos Lateríticos) são muito usados como bases de pavimentos de baixo custo, e as propriedades tecnológicas recomendadas (referentes à energia do Proctor Intermediário) são as apresentadas na tabela seguinte (3.11).

Tabela 3.12– Propriedades recomendadas para os SAFL [11]

Propriedade	Parâmetro	Valores Recomendados
Capacidade de suporte	Mini-CBR sem imersão	$\geq 40\%$
Perda de suporte com imersão	Índice RIS	$\geq 50\%$
Expansão com imersão	Expansão	$\leq 0,3\%$
Contração por secagem ao ar	Contração por secagem	0,1 a 0,5%
Infiltrabilidade	Coefficiente de sorção (s)	10^{-2} a 10^{-4} cm/min ^{1/2}

O Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande realizou um estudo com o objetivo de determinar as propriedades geotécnicas de um solo localizado no litoral sul do Rio Grande do Sul. A Metodologia MCT foi também utilizada com o intuito de avaliar as propriedades do solo no âmbito da pavimentação e outras obras de terra, e não só avaliar o comportamento laterítico do solo.

Para tal, foram utilizados métodos clássicos e, para caracterização de solos tropicais, realizada a classificação MCT, mini-Proctors, mini-MCV e Ensaio de Perda por Imersão. Para além destes, foram ainda realizados a técnica de Difractometria de Raios X e o ensaio do Azul-de-metileno.

A tabela 3.12 e figuras seguintes (3.5 e 3.6) mostram os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 3.13– Caracterização geotécnica pelos métodos clássicos [11]

Características / Propriedades	Dados
Pedregulho	0%
Areia grossa	0%
Areia média	33%
Areia fina	39%
Silte	2%
Argila	26%
Limite de Liquidez (wl)	32%
Limite de Plasticidade (wp)	16%
Índice de Plasticidade (IP)	16%
Peso específico dos grãos (γ_s)	26,3 kN/m ³
Classificação SUCS	SC

Classificação AASHTO	A2-6
Índices classificatórios pela Metodologia MCT (c'/d'/e')	1,5 / 61 / 1,13
Perda por imersão (Pi)	112%
Classificação MCT	LA' / LG'
Humidade ótima de compactação ($w_{ót} - PN$)	13,5%
Peso específico aparente seco máx. ($\gamma_{dmáx} - PN$)	18,4 kN/m ³
Humidade ótima de compactação ($w_{ót} - PI$)	12,5%
Peso específico aparente seco máx. ($\gamma_{dmáx} - PI$)	19,2 kN/m ³

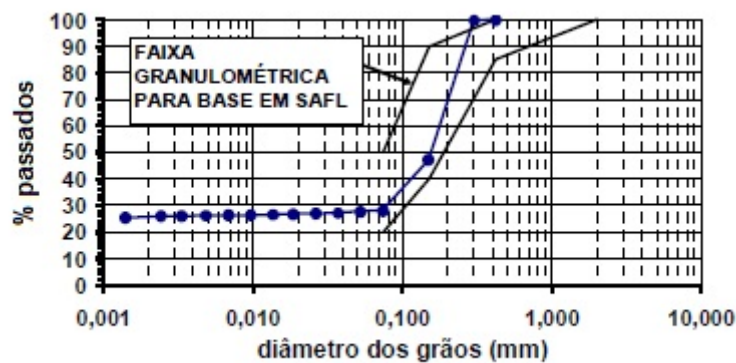


Figura 3.5– Curva granulométrica do solo estudado
(adaptado de [11])

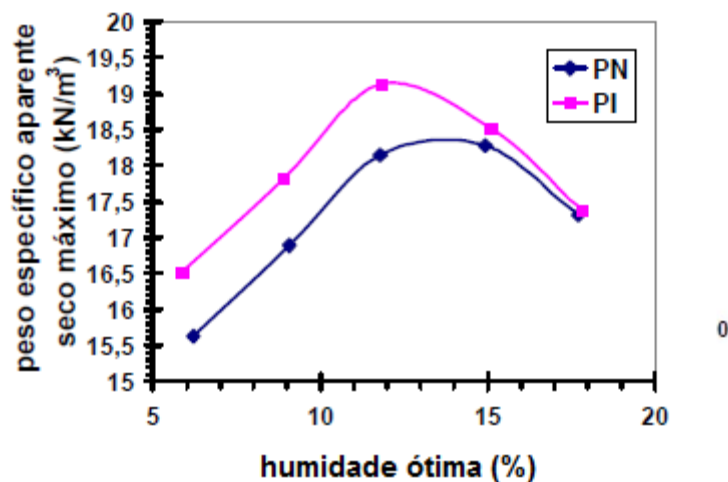


Figura 3.6– Curva de compactação do solo estudado
(adaptado de [11])

Os ensaios realizados mostraram que o solo apresenta um comportamento laterítico, elevada resistência ao corte, boa compactibilidade, e baixa contração por secagem. Os pontos negativos são a expansão média, a velocidade de ascensão capilar também média, e a perda de suporte com a imersão.

Quanto ao melhoramento do solo, concluiu-se que a adição de cal ou cimento (5%) aumentou em mais de 10 vezes a RCS (Resistência à Compressão Simples), e que a adição de bentonite (até 4%) reduz a permeabilidade do solo. E, por fim, a conclusão mais importante foi que este solo só seria adequado para obras em que a exigência quanto à permeabilidade fosse menor.

3.5.1.2 Caso 2 – Utilização de solo laterítico em pavimentos e sua estabilização com cal [12]

Neste caso, realizado na Universidade Obafemi Awolowo (Nigéria), foram estudadas três amostras de um solo laterítico, recolhidas de locais diferentes numa barragem, no sentido de avaliar a sua adequabilidade ao uso em pavimentos, assim como a sua estabilização com cal.

Após as amostras terem sido pré-tratadas, foram realizados alguns ensaios preliminares de caracterização de acordo com as especificações BS 1377 (*British Standards* para Projetos de Pavimentação e Drenagem) e, ainda, outros ensaios de resistência usando percentagens de cal de 0 a 10%.

O estudo concluiu ser um solo argiloso, sendo as amostras classificadas como razoáveis a más para utilização em pavimentos, de acordo com o sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), estando os resultados dos testes preliminares na tabela 3.13.

Tabela 3.14– Resultados dos testes preliminares
(traduzido de [12])

Amostra	Teor em Água (%)	Peso Específico	Limites de Atterberg		
			Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
A	22,2	2,95	53,0	20,5	32,5
B	22,6	2,36	59,7	32,1	27,6
C	12,3	2,85	40,5	16,6	23,9

Após adição da cal, os limites de Atterberg variaram, o que foi resumido no gráfico da figura 3.7.

