

UTILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

The use of lateritic soils as road pavement material

Sónia Dutra*

Cecília Vale**

RESUMO – A utilização dos solos lateríticos por parte de empresas Europeias, concretamente das Portuguesas, está a ganhar nova importância, pois a necessidade de sustentabilidade no processo de internacionalização das mesmas impõe a procura de opções mais económicas e sustentáveis na construção civil que ofereçam vantagens competitivas através da diferenciação nos mercados onde atuam. A informação acerca dos materiais lateríticos encontra-se temporal e espacialmente dispersa, pelo que o presente artigo pretende agregar a informação mais relevante e divulgar a importância e a utilidade dos solos lateríticos como material de pavimentação.

SYNOPSIS – The use of lateritic soils by European companies, particularly the Portuguese ones, is gaining new importance, due to the need for sustainability in the companies' internationalization process, which requires the use of more economical and sustainable options in construction, providing competitive advantage through differentiation in the markets where those companies operate. The information on lateritic materials is temporally and spatially scattered, therefore this paper aims to compile the most relevant information on the subject and to highlight the importance of lateritic soils as road pavement material.

PALAVRAS CHAVE – Solos lateríticos, pavimentos rodoviários, especificações.

1 – INTRODUÇÃO

Segundo Viana da Fonseca (1988), os “solos residuais são aqueles que resultam da decomposição *in situ* das rochas que lhe são originárias”. Na decomposição referida, o intemperismo pode ser de origem química, física ou mecânica e biológica. No caso dos solos residuais tropicais, que existem apenas nos trópicos, os processos geomorfológicos de formação mais importantes são o químico e o físico, que se descrevem no Quadro 1.

Quanto à composição mineralógica, os solos residuais tropicais são constituídos por minerais argilosos, minerais silicatados, óxidos metálicos hidratados, quartzo e SiO₂, cuja proporção depende da intensidade do intemperismo e do avanço da degradação. O perfil destes solos consiste na existência de camadas horizontais distintas, mais ou menos paralelas à superfície, que geralmente estão mais degradadas à superfície, devido às intempéries.

Relativamente à distribuição geográfica dos solos residuais, há a referir que, nas zonas tropicais húmidas, estes materiais encontram-se em grandes extensões e até grandes profundidades, sendo o intemperismo químico o que mais influencia o processo de formação (Huat *et al.*, 2012).

* Mestre, Engenheira Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, svm.dutra@gmail.com

** Professora Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. cvale@fe.up.pt

Quadro 1 – Processos geomorfológicos de formação de solos residuais tropicais (adaptado de Huat *et al.*, 2012).

Zona morfoclimática	Temperatura média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Importância relativa dos processos geomorfológicos
Tropical Húmida	20-30	>1500	Intemperismo químico elevado; intemperismo mecânico limitado; ativo e episódico movimento do maciço; taxas de corrosão moderadas a baixas.
Tropical Húmida-Seca	20-30	600-1500	Intemperismo químico ativo durante a estação húmida; intemperismo mecânico baixo a moderado; movimento do maciço bastante ativo; ação fluvial elevada durante a estação chuvosa; ação do vento normalmente mínima, mas localmente moderada na estação seca.
Tropical Semiárida	10-30	300-600	Intemperismo químico moderado a baixo; 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 Árida	10-30	0-300	Intemperismo mecânico elevado (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.

Assim, há acumulação destes materiais em camadas bastante espessas devido à intensa meteorização, acelerada pelas altas temperaturas e pela presença de água típica dos trópicos. A distribuição dos solos residuais tropicais encontra-se ilustrada na Figura 1.

