

POROSIDADE DOS SOLOS TROPICAIS DE SUBLEITOS DE VIAS URBANAS

Porosity of tropical soils for subgrade of urban roads

Cassio E. L. de Paiva^a, Driely M. L. Alves^a, Maria Teresa Françoso^a, Irving J. Pizarro Marchena^a

^a Departamento de Infraestrutura e Ambiente / FECFAU, Universidade Estadual de Campinas– Unicamp, Brasil

RESUMO – Nos dias atuais, podem ocorrer inundações nos grandes centros urbanos, conseqüentemente há uma necessidade de reduzir esse escoamento superficial de águas pluviais. Uma solução promissora seria a utilização de pavimentos permeáveis. Este artigo estuda a influência que a água infiltrada pelo pavimento teria na camada superficial de subleito com solo laterítico poroso, considerando suas propriedades hidráulicas e sua capacidade estrutural, num pavimento permeável sem sistema de drenagem. Foram realizados, portanto, ensaios de infiltração de água em diferentes condições: solo no estado natural, com camada subjacente de solo compactado e com camada subjacente de areia compactada. Este artigo tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de melhorar a capacidade de infiltração no subleito com solo tropical poroso em condições naturais, excluindo o processo de compactação em sua superfície ou substituindo o subleito regularizado por uma fina camada de bloqueio, em condição de lençol freático não aflorante.

ABSTRACT – Nowadays, floods can occur in large urban centers. Consequently, it is necessary to reduce the flow of surface water. A promising solution would be the use of permeable pavements. This article studies the influence that the water infiltrated by a permeable pavement without drainage system would have on the subgrade surface layer of porous lateritic soil, considering its hydraulic properties and its structural capacity. For this purpose, water infiltration tests were carried out under different conditions: soil in its natural state, with an underlying layer of compacted soil, and an underlying layer of compacted sand. The main objective of this article is to evaluate the possibility of improving the infiltration capacity of the subgrade with porous tropical soil under natural conditions, by excluding the compaction process on its surface or replacing the regularized subgrade with a thin blocking layer, in a condition of not-outcropping water table.

Palavras Chave – pavimento permeável, subleito viário, solos tropicais, infiltração.

Keywords – permeable pavement, subgrade road, tropical soils, infiltration.

1 – INTRODUÇÃO

A drenagem urbana tem sido projetada com o princípio de escoar as águas provenientes de precipitações, em um período curto de tempo, dos pontos altos para os sistemas de macrodrenagem de fundos de vale. Este tipo de solução transfere muitas vezes a problemática da inundação à jusante, ou seja, para áreas ribeirinhas, com conseqüentes prejuízos sociais, econômicos e ambientais (Gonçalves et al, 2009).

E-mails: cassio@unicamp.br (C. Paiva), drielylancarovici@gmail.com (D. Alves), mteresa@fec.unicamp.br (M. Françoso), ipizarro@iter.ac.cr (I. Marchena)

Com os cenários de inundações urbanas em várias cidades, atualmente há uma preocupação no meio técnico de desenvolver tecnologias que permitam o acréscimo da infiltração de água próxima a área onde ocorreu a precipitação e consequentemente levando à redução do escoamento superficial para outras áreas. Muitos autores têm investigado a utilização de pavimentos permeáveis como solução para minimizar estes problemas. Estes pavimentos permitem a redução do volume do escoamento superficial em comparação aos pavimentos convencionais, privilegiando a infiltração e a retenção da água no subsolo (Jabur, 2015). Essas estruturas buscam compensar na fonte os efeitos da urbanização, ou seja, antes que a água atinja a rede de drenagem urbana, favorecendo os processos hidrológicos alterados durante a urbanização (Acioli, 2005).

A infraestrutura da via urbana é composta por diversas redes subterrâneas, o sistema de drenagem de águas pluviais (composto por meios fios, sarjetas, bocas-de-lobo, canais e galerias) é um dos que apresentam maior dificuldade para sua ampliação ou modificação após implantados, devido aos custos e às interferências que acarretam no meio urbano. Além disso nos pavimentos urbanos a introdução de sistemas subsuperficiais para coleta das águas infiltradas obriga o aprofundamento das bocas de lobo e nas inundações podem apresentar refluxo da água superficial coletada pela boca de lobo para dentro do pavimento.

Existem vários tipos de revestimentos que podem ser considerados permeáveis, destacam-se os mais utilizados tradicionalmente: os blocos de concreto, podendo este ser vazados ou não e o revestimento poroso, denominado como camada porosa de atrito (Jabur, 2015).

Portanto uma solução muito interessante seria que as águas escoantes sobre os pavimentos pudessem se infiltrar no pavimento e no subleito se este fosse permeável.

Porém esta condição favorável não seria possível no Brasil pois, o subleito existente sob qualquer tipo de via precisa por especificações de construção a nível federal, estadual ou municipal passar pela operação de regularização de subleito obrigatoriamente. Através deste serviço construtivo o subleito existente se for seco e estável precisa ser constituído por uma camada de 20 cm de espessura compactada com o solo local. Portanto o solo local é densificado e seus vazios muito diminuídos na faixa de largura da via.

Este artigo analisa as propriedades de infiltração e capacidade de suporte de um solo laterítico poroso, visando sua utilização como subleitos de pavimentos permeáveis com infiltração total sem a operação de regularização. Esta possibilidade não é permitida com as especificações existentes. As propriedades referidas foram obtidas por meio de ensaios de infiltrabilidade e pelo ensaio do Cone de Penetração Dinâmica (DCP) de campo. Trata-se de uma pesquisa inicial exploratória, cujo principal objetivo é verificar se em um subleito tropical poroso poderia ser vantajoso não realizar a compactação em sua superfície, favorecendo a infiltrabilidade de água, ou substituir a camada de solo regularizado do subleito por uma fina camada de bloqueio de areia. Esta solução seria inovadora na atual realidade brasileira, mas, até 80 anos atrás vias urbanas eram construídas com essa técnica. Ressalta-se que este estudo é aplicado em locais onde não ocorrem lençol freático aflorante na superfície do terreno ou no nível da escavação.