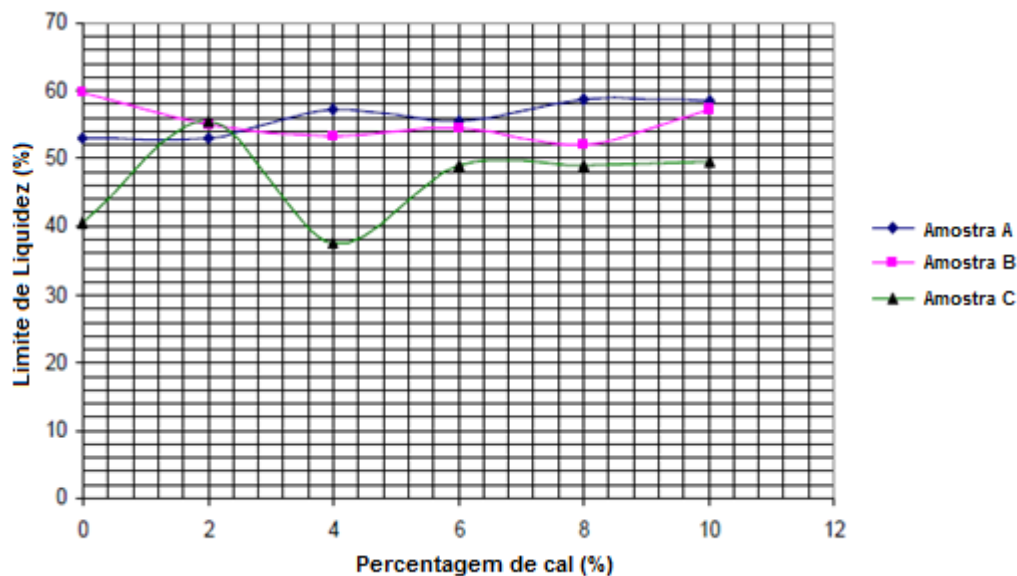


Figura 3.7. – Variação do Limite de Liquidez com a % de cal
(traduzido de [12])

Como é possível interpretar no gráfico, os Limites de Liquidez e de Plasticidade da amostra A aumentaram com o uso da cal, logo, diminuiu o Índice de Plasticidade, enquanto que na amostra B o Limite de Liquidez diminuiu e o Limite de Plasticidade aumentou, causando uma descida brusca no Índice de Plasticidade. Nestas duas amostras, a adição de cal fez com que diminuísse o potencial de expansão, já que esta adição diminui o volume de vazios.

Já a amostra C comportou-se de modo diferente, pois apesar dos seus Limites de Liquidez e de Plasticidade terem aumentado, também aumentou o seu Índice de Plasticidade. Uma explicação possível é isto ter acontecido pelo facto de este solo ser muito plástico, a necessidade de usar mais água provocou a expansão do solo, logo, o aumento do Limite de Liquidez.

Após análise dos resultados, pela classificação AASHTO e pela UCS (*Unified Classification System*), concluiu-se que a amostra A corresponde a uma argila orgânica; a B a uma argila inorgânica de elevada plasticidade; e a C uma argila inorgânica de plasticidade média e, que segundo o sistema de classificação AASHTO, estão incluídas num grupo considerado mau para uso como sub-bases.

Os testes de compactação realizados mostraram que o teor ótimo em água é tanto maior quanto maior for a percentagem de cal utilizada, o que pode ser explicado pela quantidade de água adicional que é necessária para que se deem as reações pozolânicas entre o solo e a cal, necessárias à estabilização.

A percentagem ideal de cal foi definida quando se atingiu o peso específico máximo. O mesmo acontece com os valores do CBR, que atingem um máximo com a percentagem ótima de cal, o que permite confirmar os resultados dos ensaios de compressão. Ainda outra conclusão que se retirou da análise dos valores do CBR, foi que estes valores num solo não saturado baixavam quando saturado, devido ao enfraquecimento do solo com o conteúdo em água.

Este artigo refere ainda que será tanto maior a diferença entre os valores do CBR do solo não saturado e o solo saturado, quanto maior o Índice de Plasticidade desse solo, e que essa diferença será bastante superior se o solo não estiver estabilizado, devido à água poder percolar pelos vazios que ainda não estão preenchidos.

Os ensaios à compressão simples realizados neste estudo mostraram que a resistência do solo tratado aumentou com o tempo, e que tanto a resistência deste como a do solo não tratado aumentavam com a adição de cal, sendo máxima a resistência com a percentagem ótima de cal.

Foi ainda realizado um ensaio triaxial não drenado e não consolidado, no qual se confirmou que o uso de cal aumenta a resistência ao corte, enquanto que o ângulo de atrito diminui.

3.5.1.3 Caso 3 – Utilização de materiais lateríticos como bases de pavimentos [13]

Foram realizados dois troços de pavimentos experimentais com materiais lateríticos, em Inhambane, ambos com 75 m de extensão e 0,20 m de espessura, sujeitos a um tráfego médio de 20 veículos por dia, durante um ano de trânsito e uma estação de chuva.

O primeiro troço era constituído por um produto britado de cascos lateríticos; e detritos de britagem como revestimento superficial, que apresentava ligeira degradação e visível ondulação. O segundo troço era constituído por uma base igual à do troço 1, mas com duplo revestimento betuminoso tipo ligeiro, sendo o agregado uma mistura (em partes iguais) de cascão laterítico britado e pedra calcária, pavimento este que apresentou um bom comportamento. Já a utilização de um duplo revestimento tipo pesado, cujo agregado é apenas cascão laterítico, apresenta uma maior rugosidade do tapete, devido à estrutura vacuolar do cascão laterítico. Quanto à resistência à compressão simples, o troço variava de 60 a 135 kg.cm⁻², em cubos de 6 x 6 cm.

Foi ainda realizado um troço de maior extensão (4300 m), em Beira-Rodésia, sujeito a um maior tráfego (80 veículos pesados e 160 ligeiros por dia), e sujeito a 2 épocas de chuva. Este troço constituía-se de uma base de terreno laterítico e de um tapete de betão asfáltico de 3 cm como camada de desgaste, tendo apresentado um bom comportamento.

Deste último troço concluiu-se que o índice de plasticidade é mais elevado após transporte e compactação; e que o CBR de campo em tempo seco era elevado, diminuindo após chover, mas mantendo-se ainda superior aos valores do CBR de laboratório.

Nesta referência [13] encontram-se ainda resultados de ensaios com laterites noutras aplicações, como betões com laterites, obras marítimas e construção de edificações.