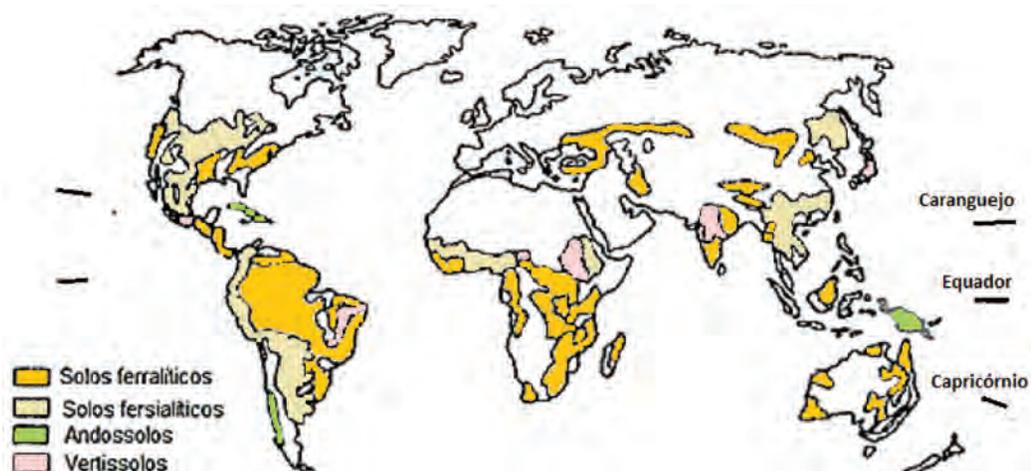


Fig. 1 – Distribuição geográfica dos solos residuais tropicais (adaptado de Huat *et al.*, 2012)

O termo laterite derivou do latim *later*, que significa tijolo, e a primeira menção a este termo surgiu na Índia, em 1807 (Bell, 1993). Trata-se de uma referência apenas com significado histórico, já que as laterites conhecidas não permitem fazer tijolos para construção. Atualmente, existem variadas definições de laterites, havendo, no entanto, consenso nessas definições acerca da sua cor

avermelhada, devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. Alguns autores fazem ainda distinção entre laterites e solos lateríticos, referindo que estes apresentam uma menor concentração de óxidos (Amu *et al.*, 2011).

Quanto à distribuição geográfica, as laterites encontram-se em zonas tropicais, surgindo principalmente na Guiné, Angola, Moçambique e Índia, estando também registadas muitas ocorrências no Brasil e Austrália.

Neste artigo faz-se uma síntese da informação relativa a laterites de modo a divulgar a importância da sua utilização como material de pavimentação. Informação detalhada acerca deste tipo de solo residual tropical pode ser consultada em Dutra (2014), que inclui uma base de dados com indicação de várias referências bibliográficas sobre solos residuais.

2 – ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE SOLOS RESIDUAIS

Não é fácil caracterizar as propriedades dos solos residuais em laboratório, pelo facto de serem solos difíceis de amostrar, daí que as propriedades destes materiais são normalmente determinadas *in situ*. Os ensaios de caracterização de solos residuais tropicais mais comuns são os conhecidos SPT, CPT, VST, PMT, CBR *in situ* e PLT (Cook e Newill, 1988). Ainda segundo estes autores, as amostras devem ser conservadas e estudadas no estado natural do solo, sem este ter sido remexido. A Metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) tem-se também revelado muito útil para identificar solos com comportamento laterítico.

2.1 – Recolha e preparação de amostras

Devido à heterogeneidade e à anisotropia dos solos residuais tropicais, é importante definir convenientemente o plano de amostragem para que este seja representativo do local em estudo. Para além disso, a Mecânica dos Solos Clássica não é completamente aplicável a este tipo de solos; alguns ensaios clássicos, na sua forma convencional, podem conduzir a resultados não fiáveis, havendo necessidade, em alguns casos, de fazer ajustes aos ensaios clássicos. As amostras devem ser fechadas em recipientes de vidro ou plástico, sacos de plástico ou latas. A estrutura do solo, índice de vazios, interligação entre partículas e teor em água devem ser preservados, pois algumas dessas propriedades, nos solos residuais tropicais, são muito variáveis. Por exemplo, a variabilidade do índice de vazios deste tipo de solo pode conduzir a resultados da resistência ao corte e da permeabilidade relativamente distintos. Refere-se ainda que é importante secar o menos possível as amostras de solos residuais tropicais, pois este processo pode implicar a alteração da estrutura do solo (Huat *et al.*, 2012).

2.2 – Ensaio

Na determinação do teor em água do solo, Huat *et al.* (2012) referem que Fookes sugere que se realizem ensaios laboratoriais 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°C e 110°C. Este procedimento pretende ser uma forma de identificar este tipo de água, que faz parte das partículas sólidas, e que não deve ser contabilizado no teor em água.