2 – PAVIMENTOS URBANOS ANTIGOS DE SÃO PAULO

O objeto de estudo deste artigo busca analisar processo construtivo amplamente utilizado no Brasil nos últimos 60 anos sem qualquer tipo de questionamento sobre sua aplicação em qualquer situação e tipo de pavimento. Portanto de forma a caracterizar a ampla influência americana no Brasil naquela época foram analisadas várias fontes contemporâneas daquele momento até o presente.

Segundo Senço (1964), no início do século XX, no Brasil, o sistema de pavimentação por calçamento com blocos de concreto de pré-moldados ou com paralelepípedos era o mais utilizado, principalmente em vias urbanas. O uso deste tipo de pavimento foi reduzido consideravelmente na medida em que se intensificou a utilização de pavimentos asfálticos e de concreto. No estado de São Paulo, para certos casos, porém, os pavimentos com paralelepípedos ainda têm sido utilizados em

ruas com rampas íngremes com inclinação superior a 8%. O mesmo autor apresenta considerações sobre o dimensionamento de pavimentos de paralelepípedos baseadas em dados obtidos da análise do comportamento de pavimentos antigos (até mais de um século), executados baseados em conhecimentos práticos, “cujo comportamento, nada se pode criticar”. Na Figura 1 é ilustrada a seção típica desses pavimentos para vias urbanas apresentada pelo autor, constituída de uma camada de revestimento de paralelepípedo e base de areia sobre o subleito da via.

Paralelepípedos são blocos de pedra talhados com dimensões médias de 200 x 110 x 110 (mm), assentados sobre camada de areia de 50,0 mm, com juntas entre os blocos de 15 mm e preenchimento com fragmentos pétreos entre 6 e 12 mm. Em alguns casos o espaço das juntas é acabado com impermeabilização com asfalto a quente, atualmente. Pavimento deste tipo tem sido executados em São Paulo em tempos mais recentes apenas em vias com alta inclinação longitudinal, o revestimento de blocos é recoberto com lama asfáltica. Algumas vias em São Paulo até 50 anos atrás ainda apresentavam revestimentos íntegros mesmo com mais de 80 anos de serviço até aquele momento, embora algumas peças já estivessem com sua face exposta ao tráfego muito lisa e escorregadia nos dias de chuva.

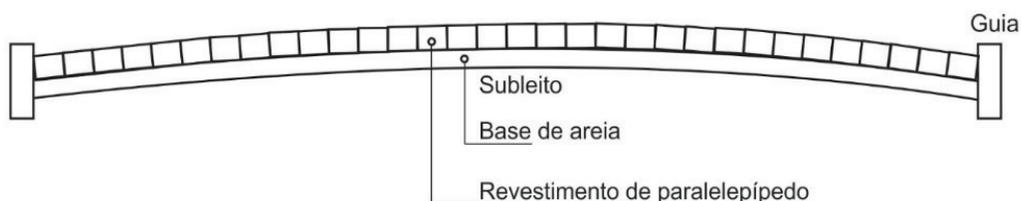


Fig. 1 – Seção típica de pavimentos de paralelepípedo para vias urbanas. Fonte: Senço (1964).

Na cidade de São Paulo, Brasil, ruas e avenidas pavimentadas até cerca de 80 anos atrás eram calçadas com paralelepípedos e sem nenhum sistema de captação para águas pluviais escoantes superficialmente. Posteriormente, os cidadãos exigiram que estas vias fossem revestidas com capas asfálticas para evitar o ruído do tráfego e o desconforto causado pelo trânsito sobre as irregularidades superficiais típicas dos calçamentos. Esta solução, calçamento recoberto por capa asfáltica, se mostrou adequada para a grande maioria das antigas vias urbanas. Porém várias ruas precisaram ser reconstruídas devido a sua estrutura ser inadequada ao tráfego futuro previsto naquele momento e



Fig. 2 – a) Guia e sarjeta convencional para condução de vazões superficiais e (b) guia e faixa lateral de infiltração das águas no subleito.

nesta nova situação receberam sarjetas laterais de concreto (Figura 2), como todas novas vias construídas em São Paulo. Porém, algumas ruas com calçamento em paralelepípedos após serem recobertas com capas asfálticas ainda mantiveram a largura da sarjeta sem revestimento para facilitar a infiltração das águas superficiais (Figura 2).

Cinco ruas locais do bairro de Pinheiros em São Paulo são uma exceção pois não foram revestidas com capas asfálticas (Figura 3). Porque estão situadas numa área plana devido à prévia utilização em todo terreno como campo hípico. Foram pavimentadas na década de 40 do século passado com um pavimento semelhante ao da Figura 1 por ocasião da construção de vários prédios residenciais baixos, agora tombados. Estas vias planas atualmente não ficam inundadas quando chove mais intensamente pois ocorre plena infiltração no subleito apesar de não possuírem nenhum sistema de captação de águas pluviais superficiais. O subleito destas vias ficou na sua condição natural e permite esta infiltração.

A observação deste fato motivou esta pesquisa e a preocupação se houve alguma perda de tecnologia de antigo processo construtivo anteriormente consagrado e de sucesso até cerca de 60 anos atrás, pela sua substituição pura e simples por critério estrangeiro considerado melhor apenas por ser mais moderno.



Fig. 3 – Aspecto do pavimento em paralelepípedos de ruas localizadas no bairro de Pinheiros em São Paulo: a) Rua Navarro de Andrade; b) cruzamento entre as Ruas Navarro de Andrade e Simão Álvares (dez/2020).