3.5.1.4 Caso 4 – Utilização de solo-cimento laterítico em pavimentos [36]

Este estudo ocorreu na Tailândia, onde foram estudadas amostras de solo laterítico de Hatyai, obtidas entre 0,5 e 2,0 m de profundidade. Os resultados dos ensaios realizados em laboratório estão expostos na tabela 3.14. Para análise da estrutura mineralógica do solo, foi utilizado o Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM) e o Difractómetro de Raio-X, tendo-se encontrado $(Al_2(Si_2O_5)(OH)_4)$, $CaCO_3$ e SiO_2 .

Tabela 3.15 – Resultados dos ensaios de laboratório [36]

Propriedade	Valores
% de Passados no #200	10,6%
% de Passados no #4	51,8%
Limite de Liquidez	50%
Índice de Plasticidade	15,8%

Concluiu-se que a Resistência à Compressão Simples das amostras estudadas aumentava com o aumento da percentagem de cimento utilizada, e também com o tempo de cura. Foi ainda analisado o custo do solo-cimento laterítico comparativamente a uma base de brita, tendo os autores concluído que o primeiro é bastante mais barato que o segundo, e que o maior custo é o do cimento. Concluíram ainda que o solo-cimento laterítico é apropriado como camada de base de pavimento, sendo um substituto económico e com menos impacto ambiental que a base britada.

3.5.2 EXPERIÊNCIA PORTUGUESA

A realização de inquéritos permitiu obter informações acerca do contacto com laterites de oito engenheiros portugueses, com 7 a 25 anos de experiência profissional. No anexo III é possível ver um modelo do inquérito realizado. Todas as experiências foram com laterites africanas, em Angola, Moçambique, Guiné Equatorial, Senegal, Costa do Marfim, Burkina Faso e Gana. No geral, todas as laterites apresentavam cores avermelhadas ou alaranjadas e no seu perfil era possível distinguirem-se as camadas horizontais, como é típico dos solos residuais. Segue-se a descrição de cada caso e as recomendações dos engenheiros na utilização deste material.

3.5.2.1 Caso 1 – Aplicação de laterites em pavimentos – Angola

As laterites analisadas em Angola, com o propósito de construção de aterros e pavimentos, apresentavam uma cor vermelha e ocre, e o seu perfil era constituído por camadas horizontais, com maior grau de alteração quanto mais próximo da superfície.

Os ensaios realizados *in situ* foram furos de sondagem, cone de penetração dinâmica (DCP), e controlo de compactação. Em laboratório, foi realizada a análise granulométrica, o ensaio do Equivalente de Areia, Proctor e CBR, e determinados os limites de consistência e a densidade das partículas. Os resultados dos ensaios mostraram que as laterites apresentavam baixa expansão relativa, mas elevados índices de CBR e elevados valores do Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP).

A curva granulométrica era bem graduada e a cimentação estava presente, dois aspetos típicos das laterites. Quanto à plasticidade, revelou um Limite de Liquidez de 35%, um Limite de Plasticidade de 25% e um Índice de Plasticidade de 8.

Em Angola deve cumprir-se com o preconizado pela SATCC (*Southern Africa Transport and Communications Commission*). Na utilização em pavimentos, a laterite foi utilizada na camada de sub-

base e na de base, sendo exigidos $\text{CBR} \geq 40\%$, $\text{IP} \leq 6$ e grau de compactação de 95% para a camada de sub-base, e $\text{CBR} \geq 80\%$, $\text{IP} \leq 6$ e grau de compactação de 98% para a camada de base.

O comportamento da laterite com o tráfego demonstrou-se favorável, exceto se existisse contacto com água.

3.5.2.2 Caso 2 – Aplicação de laterites em pavimentos – Moçambique

Neste caso, as laterites foram analisadas para serem aplicadas em pavimentos em Moçambique, sendo de um vermelho ferruginoso, com perfil em camadas horizontais, com 0,3 a 1,5m de espessura de solos residual acima do *bedrock*, mas sem ser possível reconhecer o aumento do grau de alteração quanto maior a proximidade à superfície. Foi possível identificar a rocha-mãe da qual derivou a laterite, uma rocha metamórfica – Gnisses.

Ao contrário do primeiro caso apresentado, no qual as laterites eram bem graduadas, neste caso estas eram bem calibradas, mas confirmava-se a cimentação. A expansibilidade e a compressibilidade eram baixas, mas os Limites e Índice de Plasticidade eram elevados, chegando a ultrapassar o valor da retração linear, o que implicou a mistura com areia aluvionar.

Quanto aos ensaios realizados, *in situ* foram feitos furos de sondagem, e em laboratório CBR, ensaios de expansão por imersão, ensaios de contração por secagem (de acordo com STACC), e foram ainda determinados os Limites de Atterberg.

Neste caso, a laterite foi utilizada na camada de sub-base, com a estabilização com cimento por imposição do projeto de execução, e foram também cumpridas as especificações de SATCC.

Não se identificaram problemas relevantes no comportamento da laterite com o tráfego.

3.5.2.3 Caso 3 – Aplicação de laterites em pavimentos – Guiné Equatorial

Como é típico, as laterites caracterizadas, derivadas de uma rocha metamórfica, tinham cor avermelhada e amarelada, camadas horizontais visíveis no perfil do solo com a percepção do aumento do grau de alteração quanto mais próximo da superfície, com uma espessura de 0,5 a 1,0 de solo residual acima do *bedrock*, e com uma curva granulométrica bem graduada.

In situ foi realizado o *Dynamic Penetration Super-Heavy* (DPSH), e a análise granulométrica, Equivalente de Areia e Proctor em laboratório, assim como a determinação do teor em água e do peso específico. Apresentaram baixa expansibilidade e baixos Limites e Índice de Plasticidade, mas elevada compressibilidade.

A aplicação da laterite foi feita na camada de sub-base, com exigências de $\text{CBR} > 30\%$ e Expansibilidade $< 3\%$. O grau de compactação foi superior a 97%, com todos os procedimentos realizados de acordo com o PG3.

A laterite comportou-se bem com o tráfego, e concluiu-se que esta aumenta a sua capacidade de suporte com o tempo.

3.5.2.4 Caso 4 – Aplicação de laterites em subleito e leito do pavimento – Guiné Equatorial, Senegal, Costa do Marfim e Burkina Faso

A maioria das laterites analisadas era avermelhada e com as mesmas características do perfil, curva granulométrica e cimentação dos casos anteriores, mas neste caso foi determinado o pH, que variava entre 5 e 9.

Foram realizados furos de sondagem, análise granulométrica, Equivalente de Areia, Limites de Atterberg, Azul-de-Metileno, Proctor Modificado, CBR, degradabilidade e *Los Angeles*. O CBR resultou em valores elevados.