Existe ainda a sugestão da realização do ensaio de retração em laboratório, já que os solos residuais tropicais tendem a alterar consideravelmente o seu volume aquando da molhagem ou secagem. Ao determinar-se a densidade das partículas, o teor em água do solo deve ser conservado e não deve ser realizado nenhum pré-tratamento, de modo a obter-se valores corretos.

É também importante medir a sucção matricial por ter muita influência na estabilidade da estrutura, na condutividade hidráulica, na resistência ao corte, na rigidez e na variação de volume, tendo-se verificado a existência de resistência adicional ao corte nos solos não saturados devido à sucção (Huat *et al.*, 2012). Esta sucção pode ser medida em laboratório pelo método do papel filtro.

No Quadro 2, indicam-se os ensaios necessários para a classificação MCT, assim como a sua finalidade e os parâmetros medidos.

Quadro 2 – Ensaios realizados para classificação MCT (adaptado de Bastos *et al.*, 2008).

Ensaio/Referência	Finalidade	Parâmetros
Compactação miniatura (mini-Proctor) DNER-ME 228/94	Definir os parâmetros de compactação: teor em água ótimo e peso específico seco máximo	$w_{ótimo}$ (%) e γ_{dmax} (kN/m ³)
Compactação mini-MCV* DNER-ME 258/94	Definir os índices para a classificação MCT	Índices c' , d' e e'
Perda de massa por imersão* DNER-ME 256/94	Definir os índices para a classificação MCT	Perda de massa por imersão (P_i em %)
Mini-CBR e expansão DNER-ME 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 e Villibor (1995)	Avaliar o potencial de contração por secagem	Contração por secagem (em %)
Infiltrabilidade Nogami e Villibor (1995)	Avaliar a velocidade de ascensão capilar	Coefficiente de sorção (em cm/min ^{1/2})

* Ensaios destinados à classificação MCT do solo.

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

Relativamente aos ensaios a realizar *in situ*, refere-se que a distância entre furos de sondagem deve ser pequena, de modo a confirmar o local dos depósitos e espessura (Amu *et al.*, 2011). A revisão bibliográfica realizada indica que: i) o valor $(N_1)_{60}$ correspondente ao SPT é geralmente maior nos solos lateríticos; ii) o CPTU tem pouca aplicação em solos não saturados; iii) há dificuldade de interpretação do PLT nos solos cimentados (Huat *et al.*, 2012). Quanto à sucção matricial, esta pode ser medida *in situ* com tensiómetros.

3 – CARACTERIZAÇÃO DE LATERITES

3.1 – Caracterização física

Na década de 60 do século passado, a classificação litológica dos materiais lateríticos, baseada na cor, dimensão das partículas, grau de concreção e dureza das partículas, era a classificação mais corrente em geotecnia (MOPU, 1959). No entanto, com o evoluir do conhecimento verificou-se que estes aspetos macroscópicos não são suficientes para classificar os materiais lateríticos. Assim, novos parâmetros de caracterização, tais como a expansibilidade e a petrificação, foram introduzidos para uma melhor caracterização destes materiais.

Em termos granulométricos, as laterites apresentam normalmente uma curva muito bem graduada, contendo desde argila a cascalho e até partículas maiores (Bell, 1993).

3.2 – Caracterização mineralógica e físico-química

Uma das condições mineralógicas dos solos lateríticos é a cimentação, que confere estabilidade aos microagregados pela diminuição do volume de vazios, originado pelas fraturas provocadas pelo intemperismo (Martinez, 2003). A cimentação dos solos lateríticos também influencia a compactação, a sucção e o ângulo de atrito. Os solos lateríticos tendem a ser ácidos devido à concentração dos sesquióxidos de ferro e alumínio.

Em geotecnia, a relação molecular $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ é considerada a mais apropriada para classificação físico-química, permitindo distinguir o solo de laterite, do solo laterítico e do solo não laterítico (Quadro 3). Deve salientar-se que esta relação é apenas complementar, não sendo admitida como conclusiva. Segundo Autret (1983), vários autores recomendam ainda uma caracterização baseada nos processos pedogênicos.

Quadro 3 – Classificação físico-química baseada na relação molecular (MOPU, 1959).