Nas áreas indicadas na Figura 3, há ocorrência de solo predominantemente fino e de comportamento laterítico na profundidade até 1,5 m. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características deste solo: granulometria, classificação MCT, classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), classificação AASHTO e algumas propriedades índices. A classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993), de origem norte-americana, considera que estes solos (grupo A-7-6) apresentam um comportamento de sofrível a mau como subleito.

Tabela 1 – Características do solo de subleito encontrado no bairro de Pinheiros em São Paulo, Brasil.

Granulometria				Classificação			Propriedades índices		
Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	MCT	SUCS	AASHTO	Índice de grupo (IG)	Limite de Liquidez (LL)	Índice de Plasticidade (IP)
49	10,6	34	6,3	LG'	CL	A-7-6	5	43,57%	21,29%

Esta situação é intrigante e suscita algumas questões:

- Por que estas vias urbanas não foram revestidas com capas asfálticas como todas as outras da cidade? Porque são planas e como não dispõe de sistema de captação de águas pluviais, nos períodos de chuva as águas se infiltram totalmente.
- Como um subleito de solo fino permite a infiltração? Porque é de solo tropical poroso e não sofreu regularização. Foi esta constatação que gerou a ideia deste artigo.
- Estas ruas só apresentam tráfego local e sem trânsito de caminhões pesados devido a sua utilização residencial em edifícios tombados que impedem a construção de altas construções e evitam seu tráfego de obra decorrente.

Durante e após a Segunda Guerra Mundial os subleitos dos pavimentos passaram a sofrer compactação (ou densificação) superficial visando reduzir a compressibilidade, aumentar a resistência, controlar as características de mudança de volume, diminuir a permeabilidade, controlar as propriedades de resiliência e reduzir a suscetibilidade ao gelo e fornecer uma condição de fundação satisfatória principalmente devido ao aumento das cargas por eixo dos veículos mais pesados (Brabston, 1981).

No Brasil, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), a fundação do pavimento é tradicionalmente preparada pela execução da regularização do subleito conforme a especificação técnica do DNIT 137/2010-ES em geral com a compactação do solo do próprio subleito.

No Brasil, os solos lateríticos encontram-se distribuídos em quase todo o território, sendo parte da camada mais superficial das zonas bem drenadas, sua espessura pode atingir mais de 2 metros, porém raramente ultrapassa 10 metros (Nogami e Villibor, 1981). Cabe ressaltar suas propriedades mecânicas e hidráulicas em seu estado natural e em seu estado compactado. No estado natural, são altamente permeáveis, com baixa capacidade de suporte, elevada deformabilidade, excelentes condições de drenagem e predispostos ao colapso quando submetido a determinadas cargas (Ramires, 2010). Quando devidamente compactados adquirem alta capacidade de suporte e baixa perda de resistência, mesmo na presença de água, no entanto sua permeabilidade é reduzida substancialmente (Delgado, 2007).

A capacidade de infiltração de água em solos finos tropicais porosos nas condições naturais é principalmente avaliada com finalidades agrícolas. Alguns valores disponíveis são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da taxa de infiltração em solo lateríticos finos

Local	Taxa de infiltração (cm/s)	Textura do solo	Fonte
Índia	5,83.10 ⁻⁴	Argila arenosa	Borkar et al (2018)
Indonésia	1,39.10 ⁻³	Argila arenosa	Askari et al (2008)
Indonésia	5,56.10 ⁻⁴	Argiloso	Askari et al (2008)
Porto Rico	2,63.10 ⁻³ a 6,68.10 ⁻³	Argiloso	Bonnet e López (1952)

3 – ESTUDO DESENVOLVIDO

O estudo foi desenvolvido para responder as seguintes questões:

- Caso ocorresse infiltração em solos naturais porosos, seria significativa?
- Seria interessante manter um subleito poroso nas suas condições naturais para permitir infiltração?
- Caso o subleito poroso apresentasse baixa resistência como poderia ser protegido contra uma camada granular pétreia superposta?

- A constante infiltração de água poderia alterar as condições naturais da camada porosa quanto a sua resistência ou capacidade de permitir infiltração.

O estudo de campo desenvolvido foi realizado através de ensaios de campo de infiltração e resistência a penetração em solos tropicais, a fim de estudar a influência que a água infiltrada tem na camada superficial do solo do subleito em pavimentos permeáveis sem sistema de drenagem de pavimento, nas condições compactada e natural.

Este estudo foi desenvolvido em quatro fases:

- 1ª fase – avaliação “in situ” da resistência do solo de subleito e da capacidade de infiltração em diferentes condições;
- 2ª fase – avaliação “in situ” da resistência e da capacidade de infiltração do solo de subleito protegido por areia superposta em diferentes estados de compactação;
- 3ª fase – avaliação “in situ” da resistência e da capacidade de infiltração do solo de subleito protegido por areia compactada a 91% PN e na umidade ótima.
- 4ª fase -avaliação em laboratório da capacidade de infiltração do solo em diferentes estados de compactação.

A presente investigação foi desenvolvida na Unicamp, no campus Zeferino Vaz, em Campinas/Brasil. O município de Campinas está localizado no estado de São Paulo, a noroeste da capital, a uma distância aproximada de 100 km, situado entre os meridianos 47° 15' e 46° 45'W e os paralelos 22° 40' e 23° 00'S.

As classes pedológicas dos latossolos (vermelhos e vermelho-amarelos) e argissolos (vermelhos e vermelho-amarelos) são as principais ocorrentes na área de estudo. A fim de avaliar o comportamento do solo superficial do subleito, foi utilizado um solo com características conhecidas, estudado extensivamente por Gon (2011) e classificado como: argilosa silto-arenosa até 1 metro de profundidade e areia argilosa entre 1 e 8 metros de profundidade, com alto teor de óxidos de ferro e alumínio, resultando em solo laterítico característico de cor avermelhada. Na Tabela 3 são apresentados os índices físicos do solo estudado por Gon (2011).