Estas laterites apresentaram compressibilidade, expansibilidade e Índice de Plasticidade baixos, de 60,0 kN/5,0 mm, 0,4 e 12, respetivamente.

Para o material era exigidas granulometrias com valores inferiores a 15%, Limites de Atterberg com valores de IP inferiores a 12 e valores de CBR superiores a 30%. O grau de compactação é no mínimo 98% e 95% para camada de subleito e leito do pavimento, respetivamente. Foram exigidas a Classificação LCPC/SETRA GTR92 (NF P 11-300), NFP 94-051-(052), NFP 94-068, NFP 94-078, NFP 94-093, etc..

As laterites tiveram um bom desempenho com o tráfego, não sofrendo assentamentos.

3.5.2.5 Caso 5 – Aplicação de laterites em aterros de estradas – Senegal

As laterites analisadas no Senegal, que foram utilizadas para aterros de estradas, tinham cor entre o amarelo alaranjado e o vermelho escuro. Era possível distinguir as camadas horizontais do perfil, com alguns afloramentos rochosos, mas não o aumento do grau de alteração quanto mais próximo da superfície, no entanto, era bem visível o horizonte entre a laterite e a terra vegetal.

Foram realizados furos de sondagem, análise granulométrica, Equivalente de Areia, Proctor, CBR e determinados os Limites de Atterberg. A curva granulométrica era bem graduada e a cimentação estava presente, como é normal nas laterites. A compressibilidade, expansibilidade e Limites e Índice de Plasticidade eram baixas, com LL <40 e IP <20. As densidades secas resultantes do Proctor eram superiores a 2,00 g/cm³.

As exigências para o material eram a realização da análise granulométrica, com percentagem do material passado no #200 <50% e #0,08 <25%; CBR > 30%; embebição <1%; LL <40 e IP <25. O grau de compactação ficou acima dos 98% do valor de referência, tendo a laterite apresentado um bom comportamento com o tráfego.

3.5.2.6 Caso 6 – Aplicação de laterites em pavimentos e fundações de aterro – Senegal (Tambacounda)

Este é mais um caso de laterites analisadas no Senegal, classificadas com base no CBR, com a típica cor vermelha, e o perfil com as camadas bem distintas e com maior grau de alteração com a proximidade à superfície, com uma camada de solo residual de cerca de 20 cm acima do *bedrock*, com maior quantidade de material pétreo nalgumas zonas.

Foram realizados poços com escavadora, CBR, ensaios de expansão por imersão e determinados os Limites de Atterberg, obtendo-se valores altos no CBR. A curva granulométrica era bem graduada e confirmou-se a cimentação do material.

Neste caso, as laterites foram utilizadas na camada de base do pavimento, com exigências de valores altos para o CBR. O grau de compactação foi de 95% (relativo ao Proctor Modificado). Foi realizada a mistura com cimento e a laterite teve um comportamento muito bom.

Quanto à utilização nas fundações de aterro, a laterite não foi melhorada com cimento, mas também teve um desempenho muito bom. Para o aterro, o grau de compactação foi de 90% (relativo ao Proctor Modificado).

3.5.2.7 Caso 7 – Aplicação de laterites em pavimentos – Gana (Acra)

Neste caso, as laterites foram classificadas com base no valor do CBR e do IP. Eram avermelhadas com a fração grossa de cor oxidada, com o típico perfil de camadas horizontais distintas mais degradadas junto à superfície, com espessuras entre 50 cm e 1,20 m, com solos pobres por baixo, os solos saprolíticos.

A curva granulométrica era bem graduada, com cimentação confirmada, e não foi possível determinar a rocha-mãe mas, por observação da zona, o engenheiro presume que as laterites derivaram de uma rocha sedimentar.

A compressibilidade era baixa, a expansibilidade era de 0,1 mm, ou seja, igualmente baixa, o LL era inferior a 35% e o IP inferior a 10%, valores também baixos.

In situ foram realizadas sondagens para avaliar as características mecânicas, e em laboratório, CBR e análise granulométrica, com percentagem média do material passado no peneiro #0,075 de 16%. O CBR revelou valores elevados de 70% e, em alguns casos, de 140%.

A laterite foi aplicada na camada de sub-base do pavimento, com exigência de $\text{CBR} \geq 70\%$, passados no peneiro #200 $\leq 20\%$, $\text{LL} \leq 35\%$ e $\text{IP} \leq 11\%$, 98% de compactação, com baridades de 2,28 gr/m³. Foi realizada a mistura com cimento, de modo a melhorar as características da laterite.

3.5.2.8 Caso 8 – Aplicação de laterites em pavimentos e fundações – Gana

Mais um caso da aplicação das laterites em pavimentos no Gana, mas que também foram utilizadas em fundações.

Estas laterites tinham uma cor laranja/avermelhada, cujo estrato se encontrava próximo da superfície. No perfil, com cerca de 1m de solo residual acima do *bedrock*, distinguiram-se as camadas horizontais mas não o grau de degradação crescente quanto maior a proximidade da superfície.

Os furos de sondagem, a análise granulométrica, o CBR e os Limites de Atterberg foram os ensaios realizados. Obteve-se uma expansibilidade de 0,50mm, um LL de 28%, um IP de 9 e um CBR de 60% a 90%.

O comportamento da laterite na camada de sub-base foi bom, mas em época chuvosa não era possível o tráfego circular, pelo que se confirma mais uma vez o problema do contacto das laterites com água, sendo necessária uma boa e adequada drenagem.

Conclusões e Recomendações dos Inquéritos

Como é possível ver no inquérito-modelo do anexo III, foi pedido que os engenheiros indicassem aspetos importantes e/ou recomendações para o uso das laterites, os quais foram:

- Compreender o que são laterites e quais os materiais que merecem esta designação;
- As laterites são consideradas um material fácil de trabalhar, quando nas condições ótimas;
- Não se devem rejeitar materiais só porque são latentes, mas não se pode esperar um desempenho excelente de todas as laterites;
- Seria importante desenvolver uma classificação dos materiais lateríticos para fins rodoviários;
- Foi recomendado efetuar um aterro experimental com o objetivo de avaliar a metodologia e os meios de compactação necessários, visto em alguns casos já ter sido necessário recorrer aos cilindros de pé-de-carneiro;
- As laterites têm excelente capacidade de compactação, alcançando facilmente o grau de compactação desejado;
- Importante ter em conta a curva granulométrica e os limites de Atterberg antes e depois da compactação;
- O facto da estabilização do pH ser uma condição da taxa de cimento a utilizar, para impedir a carbonatação das ligações cimentícias, leva a um sobre consumo de cimento;
- Ter o cuidado de fazer uma drenagem adequada e não deixar encharcar as laterites, de modo a obter um bom desempenho das mesmas, e porque a redução do seu teor de humidade é extremamente difícil;
- A aplicação do material deve ser executada acima do teor ótimo de humidade, de modo a tornar a compactação eficiente;
- Importante efetuar um pré-stock de material com humidificação aproximada ao teor em água ótimo (relativo ao Proctor Modificado), mas ter atenção ao excesso de humidade que pode tornar o processo de construção impraticável;
- Garantir boa homogeneização dos materiais, para garantir boa execução dos aterros;
- Homogeneização do material com grade de discos antes de se proceder à regularização;
- Ter o cuidado de, aquando da criação do stock, não permitir a mistura das laterites com a matéria orgânica existente ou com os solos pobres que existem antes do *bedrock*.