Tipo	Relação $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$
Solo de laterite	<1,33
Solo laterítico	>1,33; <2,00
Solo não laterítico	>2,00

3.3 – Caracterização mecânica

Como referido anteriormente, o clima tem um papel decisivo na saturação do solo. Os solos residuais estão normalmente situados acima do lençol freático, daí que não seja comum estarem saturados e, portanto, as pressões neutras negativas desempenham um papel fundamental no seu comportamento mecânico. É de referir que o volume dos solos lateríticos, as suas propriedades hidráulicas e a sua resistência ao corte variam face às variações climáticas. Apresenta-se, de seguida, alguns aspetos do comportamento mecânico dos solos lateríticos, relativos a características não só intrínsecas do material, como a resistência e dureza, mas também a características extrínsecas, como a compactação.

3.3.1 – Resistência ao corte e dureza

Alguns autores afirmam que a resistência ao corte dos solos depende do arranjo das partículas e da cimentação natural dos mesmos (Martinez, 2003). Assim, os ensaios mais utilizados para avaliar a resistência ao corte são os ensaios triaxiais, o CPT, o SPT, os ensaios de corte direto e os ensaios de carga.

Quanto à dureza, as partículas concrecionadas são classificadas como concreções brandas ou duras (MOPU, 1959). As primeiras, ao contrário das concreções duras, desfazem-se por pressão entre os dedos. Segundo Bell (1993), o endurecimento das laterites quando expostas ao ar pode ser devido a uma alteração na hidratação dos óxidos presentes.

3.3.2 – Compressibilidade e sucção

A compressibilidade é a capacidade de um solo se deformar, com diminuição de volume, se submetido a uma força de compressão. Para se avaliar a compressibilidade, realizam-se ensaios edométricos com controlo de sucção (Martinez, 2003). Refere-se que a cimentação típica dos solos lateríticos tende a restringir a compressibilidade.

Quando o solo se encontra não saturado, a pressão da água é igual ou inferior à pressão atmosférica, designando-se sucção. Esta depende da granulometria, estrutura, mineralogia do solo, assim como das trajetórias de molhagem e secagem e pode ser matricial ou osmótica (Martinez, 2003). A sucção matricial é referente à matriz do solo e suas propriedades físicas, sendo uma das componentes do potencial hidráulico do solo não saturado. É devida à ação das forças capilares e de adsorção que surgem da interação da água e das partículas minerais constituintes do solo (Soto, 2004). É uma variável da tensão necessária para definir o estado de tensão nos solos não saturados. Segundo Soto (2004), Jiménez Salas (1993a, b) afirma que a sucção osmótica resulta de os sais em dissolução na água dos poros exercerem uma sucção osmótica para que a água do solo chegue ao estado padrão (água pura).

Segundo Huat *et al.* (2012), é importante ter em conta a influência da sucção matricial na resistência ao corte e na permeabilidade do solo, assim como a sua influência na tensão efetiva.

3.3.3 – Expansibilidade, plasticidade, atividade e limites de consistência

Apesar das laterites e dos 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. De forma geral, a atividade dos solos lateríticos é normalmente muito baixa. Dado que a parte ativa do solo é a principal causa da expansão, é importante determinar a fração argilosa (MOPU, 1959).

Quanto à plasticidade das laterites, esta varia de baixa a média (MOPU, 1959). Ensaio descritos em MOPU (1959) permitiram concluir que quanto maior for a temperatura de secagem, menores serão os valores do limite de liquidez e os valores do índice de plasticidade e que, quando a secagem é realizada à temperatura ambiente, os resultados não são inferiores aos da secagem feita em estufa. Foi ainda concluído, neste estudo, que a remoldagem tem grande influência nos valores dos limites de consistência.

3.3.4 – Compactação

Relativamente à compactação, Blight e Leong (2012) referem a importância da 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 estão ligados à rocha da qual derivaram as laterites. Estes autores afirmam também que a maioria das tecnologias de compactação aplicadas a solos transportados se pode aplicar a solos residuais. Os solos lateríticos que não estão demasiado compactados são os que apresentam bom comportamento mecânico, já que a compactação em demasia conduz à desagregação da estrutura natural do terreno. A compactação excessiva do solo pode dever-se à existência de um teor de água superior ao ótimo durante a compactação ou devido à destruição das partículas grossas por ação mecânica. No entanto, estes efeitos não são exclusivos dos solos lateríticos (MOPU, 1959). Refere-se que alguns autores e engenheiros civis com experiência com solos lateríticos afirmam que a compactação deve ser realizada com o teor em água acima do ótimo neste tipo de solos.