Tabela 3 – Índices físicos e propriedades do solo estudado obtido por Gon (2011).

Material	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	e	n (%)	Sr (%)	Proctor Normal	
							$\gamma_{d max}$ (kN/m ³)	h _o (%)
Solo	14,10	30,40	28,30	1,77	64,00	48,40	15,6	24,95

onde γ_{nat} é o peso específico natural; γ_s é o peso específico dos sólidos; w é a umidade natural; e é o índice de vazios; n é a porosidade; Sr é o grau de saturação; $\gamma_{d max}$ é o peso específico aparente seco máximo e h_o é a umidade ótima.

De acordo com a análise granulométrica realizada por Gon (2011), entre zero e um metro de profundidade, o solo estudado possui a seguinte distribuição: 47,4% de areia, 26,5% de argila e 26,1% silte. O solo foi catalogado como de alto grau de resiliência (Tipo III), de acordo com a classificação proposta por Preussler e Pinto (1982), que avaliam os critérios de resiliência do solo. Esta classificação sugere que dependendo da porcentagem de silte presente na fração total do solo (que passa pela peneira de n° 200) e do CBR do material, a propriedade resiliente do solo varia em três categorias, baixo, médio e alto grau de resiliência, portanto este solo não seria um bom subleito viário. Apesar da classificação desaconselhar sua utilização como subleito de pavimento a pesquisa foi desenvolvida para analisar seu desempenho como camada de suporte permeável.

a) Estudos de infiltração

Para o estudo os ensaios foram executados em três locais na mesma encosta de uma colina do campus de Campinas da Unicamp, pois as escavações não poderiam ser executadas uma ao lado da outra pelo tamanho da intervenção e impedimento da prefeitura do Campus.

Local 1, está localizado em frente ao prédio da Faculdade de Engenharia Civil, na Rua Saturnino de Brito, n° 224.

Local 2, situado atrás do prédio da Rádio e TV Unicamp (RTV), na Avenida Albert Einstein, n° 901.

Local 3 está localizado atrás do prédio de salas de aulas da Faculdade de Engenharia Civil.

Os testes foram realizados entre zero e um metro de profundidade na superfície, eliminando a camada vegetal. Nos locais 2 e 3 nos dois primeiros furos foram reproduzidas as mesmas condições que no local 1 ou seja, o primeiro furo ficou nas condições naturais e o segundo furo suas paredes laterais foram protegidas da água pelo tubo camisa de PVC, para garantir que as condições de ensaios eram semelhantes.

A denominação dos furos seguiu a seguinte convenção: F1n, representam furos do primeiro local, F2n do segundo e F3n do terceiro local.

Na 1ª fase do estudo, foram executados quatro furos, conforme ilustrado na Figura 4, com as seguintes condições: Furo F11 – solo em seu estado natural; Furo F12 – paredes impermeabilizadas com tubo de PVC e fundo com solo em seu estado natural; Furo F13 – paredes impermeabilizadas com tubo de PVC e fundo compactado, sendo utilizadas as energias Proctor Modificado (Local 1) e Proctor Normal (Local 2 e 3); Furo F14 – paredes impermeabilizadas com tubo de PVC e fundo com solo em seu estado natural com a presença de uma camada de areia sobreposta compactada na energia Proctor Normal. Ressalta-se que o F11 foi realizado apenas para avaliar as condições existentes no local do ensaio, sendo determinadas as propriedades de CBR, densidade e teor de umidade do solo na mesma profundidade dos demais furos. Portanto, para o F11 não foi realizado o ensaio de infiltração.

As condições de ensaio em cada furo estão sintetizadas na Tabela 4.

A taxa de infiltração foi determinada por meio de leituras com régua graduada em milímetros, utilizando um ponto de referência na borda do tubo de PVC. Três litros de água foram adicionados, esperando que as primeiras leituras estivessem associadas à infiltração, até conseguir teoricamente a saturação da área do solo sujeita ao ensaio. Neste estágio de saturação, era esperado que as leituras para um mesmo período de tempo resultassem em taxas de infiltração aproximadamente constantes. Imediatamente após a infiltração da água, amostras indeformadas de solo foram coletadas no fundo dos furos, utilizando cilindros metálicos de volume conhecido para determinar a densidade e umidade do solo no laboratório, conforme ilustrado na Figura 5.



Fig. 4 – Furos no Local 2.

Tabela 4 – Descrição das condições de ensaio em cada furo na fase 1

Furo nº	Descrição	Propriedades determinadas
F11	Furo com paredes e fundo em estado natural. Utilizado para determinar as condições do solo em seu estado natural a uma profundidade de 200 mm.	Densidade in situ, umidade e resistência a penetração
F12	Furo com fundo de solo natural e paredes encamisadas com tubo de PVC (visando a sua impermeabilização lateral) A infiltração de 3 litros de água ocorre apenas na área exposta do solo em seu estado natural no fundo do furo.	Infiltrabilidade, resistência à penetração e densidade
F13	Furo com profundidade inicial de 350 mm. Fundo com três camadas de 50 mm com o mesmo material (solo antes retirado) compactado na energia Proctor Normal (local 2 e 3) e Proctor Modificado (local 1). As paredes foram encamisadas com tubo de PVC, visando a sua impermeabilização e garantindo a infiltração de 3 litros de água apenas na área exposta do solo compactado no fundo do furo.	Infiltrabilidade, resistência à penetração e densidade
F14	As paredes foram encamisadas com tubo de PVC, visando a sua impermeabilização e impedindo o fluxo lateral. Posteriormente acrescentou-se uma camada de areia com 100 mm, compactada na energia Proctor Normal. Adicionaram-se 3 litros de água até garantir a infiltração da totalidade do líquido na área exposta do solo em estado natural no fundo do furo	Infiltrabilidade, resistência à penetração e densidade