3.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo, pretendeu-se referir os aspetos mais relevantes da utilização das laterites em pavimentos rodoviários. Da síntese bibliográfica apresentada neste capítulo, salientam-se os seguintes pontos:

- Há necessidade de elaborar normas especificamente para a utilização de laterites;
- O comportamento das laterites em pavimentos depende do tráfego, das condições ambientais, das características granulométricas, da natureza e resistência da fração grossa e do grau de compactação;
- As laterites são mais utilizadas na camada de sub-base ou de base do pavimento, sendo os seixos lateríticos muito aplicados, apesar das suas limitações, pelo facto de a fração fina e a resistência das partículas grossas serem variáveis;
- Só é adequado o uso da laterite se o CBR for superior a 60, senão deve recorrer-se ao tratamento;

- O CBR diminui quando o solo fica saturado;
- O teor em água utilizado na execução da camada de base deve ser o que garante o CBR mínimo especificado pelo projeto;
- Os solos lateríticos adequados para camadas de base devem ter uma graduação graúda, uma relação molecular sílica-sesquióxido inferior a 2 e expansibilidade inferior a 0,2%;
- A camada de base pode sofrer um grande desgaste se não estiver completamente endurecida, devido à resistência ao corte ficar a dever-se apenas ao atrito entre partículas;
- Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, CBR e análise granulométrica devem ser realizados para verificação da aceitação do serviço;
- Não se recomenda a utilização do asfalto com mistura laterítica em faixas de tráfego geral e não se recomenda o uso de areia nas misturas lateríticas;
- A compactação de aterros para estradas é muito importante devido à estrutura solta dos solos lateríticos, devida à lixiviação. Recomenda-se testar a compactação *in situ* para verificação do comportamento após compactação;
- As laterites não reagem bem com a água, daí ser necessária uma drenagem adequada, para impedir o amolecimento e enfraquecimento dos solos;
- Mesmo compactada, a laterite tende a corrugar com o tráfego. Recomenda-se, portanto, o revestimento da superfície para evitar perda de finos;
- A estabilização com cal melhora a trabalhabilidade do solo, reduz o potencial de expansão e a plasticidade;
- O teor em água é tanto maior quanto maior a percentagem em cal;
- A percentagem ideal de cal é definida quando se atinge o peso específico máximo;
- A precipitação de calcite por atividade microbiana (MICP) é uma alternativa sustentável à cal e cimento, já que não contamina o solo nem lençóis freáticos, e aumenta eficazmente a resistência ao corte e diminui a condutividade hidráulica;
- O solo-cimento laterítico é adequado para camadas de base, pois tem elevada resistência ao corte;
- O solo-cimento laterítico é bastante mais barato que a brita;
- No geral, as laterites foram consideradas pelos engenheiros um material fácil de trabalhar, quando nas condições ótimas;
- É importante ter em conta a curva granulométrica e os limites de Atterberg antes e depois da compactação;
- A aplicação das laterites deve ser executada acima do teor ótimo de humidade, de modo a tornar a compactação eficiente;

4

CONCLUSÕES

4.1 OBJETIVOS ATINGIDOS E CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo deste trabalho, a revisão de literatura e compilação da mesma, foi atingido com a pesquisa intensiva acerca dos solos residuais tropicais e das laterites em específico, e com a elaboração da base de dados, de forma a agregar toda a informação recolhida. A maior dificuldade foi a dispersão da informação tanto quanto ao local onde se encontram os documentos, quanto à data de publicação dos mesmos, e visto que a evolução paleoclimática tem muita influência na distribuição e constituição das laterites, a distância temporal entre publicações pode ter levado à perda de registos importantes na evolução das laterites.

Os solos residuais tropicais são solos peculiares devido à meteorização mais avançada, que lhe confere as características únicas, e o facto deste tipo de solo ter três fases é o que torna a sua utilização em engenharia civil mais difícil.

As laterites são caracterizadas pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro, o que leva a que possuam um pH ácido, e apresentam normalmente uma curva granulométrica muito bem graduada, sendo a cimentação uma condição mineralógica das laterites, condição essa que restringe a compressibilidade. Geralmente têm baixa expansibilidade, plasticidade e atividade e é importante ter em conta a sucção, já que a maioria das laterites se encontra não saturada ou parcialmente saturada, o que influencia na resistência ao corte e na permeabilidade, devendo-se o seu comportamento único às pressões negativas. De modo a classificar as laterites têm surgido diversas classificações, sendo a mais utilizada a baseada na relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$, e a Metodologia MCT e o ensaio do Azul-de-metileno são a melhor forma de identificação de solos com comportamento laterítico.

Ao realizar a pesquisa acerca de laterites de África, do Brasil, e da Índia, concluiu-se que as laterites não são todas iguais, apesar de apresentarem algumas características comuns.

Outra dificuldade encontra-se na falta de especificações para ensaio e aplicação de laterites, existindo algumas referências a estes solos em algumas normas, mas não sendo o suficiente para lidar com estes solos tão peculiares, que não exibem um comportamento que possibilite a aplicação da mecânica dos solos clássica de forma correta, sendo necessário fazer muitas alterações para que se adeque a este tipo de solos. Existem algumas referências com sugestões de alterações às normas.

A utilização das laterites em pavimentos é uma alternativa económica, que funciona bem como sub-base ou base do pavimento, dependendo da qualidade da laterite e aptidão para tal.

Existe a necessidade de registrar e estudar os casos de rotura que ocorrem com laterites, de modo a haver melhor compreensão do seu comportamento sendo mais fácil evitar estes acidentes, prevenindo consequências drásticas económicas e perdas humanas. Os casos já registados apontam para a drenagem inadequada e para o não cumprimento das especificações como causas principais.

A base de dados criada é uma ferramenta útil, já que agrega num só sítio os documentos existentes acerca deste tema, e que pode sempre ser atualizada e completada por quem trabalhe com este tema no futuro.