Em síntese, no Quadro 4, apresentam-se as características correntes das laterites. Como se pode constatar pela sua análise, as laterites apresentam normalmente um teor em água, assim como os limites de plasticidade e liquidez, baixos a médios. Verifica-se ainda que algumas laterites apresentam mais argila do que outras, apesar de a atividade da fração argilosa ser quase sempre baixa, como indicado em 3.3.3. Foi também já referido que as laterites são solos cimentados, pelo que os valores de coesão e de ângulo de atrito são elevados, enquanto que a compressibilidade é muito baixa e a resistência à compressão pode atingir valores bastante altos.

Quadro 4 – Características comuns das laterites (Bell, 1993).

Propriedade	Valores correntes
Teor em água (%)	10-49
Limite de liquidez (%)	33-90
Limite de plasticidade (%)	13-31
Fração argilosa (%)	15-45
Peso volúmico seco (kN/m ³)	15,2-17,3
Coesão, c_v (kPa)	466-782
Ângulo de atrito interno, ϕ_v (°)	28-35
Resistência à compressão não confinada (kPa)	220-825
Índice de compressibilidade	0,0186
Coefficiente de consolidação (m ² /ano)	262
Módulo de Young (kPa)	$5,63 \times 10^4$

4 – APLICAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

4.1 – Tipologia de pavimentos

O pavimento rodoviário é um sistema multiestratificado, ou seja, é uma estrutura composta por várias camadas de espessura finita, apoiada numa fundação. Esta estrutura tem como funções principais: i) resistir às solicitações induzidas pelo tráfego e pela temperatura, durante a vida útil do pavimento; ii) fornecer uma superfície que possibilite a circulação dos veículos com garantia de segurança, conforto e sustentabilidade económica e ambiental. A forma como um pavimento flexível responde funcional e estruturalmente depende muito da sua estrutura geométrica e mecânica, isto é, depende do número, da espessura e das características materiais das camadas constituintes, bem como das características da fundação que o suporta. Quanto à tipologia, os pavimentos classificam-se genericamente em flexíveis, rígidos e semirrígidos, existindo ainda os pavimentos constituídos por blocos. As camadas do pavimento devem dispor de qualidade e resistência decrescente, da superfície para o interior do pavimento. Note-se que cabe a cada camada a função de suportar a camada sobrejacente.

Neste artigo pretende abordar-se a questão da utilização de solos lateríticos em pavimentos flexíveis, estruturas constituídas por camadas de desgaste, de regularização, de base e de sub-base apoiadas sobre o leito da fundação. Nos pavimentos flexíveis, as laterites são utilizadas essencialmente como material granular das camadas de base e de sub-base, sendo usual a utilização de seixos lateríticos. Ainda sobre esta tipologia de pavimentos, estes podem ser ou não revestidos. No caso de pavimentos não revestidos não está garantida a impermeabilização das camadas granulares de base e de sub-base dada a inexistência de camadas betuminosas superficiais. Esta situação é particularmente nefasta quando se utilizam solos lateríticos, dado que estes são muito sensíveis a variações do teor em água, como referido anteriormente.

4.2 – Especificações de utilização de laterites em pavimentos flexíveis

O *Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux* (CEBTP, 1984) refere a utilização de seixos lateríticos naturais em camadas de sub-base e de base, para além dos princípios base do dimensionamento. Ainda para a camada de sub-base, este documento menciona os seixos lateríticos tratados com cimento ou com cal.

O *Manuel sur les Routes dans les Zones Tropicales et Désertiques* (BCEOM, 1975) contém quadros síntese, com algumas normas de utilização de laterites africanas em pavimentos (Autret, 1983), que se apresentam nos Quadros 5 a 7.

Quadro 5 – Normas de utilização de laterites africanas em pavimentos (Autret, 1983).