Fig. 5 – Equipamento utilizado para coleta das amostras indeformadas de solo.

b) Avaliação da resistência à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada através do penetrômetro DCP. As leituras de penetração foram realizadas para um total de 15 golpes. O índice de penetração foi então relacionado com a resistência do solo por meio de equações que permite estimar de forma indireta o Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme Equação 1. Segundo Garcez (2010), o modelo adotado geralmente para relacionar o índice de penetração (DN) e o CBR é o apresentado na equação seguinte:

$$\log(CBR) = a - b \log(DN) \quad (1)$$

onde DN é o índice de penetração (mm/número de golpes); “a” e “b” são constantes determinadas experimentalmente. Neste trabalho adotaram-se os valores $a = 2,56$ e $b = 1,16$ na equação (1) adequados no estudo de solos com presença de argilas (Cunha et al., 2002).

c) Segunda fase do estudo: infiltração e resistência dos furos com areia em diferentes níveis de compactação

Esta fase compreendeu na investigação mais detalhada do furo F14 realizado na 1ª fase do estudo, quando a camada de areia é compactada em diferentes graus de compactação.

Portanto previamente, em laboratório, a areia foi submetida ao ensaio de compactação (ABNT NBR 7182:2016) utilizando a energia Proctor Normal (PN) para a determinação da massa específica aparente máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima (h_o).

No Local 3, foram executados 6 furos, sendo: F21 e F22 executados conforme os dois primeiros furos da 1ª fase; F23, F24, F25 e F26 furos com camada de areia com grau de compactação (GC) de 91%, 93%, 98% e 105%, respectivamente, em relação ao $\gamma_{dm\acute{a}x}$ da areia obtida em laboratório. Diferente dos furos F14 da 1ª fase, a areia foi umedecida na sua umidade ótima (h_o).

Em função do resultado da capacidade de infiltração obtida no furo F23 no qual a areia está compactada num grau de 91% PN, foi desenvolvida a terceira fase para se obter repetição deste resultado. Nesta condição de compactação o furo apresentou uma taxa de infiltrabilidade próxima à do solo sem areia e no estado natural (F12).

d) Terceira fase do estudo: reprodutibilidade do furo com areia compactada com GC = 91%

Foram realizados 5 furos, sendo: F31 e F32 executados conforme os dois primeiros furos da 1ª fase; F33, F34 e F35 compactados com GC = 91% (3 repetições).

A determinação das taxas de infiltrabilidade e da resistência do solo foram realizadas conforme descritos na 1ª fase.

e) Quarta fase do estudo: infiltrabilidade versus densidade do solo compactado

Com amostras de solo coletadas no Local 3, foram moldados 5 corpos de prova (CPs) com diferentes energias de compactação, utilizando como molde os tubos de PVC usados nos ensaios in situ descritos. Os graus de compactação analisados foram: 71%, 77%, 85%, 95%, 97% e 100%, todos com o mesmo teor de umidade.

Para obter os graus de compactação referidos, foram utilizados os dados obtidos por Gon (2011), apresentados na Tabela 1 ($\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,6 \text{ kN/m}^3$ e $h_o = 24,95\%$).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Propriedades obtidas dos ensaios de campo: 1ª, 2ª e 3ª fase

A fim de facilitar a análise a relação da capacidade drenante e resistência a penetração dos furos em diferentes condições, a seguir são agrupados os resultados obtidos para cada condição avaliada.

Na Tabela 5 são apresentados os dados obtidos nos furos executados exclusivamente para a avaliação das condições existentes no local do ensaio, sendo eles o primeiro furo da 1ª, 2ª e 3ª fase (F11, F21 e F31). Ressalta-se que nos furos referidos não foi realizado o ensaio de infiltração. São apresentados os dados de teor de umidade (h_c), densidade (γ_d) e resistência CBR obtidos no fundo dos furos.

Pode-se observar que não houve variação significativa do teor de umidade natural do solo entre as três fases analisadas. No entanto, quanto ao CBR e densidade esta variação foi mais significativa, resultando em um CBR mínimo de 5,3% e máximo de 14,5%. O valor mínimo obtido do CBR é próximo do resultado do ensaio convencional de laboratório CBR neste solo compactado na energia normal.

Tabela 5 – Furos de avaliação das condições existentes no local do experimento (furo não submetido à infiltração)

Furo nº	hc (%) substrato	γ_d substrato (kN/m ³)	CBR (%)
F11	22,0	13,970	13,9
F21	23,8	13,980	5,3
F31	24,8	14,451	14,5
Valor mínimo	22,0	13,970	5,3
Valor máximo	24,8	14,510	14,5
Valor médio	23,5	14,153	11,2

Os ensaios de compactação em laboratório realizados por Gon (2011), determinaram que a umidade ótima do solo estudado a uma profundidade não maior que 1 metro é de 24,95% (na energia Proctor Normal). Nota-se que no local onde foi realizado os furos da 3ª fase, o solo apresentava teor de umidade próximo à umidade ótima para a energia PN.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nos furos encamisados com PVC e submetidos à infiltração de água diretamente sobre o solo do local, ou seja, o segundo furo da 1ª, 2ª e 3ª fase (F12, F22 e F32). Para análise da influência da água na densidade e resistência CBR do solo, são também indicados os valores das propriedades do solo obtidas antes do furo ter sido submetido ao ensaio de infiltração (conforme apresentado na Tabela 10), ou seja, quando o solo se encontrava em sua condição natural. No furo F32, não foi determinada a resistência do substrato após a infiltração de água, pois o objetivo da 3ª fase do estudo era apenas obter a reprodutibilidade dos resultados dos furos com areia com grau de compactação de 91%.