Quanto à outra ferramenta de apoio – inquéritos – foi efetuada a análise qualitativa e síntese dos resultados recolhidos junto das empresas nacionais e realizada a identificação de eventuais limitações na aplicação dos solos lateríticos decorrentes, quer da localização geográfica, quer de constrangimentos decorrentes de dificuldades técnicas e logísticas.

4.2 TRABALHO FUTURO

O estudo das laterites poderá ser mais aprofundado, já que este tipo de solo ainda não está completamente integrado na mecânica dos solos. Para tal, seria necessário realizar ensaios com laterites de diversos locais, com o objetivo de caracterizar o seu comportamento e, posteriormente, elaborar normas que facilitem o trabalho com este material. Como foi recomendado na resposta aos inquéritos, poder-se-ia, por exemplo, realizar um aterro experimental, de modo a avaliar a metodologia e meios de compactação necessários.

Quanto às ferramentas de apoio, a base de dados pode ser melhorada no aspeto visual e ligações entre tabelas, e poderá ser atualizada à medida que prosseguem os estudos. Os inquéritos podem ser continuados, de modo a ser obtida uma amostra maior, podendo comparar-se as laterites dos locais de trabalho distintos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. B. K. Huat, D. G. Toll, and A. Prasad, *Hand Book of Tropical Residual Soils Engineering*. C.R.C.Press/Balkema, 2012.
- [2] V. da Fonseca, “Caracterização geotécnica de um solo residual do granito da região do Porto,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1988.
- [3] F. G. Bell, *Engineering Geology*. Department of Geology and Applied Geology University of Natal, Durban, South Africa: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [4] “Geomorfologia Climática.” [Online]. Available: <http://dc403.4shared.com/doc/fwxmlnvr/preview.html>.
- [5] P. Autret, *Latérites et graveleux latéritiques*. ISTED - LCPC, 1983.
- [6] K. S. S. Rao, P. V. Sivapullaiah, and J. R. Padmanabha, “Influence of Climate on the Properties of Tropical Soils,” in *Geomechanics in tropical soils*, A.A.Balkema, 1988, pp. 49–54.
- [7] B. B. K. Huat, F. H. Ali, and A. Abdullah, “Shear Strength Parameters of Unsaturated Tropical Residual Soils of Various Weathering Grades,” 2005. [Online]. Available: <http://www.ejge.com/2005/Ppr0564/Ppr0564.htm>.
- [8] J. R. Cook and D. Newill, “The field description and identification of tropical residual soils,” in *Geomechanics in tropical soils*, A.A.Balkema, 1988, pp. 3–10.
- [9] A. C. Diniz, “Grandes Bacias Hidrográficas de Angola - Recursos em terras com aptidão para o regadio – Rio Cunene.” 2005.
- [10] DNIT, *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, 2006.
- [11] Bastos, Schmitt, Vasconcellos, Rabassa, and Souza, “Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul,” 2008.
- [12] O. O. Amu, O. F. Bamisaye, and I. A. Komolafe, “The suitability and Lime Stabilization Requirement of Some Lateritic Soil Samples as Pavement,” 2011.
- [13] *As Laterites do Ultramar Português*. Lisboa: Lab. Nacional de Eng.Civil, Lab. De Eng. De Angola (Luanda), Lab. De Ensaios de Materiais e Mecânica dos solos (Lourenço Marques), 1959.
- [14] W.J.Morin and P. C. Todor, *Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics*, Volume II. .
- [15] R. J. Chen, “A study on some engineering properties of lateritic soil,” in *Geomechanics in tropical soils*, A.A.Balkema, 1988, pp. 245–252.

- [16] C. Espindola and L. Daniel, “Laterita e Solos lateríticos no Brasil,” 24, 2008.
- [17] Y. Tardy, B. Kobilsek, and H. Paquet, “Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia,” *J. African Earth Sci.*, vol. 12, no. No.1/2, pp. 283–295, 1991.
- [18] Y. Tardy, B. Kobilsek, and H. Paquet, “Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia,” *J. African Earth Sci.*, vol. 12, no. No.1/2, pp. 283–295, 1991.
- [19] M. J. Pratas, “Estudo da Laterização na Baixa de Jangamo,” 1964.
- [20] J. F. C. Serafino, “Contribuição para o estudo mineralógico de terrenos lateríticos de Nampula e de António Enes,” 1963.
- [21] J. N. Júnior, *Lateritas*. 1985.
- [22] C. Espindola and L. Daniel, “Laterita e Solos lateríticos no Brasil,” 2008.
- [23] G. Martinez, “Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [24] J. N. Júnior, *Lateritas*. 1985.
- [25] G.E.Blight and E.C.Leong, *Mechanics of Residual Soils*, Second Edi. A.A.Balkema, 2012.
- [26] L. Shaw-Shong, “Slope failures in tropical residual soils,” in *Tropical Residual Soils Engineering*, 2009, pp. 128–179.
- [27] E. W. Brand and H. B. Phillipson, “Review of International Practice for the Sampling and Testing of Residual Soils,” in *Sampling and Testing of Residual Soils*, 1985, pp. 7–22.
- [28] O. O. Owoyemi and G. O. Adeyemi, “Highway Geotechnical Properties of Some Lateritic Soils from the Sedimentary Terrain of the Lagos – Ibadan Highway,” 2012.
- [29] B. Tozzi, E. Mosele, J. Lunelli, S. Miotto, and H. Fontenele, “Manutenção de Estradas Não Pavimentadas em Região do Oeste do Paraná: Breve Diagnóstico,” Paraná.
- [30] F. R. Bianchi, I. R. T. Brito, and V. A. B. Castro, “Estudo Comparativo entre Pavimento Rígido e Flexível.” 2008.
- [31] C. Vale, “Dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirígidos.” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [32] Centre Expérimental de Recherches et d’Études du Bâtiment et des Travaux Publics, “Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux.” Ministère des Relations Extérieures Coopération et Développement, 1984.

- [33] IPR, *NORMA DNIT 098/2007 – ES - Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2007.
- [34] M. R. W. Australia, “Specification 504 Asphalt Wearing Course,” 2012. [Online]. Available: https://www.mainroads.wa.gov.au/Documents/Specification_504 Asphalt Wearing Course 12 Nov 2012.u_4111924r_1n_D12%5E23373889.PDF.
- [35] N. W. Soon, L. M. Lee, T. C. Khun, and H. S. Ling, “Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation,” 2013.
- [36] S. Jaritngam and O. S. P. Taneerananon, “An Investigation of Lateritic Soil Cement for Sustainable Pavements,” 2012.
- [37] B. I. Siswosoebrotho, M. Hossain, A. Alias, and B. B. K. Huat, “Stabilization of tropical residual soils,” in *Tropical Residual Soils Engineering*, 2009, pp. 259–296.
- [38] Ahmad, Taha, and Kassim, “Electrokinetic treatment on a tropical residual soil,” 2011.
- [39] H. F. Winterkorn and E. C. Chandrasekharan, “Laterite soils and their stabilization,” in *Volcanic Ash and Laterite Soils in Highway Construction*, 44th ed., Washington D.C.: Highway Research Board, 1951, pp. 10–29.