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

Quadro 6 – Normas de utilização de laterites africanas em camadas de sub-base de pavimentos revestidos (Autret, 1983).

	Costa do Marfim	Moçambique	África do Sul	Rodésia do Sul	Rodésia do Norte
Índice de plasticidade	20	12	-	18	25
Índice CBR	30	45	-	-	-
% de finos	20	50	-	-	-

Quadro 7 – Normas de utilização de laterites africanas em camadas de base de pavimentos revestidos (Autret, 1983).

	Costa do Marfim	Moçambique	África do Sul	Rodésia do Sul	Rodésia do Norte
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 OPM	-	-	0,5%	-	-

* OPM - teor em água ótimo do Ensaio Proctor Modificado.

O *Manual de Pavimentação* do DNIT (2006), apesar de não ser um manual específico para laterites, faz referência aos materiais lateríticos e à metodologia MCT. A Norma DNIT 098/2007 apresenta uma especificação de serviço para camadas de base de solo laterítico. Esta norma

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.

Mais recentemente, na *Specification 504 – Asphalt Wearing Course* (MRWA, 2012) da *MAIN ROADS Western Australia* é descrita a utilização de vários tipos de asfalto em camadas de desgaste de pavimentos, que consideram misturas granulares com laterites, assim como algumas recomendações para a sua aplicação.

4.3 – Estabilização de laterites para aplicação em pavimentos flexíveis

A estabilização dos solos é usada para melhorar e estabilizar as características dos mesmos, podendo considerar-se 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 química mais utilizados na área da pavimentação, assim como técnicas mais recentes de melhoria de solos.

4.3.1 – Estabilização com cal

A estabilização com cal pertence à categoria da estabilização química, e trata-se de um dos processos mais antigos de estabilização de solos, que pode ser aplicado tanto em materiais para sub-bases como para bases de pavimento. Refere-se que são a cal hidratada e a dolomite as mais utilizadas normalmente, já que a cal viva é mais perigosa de utilizar (Amu *et al.*, 2011). 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 que são não só imediatas, como permanecem a longo prazo.

Relativamente à percentagem de cal a considerar, Amu *et al.* (2011) realizaram ensaios de resistência em três amostras de um solo laterítico, usando percentagens de cal de 0 a 10%, com o intuito de estudar a sua estabilização com cal. Em duas das amostras, a adição de cal fez com que diminuísse o potencial de expansão, já que esta adição diminui o volume de vazios. Os ensaios de compactação realizados sobre laterites estabilizadas com cal mostraram que o teor em água ótimo é tanto maior quanto maior for a percentagem de cal utilizada, o que pode ser explicado pela quantidade de água adicional necessária para que se deem as reações pozolânicas entre o solo e a cal, que conduzem à estabilização do material. Assim, a percentagem ideal de cal foi definida quando se atingiu o peso específico máximo. Também se constatou, no referido estudo, que os valores do CBR são máximos quando se atinge a percentagem ótima de cal. Amu *et al.* (2011) referem ainda que, para cada tipo de solo existente, existe uma percentagem ótima de cal que deve ser utilizada na sua estabilização: para a maioria dos solos finos e dependendo do seu peso seco, essa percentagem é de 3 a 10%. Neste estudo, verificou-se também que quanto maior o índice de plasticidade do solo laterítico, maior será a diferença entre os valores do CBR do solo não saturado e os valores do CBR do solo saturado, sendo essa diferença bastante superior se o solo não estiver estabilizado, devido à água poder percolar pelos vazios que ainda não estão preenchidos. Foi ainda realizado um ensaio triaxial não drenado e não consolidado, que confirmou que o uso de cal aumenta a resistência ao corte e diminui o ângulo de atrito.

4.3.2 – Estabilização com cimento

Outra técnica de estabilização química dos solos lateríticos é a utilização de cimento. 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 catiões e reações

pozolânicas, que fazem com que a resistência do solo aumente com o tempo. Quando os solos lateríticos podem ser tratados com cimento, deve-se respeitar uma granulometria e plasticidade específicas, no entanto, refere-se que 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.