Tabela 6 – Furos com fundo de solo em seu estado natural

Furo nº	Condição natural			Taxa de infiltração (cm/s)	Após infiltração		
	γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)		γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)
F12	13,970	22,0	13,9	$3,34 \cdot 10^{-3}$	14,205	26,3	6,1
F22	13,980	23,8	5,3	$1,70 \cdot 10^{-3}$	13,770	35,0	4,3
F32	14,510	24,8	14,5	$6,71 \cdot 10^{-4}$	-	-	-
Valor mínimo	13,970	22,0	5,3	$6,71 \cdot 10^{-4}$	13,770	26,3	4,3
Valor máximo	14,510	24,8	14,5	$3,34 \cdot 10^{-3}$	14,205	35,0	6,1

Para a condição apresentada na Tabela 6, a taxa de infiltração variou de 10-3 cm/s a 10-4 cm/s. Os valores obtidos estão na faixa de valores obtidos em outros ensaios realizados em solos finos lateríticos. Observou-se uma perda de 50% da capacidade de suporte CBR média do solo após a infiltração de água, condição típica já observada nas medições de CBR em corpos de provas não imersos e imersos, conforme apontado no estudo de Pandey e Agarwal (2019). Cabe ressaltar que o solo tropical laterítico, como o estudado, tende naturalmente a formar estruturas bem acomodadas, proporcionando sua resistência ao longo do tempo. No entanto, esta estrutura pode apresentar baixa capacidade de resistência quando em presença de água. Ressalta-se porém o bom comportamento do pavimento flexível da rua Saturnino de Brito na UNICAMP, próximo aos locais estudados, esta via com pavimento urbano e tráfego local (automóveis e poucos caminhões) não apresenta necessidade de manutenção a mais de 20 anos.

Tabela 7 – Furos com camada de areia compactada em diferentes graus de compactação.

Furo nº	GC (%)	Condição natural			Taxa de infiltração (cm/s)	Após infiltração		
		γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)		γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)
F14	Compactação não controlada	13,970	22,0	13,9	$1,96 \cdot 10^{-3}$	15,070	25,2	7,4
F23	91	13,980	23,8	5,3	$1,69 \cdot 10^{-3}$	14,250	33,9	10,1
F24	93	13,980	23,8	5,3	$4,51 \cdot 10^{-4}$	14,870	31,4	10,9
F25	98	13,980	23,8	5,3	$1,27 \cdot 10^{-4}$	13,150	25,8	11,4
F26	105	13,980	23,8	5,3	$3,69 \cdot 10^{-5}$	14,660	25,3	10,2
Valor mínimo	-	13,970	22,0	5,3	$3,69 \cdot 10^{-5}$	13,150	25,2	7,4
Valor máximo	-	13,980	23,8	13,9	$1,96 \cdot 10^{-3}$	15,070	33,9	11,4
Valor médio	-	13,978	23,4	7,0	$8,53 \cdot 10^{-4}$	14,400	28,3	10,0

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos para os furos ensaiados com uma camada de areia sobre o substrato do terreno. Esta condição foi realizada no furo 4 da 1ª fase (F14) onde a areia não foi compactada e nos furos da 2ª fase (F23, F24, F25 e F26, exceto o furo F21). Ressalta-se que os dados indicados se referem ao substrato (superfície do solo local onde a camada de areia foi apoiada).

Quanto à capacidade de suporte do solo, observou-se um aumento do valor do CBR após a infiltração de água nos furos onde a camada de areia foi compactada. Este fato pode ser atribuído à compactação indireta que o substrato recebeu no processo de compactação da camada de areia sobrejacente.

Conforme o esperado, verificou-se que com o aumento do grau de compactação, menor foi a taxa de infiltração obtida. Dos furos analisados, a infiltração da camada foi reduzida em 100 vezes quando o grau de compactação da camada foi de 91% para 105% (PN). Outro fator importante observado foi que para o grau de compactação de 91%, a taxa de infiltração foi similar à obtida no furo sem areia, apenas com solo na condição natural (F22).

Na 3ª fase do estudo, foram analisados furos com areia com grau de compactação de 91%. No entanto, nessa fase a taxa de infiltração foi 10 vezes inferior ao obtido na 2ª fase (F23), conforme sintetizado na Tabela 8. Quanto à capacidade de suporte CBR, nos furos da 3ª fase observou-se uma perda do CBR do substrato após a infiltração de água.

Tabela 8 – Furos com fundo de areia compactada com grau de compactação de 91%

Furo nº	Antes da infiltração			Taxa de infiltração (cm/s)	Após infiltração		
	γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)		γ_d substrato (kN/m ³)	hc (%) substrato	CBR (%)
F23	13,980	23,8	5,3	$1,69 \cdot 10^{-3}$	14,250	33,9	10,1
F33	14,510	24,8	14,5	$3,27 \cdot 10^{-4}$	15,200	28,9	10,2
F34	14,510	24,8	14,5	$3,73 \cdot 10^{-4}$	15,270	23,8	12,7
F35	14,510	24,8	14,5	$5,06 \cdot 10^{-4}$	15,410	28,8	6,5
Valor mínimo	13,980	23,8	5,3	$3,27 \cdot 10^{-4}$	14,250	23,8	6,5
Valor máximo	14,510	24,8	14,5	$1,69 \cdot 10^{-3}$	15,410	33,9	12,7
Valor médio	14,378	24,6	12,2	$7,24 \cdot 10^{-4}$	15,033	28,9	9,9

4.2 – Propriedades obtidas dos ensaios em laboratório: 3ª fase

Na investigação da influência da densidade da camada de solo na taxa de infiltrabilidade, foi constatado o mesmo comportamento obtido para a areia: quanto maior a densidade da camada, menor foi a taxa de infiltração. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9 e ilustrados na Figura 6.