Anexos

ANEXO I	RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE ALTERAÇÃO DA ROCHA E O COMPORTAMENTO
ANEXO II	CLASSIFICAÇÃO MCT
ANEXO III	INQUÉRITO

ANEXO I – RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE ALTERAÇÃO DA ROCHA E O COMPORTAMENTO [3]

Reconhecimento in situ [Segundo Little (1969); Fookes et al. (1972); Dearman (1974)]					Comportamento		
Grau	Grau de decomposição	Rocha (Principalmente Intemperismo Químico)	Rocha (Intemperismo Mecânico)	Rochas Carbonatadas (Solução)	Segundo Little (1969)	Segundo Hobbs (1975)	Segundo Martin e Hencher (1986)
VI	Solo Residual	Rocha descolorada e completamente transformada em solo, em que a estrutura original da rocha foi completamente destruída. Grande alteração no volume.	Rocha transformada em solo por desintegração granular e/ou fragmentação. Estrutura da rocha destruída e o solo consiste nos restos dos minerais inalterados da rocha original.	Não ocorre este grau de meteorização neste tipo de rocha.	Inadequado para fundações importantes. Instável em taludes cuja proteção vegetal é destruída, podendo ser erodida por não ter proteção. Necessária seleção para uso como material de enchimento.	Possível obter amostras de qualidade razoável, dependendo do tipo de rocha mãe e da consistência do produto. Pode testar-se a capacidade de resistência neste estado extremo a partir dos testes clássicos.	É uma mistura de solos. A estrutura original da rocha está completamente destruída

Reconhecimento <i>in situ</i> [Segundo Little (1969); Fookes et al. (1972); Dearman (1974)]					Comportamento		
Grau	Grau de decomposição	Rocha (Principalmente Intemperismo Químico)	Rocha (Intemperismo Mecânico)	Rochas Carbonatadas (Solução)	Segundo Little (1969)	Segundo Hobbs (1975)	Segundo Martin e Hencher (1986)
V	Completamente alterado	Rocha descolorada e totalmente decomposta e friável, mas com a estrutura original preservada. As propriedades do maciço rochoso dependem, em parte, da natureza da rocha-mãe. Nas rochas graníticas, o feldspato está completamente caulinizado.	Rocha transformada em solo por desintegração granular e/ou fracturação. A estrutura da rocha encontra-se preservada.	Não ocorre este grau de meteorização neste tipo de rocha.	Não pode ser recuperado para enchimento por métodos comuns de perfuração rotativa. Pode ser escavado à mão ou desagregado sem o recurso a explosivos. Não aplicável a fundações de barragens de betão, nem a grandes estruturas. Pode ser aplicável a fundações de barragens de terra e para enchimento. Instável em cortes com ângulos íngremes. Podem ter-se formado novos padrões de discontinuidades. Necessita de proteção contra a erosão.	Possível obter amostras de qualidade razoável, dependendo do tipo de rocha mãe e da consistência do produto. Pode testar-se a capacidade de resistência neste estado extremo a partir dos testes clássicos.	Não recupera da utilização do martelo de Schmidt; amolece instantaneamente na água; picaresca avança facilmente quando empurrada contra a superfície; rocha está completamente decomposta, mas a sua textura está preservada.

Reconhecimento <i>in situ</i> [Segundo Little (1969); Fookes et al. (1972); Dearman (1974)]							
Comportamento							
Grau	Grau de decompo sição	Rocha (Principalmente Intemperismo Químico)	Rocha (Intemperism o Mecânico)	Rochas Carbonatada s (Solução)	Segundo Little (1969)	Segundo Hobbs (1975)	Segundo Martin e Hencher (1986)
IV	Muito alterado	Rocha descolorada; descontinuidades podem estar abertas e terem faces descoloradas (por exemplo, manchadas pela limonite) e a estrutura da rocha perto das descontinuidades está alterada; a alteração estende-se profundamente no interior, mas as concreções continuam presentes. O maciço rochoso está parcialmente friável. Menos de 50% de rocha.	Mais de 50% e menos de 100% de rocha está desintegrada por descontinuida des abertas e/ou por desintegração granular. A estrutura da rocha está preservada.	Mais de 50 % de rocha removida por solução. Pode conter um pequeno resíduo nos vazios.	Semelhante ao Grau V. Por vezes recuperada como enchimento, se a perfuração rotativa for feita com cuidado. Pouco provável ser aplicável a fundações de barragens de betão. A presença irregular de seixos faz com que seja instável para fundações de grandes estruturas.	Dificuldade em obter amostras intactas para testar. Se se conseguir amostras, a força e módulo serão geralmente subestimados, frequentemente por grandes margens, até com amostras aparentemente intactas. Ensaios <i>in situ</i> com o PMT ou PLT devem ser realizados para determinar a capacidade de carga e as características.A maior dificuldade em determinar estes parâmetros em rocha neste grau é devida ao aumento da desintegração ou da plasticidade da estrutura da rocha.	Valores de repercussão do martelo de Schmidt entre 0 e 25; não amolece instantaneamen te na água; picareta não consegue ser empurrada contra a superfície; índice de resistência do penetrómetro nual >250kPa; rocha enfraquecida, permitindo partir pedaços com a mão; grãos individuais arrancados da superfície.