Os resultados dos ensaios descritos em MOPU (1959) mostraram que, mesmo considerando-se baixas percentagens de cimento, pode obter-se material com boa resistência, e que a redução da resistência, aquando da imersão em água, é inferior nos solos lateríticos. Jaritngam *et al.* (2012) realizaram também investigações com solo-cimento, concluindo que o custo do mesmo é inferior em cerca de 48% ao custo da brita, e que as suas propriedades físicas são influenciadas pelo tipo de solo, quantidade de cimento, quantidade de água, mistura, tempo de cura e compactação. O estudo de Jaritngam *et al.* (2012) confirmou ainda que é apenas necessário 3% de cimento para estabilizar solo-cimento laterítico, o que se traduz em menores custos e menor impacto ambiental. Este material surge então como alternativa sustentável e é apropriado na utilização em camadas de base, já que tem uma elevada resistência ao corte.

4.3.3 – 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.

O tratamento MICP é conseguido devido à biocimentação, que consiste em utilizar bactérias para hidrolisar ureia, resultando iões de carbonato que reagem com uma solução rica em cálcio para dar origem a carbonato de cálcio (calcite), que por sua vez liga as partículas do solo, e reduz a condutividade hidráulica, o que resulta no preenchimento dos vazios e, portanto, no aumento da resistência e rigidez do solo (Cheng *et al.*, 2014). Continuam a ser estudados diversos micro-organismos, para se identificar o mais eficiente para este tipo de estabilização.

Ensaio realizados em solos residuais tropicais melhorados através desta técnica mostraram que esta é eficaz, podendo-se aumentar a resistência ao corte, sendo esse aumento tanto maior quanto maior for a densidade do solo, e diminuindo a condutividade hidráulica em solos residuais, cerca de 50% em média (Soon *et al.*, 2013). Os resultados também sugeriram que a MICP foi desencadeada por microrganismos, mais especificamente por bactérias *bacillus megaterium*, que habitam naturalmente no solo.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos residuais tropicais, que resultam de meteorização avançada, são solos peculiares, de características únicas, o que torna a sua utilização em engenharia civil, em particular nos pavimentos, exigente.

As laterites possuem um pH ácido devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e apresentam, normalmente, uma curva granulométrica muito bem graduada. A cimentação, condição mineralógica das laterites, restringe a sua compressibilidade. Assim, estes materiais geralmente têm baixa expansibilidade, plasticidade e atividade. É ainda de referir a importância da sucção neste tipo de solos, 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 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$. No entanto, 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, verificou-se que as laterites apresentam características muito diversificadas, apesar de apresentarem algumas características comuns, tais como, baixa atividade da fração argilosa, cimentação das partículas constituintes do solo e elevados valores de coesão e ângulo de atrito.

O trabalho de investigação realizado permitiu verificar que há falta de especificações para ensaio e para aplicação de laterites, existindo apenas algumas referências a estes solos, em algumas normas ou manuais, referências insuficientes para lidar com estes solos tão peculiares, dado que não exibem um comportamento que possibilite a aplicação direta da mecânica dos solos clássica de forma correta.

A utilização das laterites em pavimentos parece ser uma alternativa económica e sustentável, para as camadas de sub-base e de base do pavimento. Refere-se a necessidade de registar e estudar os casos de rotura que ocorrem com laterites, de modo a haver melhor compreensão do seu comportamento para que seja mais fácil evitar estes acidentes, prevenindo consequências económicas drásticas e perdas humanas. Os casos já registados apontam para a drenagem inadequada e para o não cumprimento das especificações como causas principais.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor Doutor António Campos e Matos, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, à Doutora Ana Cristina Freire do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e ao Professor Doutor Américo Dimande da Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique, pela disponibilização de documentos e informações relevantes para o trabalho apresentado.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amu, O.O.; Bamisaye; O.F.; Komolafe, I.A. (2011). *The Suitability and Lime Stabilization Requirement of Some Lateritic Soil Samples as Pavement*. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 2(1), pp. 29-46. ISSN 2229 - 6107. Disponível em: www.ijopaasat.in.
- Autret, P. (1983). *Latérites et graveleux latéritiques*. ISTED - LCPC. Paris, França.
- Bastos, C.A.B.; Schmitt, L.A.; Vasconcellos, S.M.; Rabassa, C.M.; Souza, E.W. (2008). *Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul*. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.12, p.59-67. Editora Dunas. http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art6_N12.pdf. ISSN 1677-3047.
- BCEOM (1975). *Manuel sur les Routes dans les Zones Tropicales et Désertiques*. Bureau central d'études pour les équipements d'outre-mer. França. Paris: Ministère de la Coopération.
- Bell, F.G. (1993). *Engineering Geology*. 1ª ed. Department of Geology and Applied Geology University of Natal, Durban, South Africa: Blackwell Scientific Publications. ISBN-10: 0632032235, ISBN-13: 978-0632032235.
- Blight, G.E.; Leong, E.C. (2012). *Mechanics of Residual Soils*. 2ª ed. Leiden: CRC Press / A.A.Balkema. ISBN 9780415621205.
- CEBTP (1984). *Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux*. Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics. França: Ministère des Relations Extérieures Coopération et Développement.