Tabela 9 – Massa específica aparente seca e taxa de infiltração do solo compactado.

4ª fase – Solo compactado		
CP nº	Condição	Taxa de Infiltração (cm/s)
CP 1	$\gamma_d = 11,44 \text{ kN/m}^3 (GC = 71,5 \%)$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
CP 2	$\gamma_d = 12,48 \text{ kN/m}^3 (GC = 77,9 \%)$	$4,13 \cdot 10^{-3}$
CP 3	$\gamma_d = 13,72 \text{ kN/m}^3 (GC = 85,7 \%)$	$8,03 \cdot 10^{-4}$
CP 4	$\gamma_d = 15,28 \text{ kN/m}^3 (GC = 95,5 \%)$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
CP 5	$\gamma_d = 15,61 \text{ kN/m}^3 (GC = 98,0 \%)$	$3,55 \cdot 10^{-6}$

γ_d – massa específica aparente seca da camada de areia
GC – grau de compactação
ho – umidade do solo

Os intervalos de densidades dos CPs analisados compreenderam estados de densidade abaixo da densidade do solo natural até a densidade obtida para um grau de compactação próximo a 100% (PN) (grau de compactação exigido nas especificações técnicas para a regularização do subleito).

Comparando os CPs de menor e maior densidade, verifica-se que a taxa de infiltrabilidade apresentou uma redução em 1000 vezes.

Como parte da análise da capacidade de drenagem do solo em estudo, foi utilizada a classificação da qualidade da drenagem dos pavimentos adotada pela AASHTO (1993). Para tanto, foi considerada a chuva máxima diária de 145 mm, registrada nos últimos 20 anos no Município de Campinas, segundo dados disponibilizados pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIAGRO, 2016) e então estimado o tempo de infiltração para a chuva máxima. Na Tabela 10 são apresentados os tempos de infiltração obtidos no cenário hipotético, em que toda a água da chuva é infiltrada pelo solo, para os furos da 1ª Fase e corpos de prova da 4ª Fase.

De acordo com a classificação da qualidade de drenagem dos pavimentos da AASHTO (1993), comparando os resultados da 1ª fase dos estudos, os furos apenas com solo em seu estado natural apresentaram qualidade de drenagem considerada “excelente”; os furos com camada de areia compactada foram classificados como de “boa” qualidade, no entanto com valores próximos aos classificados como “excelente”; os furos com camada compactada de solo foram classificados como de “boa” qualidade e em um dos locais chegando a “médio”. Ressalta-se que o furo com areia (F14) e o furo com fundo apoiado no substrato (F12) apresentaram taxa de infiltrabilidade com mesma ordem de grandeza.

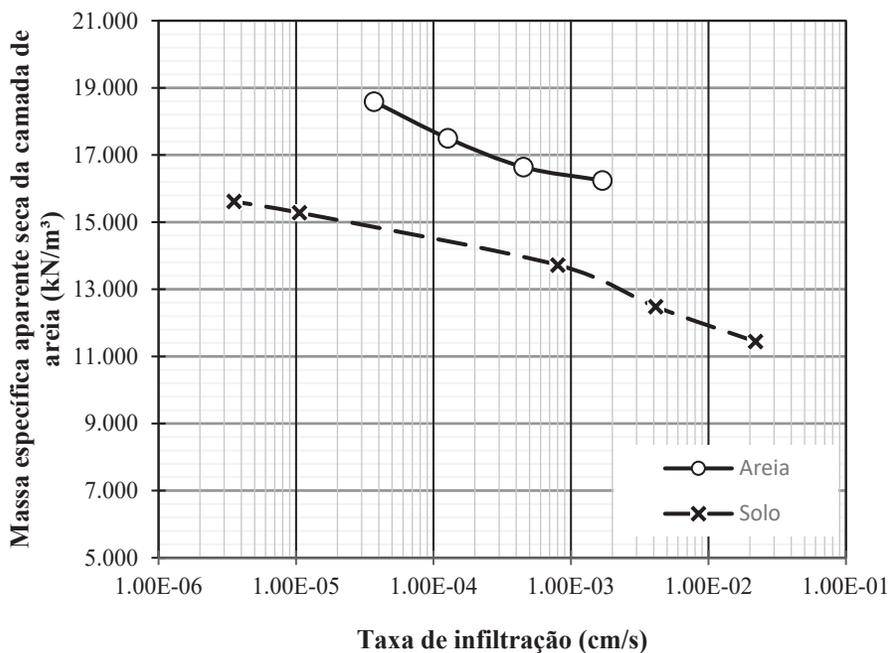


Fig. 6 – Gráfico da massa específica aparente seca da camada de areia x taxa de infiltração. Dados obtidos do Local 3 – 2ª fase (areia) e laboratório (solo).

Quanto aos corpos de prova com solo compactado, em função do tempo de infiltração necessário foram classificados como “excelente” aqueles com densidade próxima à do solo natural e “muito pobre” quando compactado com 98% da massa específica máxima do solo.

Tabela 10 – Tempo de infiltração calculado para uma chuva máxima de 145 mm: Furos da 1ª Fase e corpos de prova da 4ª Fase do estudo.