ANEXO II – CLASSIFICAÇÃO MCT (ADAPTADO DE [10])

Classe		L-Solos de Comportamento Laterítico		
Grupos		LA Areias	LA' Arenosos	LG' Argilosos
Granulometria típica (minerais)		Areias com pouca argila	Areias argilosas, Argilas arenosas	Argilas, Argilas arenosas
Capacidade de Suporte *	Mini-CBR sem imersão (%)	Muito alto >30	Alto a Muito Alto	Alto
		Alto 12-30		
		Médio 4-12		
		Baixo <4		
	Perda de Suporte por imersão (%)	Alta >70	Baixa	Baixa
		Média 40-70		
		Baixa <40		
Expansão	(%)	Alta >3	Baixa	Baixa
	(*)	Média 0,5-3		
Contração	(%)	Média 0,5-3	Baixa a Média	Média a Alta
	(*)	Baixa <0,5		
Permeabilidade Log (k (cm/s)	(*)	Alta > (-3)	Média a Baixa	Baixa
		Média (-3) a (-6)		
		Baixa < (-6)		
Plasticidade	(%)	NP a Baixa	Baixa a Média	Média a Alta
	IP			
	>30			
	7-30			
	<7			
Propriedades típicas dos grupos de solos				

*Corpos-de-prova compactados com o w_{op} da energia do Proctor Normal, com sobrecarga padrão quando necessário, sem fração retida no # 2 mm

*Corpos-de-prova compactados com o w_{op} da energia do Proctor Normal, com sobrecarga padrão quando necessário, sem fração retida no # 2 mm

ANEXO III – INQUÉRITO

Pedido de colaboração para tese de mestrado (FEUP)

Ex^{mo} Senhor:

O meu nome é Sónia Dutra e, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, estou a realizar uma tese, subordinada ao tema “Utilização de Laterites em Zonas Equatoriais”, sob orientação de Eng.º António Campos e Matos e Eng.ª Cecília Vale. O objetivo geral do trabalho é compilar a informação já existente acerca do tema, que está de novo a ganhar uma importância significativa. Para um melhor concretizar deste objetivo, venho solicitar a vossa colaboração, através do preenchimento do inquérito abaixo indicado até ao dia 12 de junho, inquérito este que será analisado em termos qualitativos e não estatísticos.

Se tiver interesse no trabalho que estou a realizar, terei muito gosto em enviar-lhe um exemplar de tese, depois da sua conclusão e aprovação. Para isso, basta indicar abaixo o seu contacto.

Muito agradeço a vossa cooperação.

30 de maio de 2014

Sónia Dutra.

A. Contacto (opcional), para posterior envio de exemplar de tese

Nome: _____

Empresa/Instituição: _____

Email: _____

Morada institucional _____

B. Em que campo de engenharia civil desenvolve atualmente a sua atividade?

C. Quantos anos tem de atividade profissional?

D. Durante a sua carreira profissional, teve algum projeto/trabalho relacionado com laterites?

☐ Sim

☐ Não

No caso de resposta negativa, tem interesse em conhecer os materiais lateríticos para utilização em:

☐ Aterro de barragem

☐ Aterros de estradas, linhas férreas

☐ Materiais de pavimentos

☐ Fundações

☐ Outros _____

A resposta ao inquérito terminou.

No caso de resposta positiva, e relativamente às laterites que analisou, indique:

1. De onde eram provenientes as laterites que analisou?

2. Quais as suas (principais) aplicações?

- ☐ Pavimentos
- ☐ Fundações
- ☐ Aterros para barragens
- ☐ Aterros de estradas, linhas férreas
- ☐ Outros _____

3. Quais os critérios de classificação utilizados para essas laterites?

- ☐ Classificação baseada na relação molecular $\frac{SiO_2}{R_2O_3}$
- ☐ Classificação baseada na relação molecular $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
- ☐ Classificação baseada nos processos pedogénicos
- ☐ Outro: _____
- ☐ Nenhum

4. Principais características

4.1 Que cor tinham as laterites?

4.2 Como era o perfil do solo?

4.2.1 Conseguia distinguir-se camadas horizontais?

- ☐ Sim ☐ Não

4.2.2 Notou que o grau de degradação era maior quanto mais próximo da superfície?

☐ Sim

☐ Não

4.3 Outros aspetos a salientar (concreções, etc.):

4.4 A curva granulométrica era bem graduada (como é típico das laterites)?

☐ Sim

☐ Não

4.5 Sabendo que os solos lateríticos tendem a ser ácidos devido à concentração dos sesquióxidos de ferro e alumínio, tem ideia do valor do pH do solo estudado?

☐ Sim _____

☐ Não

4.6 Qual era a espessura da camada do solo residual acima do *bedrock*?

4.7 Foi identificado algum tipo de intemperismo dominante?

☐ Sim

☐ Não

☐ Químico

☐ Físico

☐ Biológico

4.8 Foi identificada a rocha-mãe da qual derivou a laterite?

- ☐ Sim ☐ Não
- ☐ Sedimentar
- ☐ Metamórfica
- ☐ Ígnea

5. Uma das condições mineralógicas dos solos lateríticos é a cimentação. Confirma este facto no material analisado?

- ☐ Sim ☐ Não

6. O solo laterítico estudado apresentava compressibilidade, expansibilidade e plasticidade baixas?

- ☐ Sim ☐ Não

☐ Compressibilidade_____ ☐ Compressibilidade_____

☐ Expansibilidade_____ ☐ Expansibilidade_____

☐ Limites e Índice de Plasticidade_____ ☐ Limites e Índice de Plasticidade_____

7. Que ensaios foram realizados para caracterização dos solos lateríticos?

7.1 *In situ* (SPT, CPT, furos de sondagem, etc.)

7.2 Em laboratório (CBR, ensaios de expansão por imersão, ensaios de contração por secagem, Limites de Atterberg, etc.)

7.3 Que aspetos importantes dos resultados dos ensaios salienta?

No caso de ter utilizado laterites em **pavimento**, solicita-se respostas às questões 8 a 16.

No caso de ter utilizado laterites em **aterros**, solicita-se resposta às questões 17 a 25.

Utilização de laterites em pavimento

8. A laterite ou solo laterítico foi utilizada na camada de sub-base ou de base?

- ☐ Sub-base
- ☐ Base
- ☐ Outra _____

9. Quais as características exigidas para o material?

- ☐ Sub-base: _____
- ☐ Base: _____
- ☐ Outra: _____

10. Como se comportou a laterite com o tráfego?

11. Qual o grau de compactação?

12. Quais as especificações exigidas?

13. Houve necessidade de recorrer à estabilização do solo?

☐ Sim

☐ Não

☐ Cal

☐ Cimento

☐ Outros: _____

14. Há registo de algum acidente após construção?

☐ Sim

☐ Não

Causa: _____

15. Que recomendações pode referir para o uso das laterites?

16. Que aspetos considera importante salientar?

Utilização de laterites em aterro

17. Que tipo de aterro foi realizado?

18. Quais as características exigidas para o material?

19. Como se comportou a laterite com o tráfego?

20. Qual o grau de compactação?

21. Quais as especificações exigidas?

22. Houve necessidade de recorrer à estabilização do solo?

☐ Sim

☐ Não

☐ Cal

☐ Cimento

☐ Outros: _____

23. Há registo de algum acidente após construção?

☐ Sim

☐ Não

Causa: _____

24. Que recomendações pode referir para o uso das laterites?

25. Que aspetos considera importante salientar?

O inquérito terminou.

Muito obrigada.