- Cheng, L.; Shahin, M.A.; Cord-Ruwisch, R.; Addis, M.; Haranto, T.; Elms, C. (2014). *Soil Stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into Some Physical and Environmental Aspects*. In: 7th International Congress on Environmental Geotechnics. Melbourne, Australia: Murdoch University and Curtin University. Disponível em: http://researchrepository.murdoch.edu.au/25303/1/soil_stabilisation_by_microbial_induced_calcium_carbonate_precipitation.pdf
- Cook, J.R.; Newill, D. (1988). *The field description and identification of tropical residual soils*. Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils. Singapura: A.A.Balkema. pp. 3-10.
- DNER-ME 228/94 (1994). *Solos – compactação em equipamento miniatura*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro. 14p.
- DNER-ME 256/94 (1994). *Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro. 6p.
- DNER-ME 258/94 (1994). *Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro. 14p.
- DNER-ME 254/97 (1997). *Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro. 14p.
- DNIT IPR-719 (2006). *Manual de Pavimentação*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias Rio de Janeiro. 278p.
- DNIT 098/2007–ES (2007). *Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço*. IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 7p.
- Dutra, S.V.M. (2014). *Estado da Arte sobre a Utilização de Solos Lateríticos em Pavimentos Rodoviários*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.
- Huat, B.B.K.; Toll, D.G.; Prasad, A. (2012). *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering*. Leiden: C.R.C.Press/Balkema. ISBN 9780415457316.
- Jaritngam, S.; Somchainuek, O.; Taneerananon, P. (2012). *An Investigation of Lateritic Soil Cement for Sustainable Pavements*. Indian Journal of Science & Technology. Vol. 5, Issue 11, pp. 3603-3606. Disponível em: <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/30647/26544> . ISSN:0974-6846.
- Jiménez Salas, J.A. (1993a). *Hacia una mecánica de suelos no saturada*. Revista Ingeniería Civil, Vol. 88, 1ª parte, pp. 145-164.
- Jiménez Salas, J.A. (1993b). *Hacia una mecánica de suelos no saturada*. Revista Ingeniería Civil, Vol. 90, 2ª parte, pp. 77-92.
- Martinez, G. (2003). *Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. 291p.
- MOPU (1959). *As Laterites do Ultramar Português*. Ministério das Obras Públicas e do Ultramar Lisboa: Lab. Nacional de Eng.Civil, Lab. de Eng. de Angola (Luanda), Lab. de Ensaios de Materiais e Mecânica dos Solos (Lourenço Marques). Memória.

- MRWA Specification 504 (2012). *Asphalt Wearing Course*. MAIN ROADS Western Australia Australia. Document 04/10112, Issue 14/02/13. Disponível em:
<https://www.mainroads.wa.gov.au/Documents/Specification%20504%20Asphalt%20Wearing%20Course%2014%20Feb%202013.RCN-D13%5E2356947.PDF>
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Editora Vilibor. p.213.
- Soon, N.W.; Lee, L.M.; Khun, T.C.; Ling, H.S. (2013). *Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation*. KSCE Journal of Civil Engineering. Volume 17, Issue 4, pp 718-728.
- Soto, M. (2004). *Comparação entre métodos de imposição e de controlo de sucção em ensaios com solos não saturados*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado.
- Viana da Fonseca, A. (1988). *Caracterização geotécnica de um solo residual do granito da região do Porto*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.