Furos – 1ª fase				Solo - laboratório		
Furo nº	Condição	Taxa de infiltração (cm/s)	Tempo de infiltração	CP nº	Taxa de infiltração (cm/s)	Tempo de infiltração
F12	Solo em estado natural	$3,34 \cdot 10^{-3}$	1,41 horas	CP 1	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,18 horas
F13	Três camadas do mesmo solo compactadas	$3,02 \cdot 10^{-4}$	8,36 horas	CP 2	$4,13 \cdot 10^{-3}$	0,98 horas
F14	Camada de areia compactada (PN)	$1,96 \cdot 10^{-3}$	2,31 horas	CP 3	$8,03 \cdot 10^{-4}$	5,01 horas
				CP 4	$1,06 \cdot 10^{-5}$	15,87 dias
				CP 5	$3,55 \cdot 10^{-6}$	47,29 dias

5 – CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste estudo não se pretendeu contestar o desenvolvimento tecnológico de engenharia necessário para um adequado projeto e construção de fundação de pavimento. Mas contestar a obrigação atual de sempre forçar o projeto e a construção de uma fundação impermeável ou quase. Certamente é possível desenvolver um projeto de engenharia que possa manter um subleito tropical poroso nas suas condições naturais protegido adequadamente das cargas veiculares permitindo a infiltração de vazões infiltradas no pavimento se esse for o desejo do projetista ou do construtor do pavimento. Para isto é necessário rever a especificação existente de regularização do subleito.

Houve perda de processo construtivo consagrado e de sucesso que executava pavimentos adequados ao tráfego de 80 anos atrás, ou seja, não pesado e nem intenso, provavelmente por ser origem totalmente empírica. Porém se mantidas as condições originais de tráfego estes pavimentos ainda funcionam bem após 80 anos com tráfego local composto por veículos leves e comerciais sem excessivo peso e com plena infiltração de toda chuva precipitada. Na atual situação climática com chuvas cada mais intensas se deveria estimular o estudo de soluções de engenharia que pudessem recuperar o antigo processo construtivo e adaptá-lo plenamente às condições tecnológicas atuais. Caso se dispusesse de um subleito permeável, seria possível a concepção de uma estrutura de pavimento com todas camadas permeáveis e plena infiltração das águas no subleito.

Sobre os objetivos propostos neste estudo, conclui-se que para os solos estudados:

- Nas condições naturais o solo poroso permite infiltração significativa.
- Dificuldade de manter o solo laterítico poroso do subleito em sua condição natural (sem compactação). Apesar das maiores taxas de infiltração terem sido obtidas para os furos que simularam esta condição, a infiltração da água reduziu a capacidade de suporte do solo do subleito, como era de se esperar.
- Quanto à influência da compactação do próprio solo da superfície do subleito, como já é conhecido, verificou-se um aumento da capacidade de suporte do solo após compactado. Essa diferença passa a ser mais expressiva quando é aumentada a energia de compactação aplicada. No entanto, nestes casos a taxa de infiltração do solo decresce consideravelmente. Esta alternativa é favorável sob o ponto de vista estrutural (considerando a capacidade de suporte do solo) e desfavorável quanto às propriedades hidráulicas necessárias para subleito de pavimentos permeáveis;
- Verificou-se que pode ser considerada mais vantajosa a solução com utilização do subleito com solo natural sem compactação e a substituição da regularização do subleito pela proteção de uma camada de bloqueio constituída de areia compactada. Esta condição apresentou maior equilíbrio entre as propriedades hidráulicas e mecânicas desejadas, ou seja, houve um aumento razoável da capacidade de suporte do solo e pequena diminuição de sua taxa de infiltrabilidade.

Portanto seria viável em vias urbanas com previsão de tráfego local situadas sobre subleito poroso tropical o projeto e a construção de pavimento permeável sem que o subleito sofresse a sua regularização, mas fosse protegido por camada de bloqueio compactada, assim como as vias existentes observadas em funcionamento adequado a 80 anos.

6 – REFERÊNCIAS

- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Acioli, L.A. (2005). *Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 145p.

- Askari, M.; Setiawan, B.I.; Tanaka, T.; Saptomo, S. K. (2008). *Infiltration characteristics of tropical soil based on water retention data*. 水文・水資源学会誌, 21(3), pp. 215-227.
- Bonnet, J.A.; López, M.L. (1952). *The rate of infiltration of lateritic soils*. The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico, 36(2), pp. 161-166.
- Borkar, V. S.; Gokhale, N. B.; Dhopavkar, R. V.; Khobragade, N. H.; More, S. S.; Kasture, M. C. (2018). *Distribution of nutrients in different soil types in Konkan region of Maharashtra*. Int. J. Chem. Stud, 6(1), pp. 275-279.
- Brabston, W. N. (1981) *Investigation of Compaction Criteria for Airport Pavement Subgrade Soils*. No. WES/TR/GL-81-11. Army Engineering Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.
- CIIAGRO (2016). *Média mensal de chuva para o Município de Campinas*. Acessado em <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>> em 14/10/2016.
- Cunha, J.P.A.R. da; Vieira, L.B.; Magalhães, A.C. (2002). *Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água*. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.10, n.1-4, pp.1-7.
- Delgado, A. K. C. (2007). *Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária*. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, 341p.
- Garcez, A. (2010). *Contribuição para a melhora do desempenho dos pavimentos urbanos através do controle de qualidade do reaterro de valas de serviços concessionados*. Mestrado em Engenharia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 228 p.
- Gon, F. (2011). *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Gonçalves, M.; Polidoro, M.; da Silva, D. F. (2009) *Análise dos índices de impermeabilização do solo utilizando geoprocessamento: proposta de atualização do decreto n.º 402/1980 para projetos de drenagem no município de Londrina- PR*. In: Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação De Áreas Degradadas, Serviços Ambientais E Sustentabilidade, 2., Taubaté, SP. Anais... São Paulo: IPABHI. pp. 569-576.
- Jabur, A. S; Dornelles, F; Silveira, A. L. L; Goldenfum, J. A; Okawa, C. M. P; Gasparini, R. R. (2015). *Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v.20, n.4, pp. 937-945.
- Nogami, J. S; Villibor, D. F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. Anais Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, v. 1, pp. 30-41.
- Pandey, C.; Agarwal, S. (2019). *Comparative Study Between Soaked and Unsoaked Value of Soil Samples*. International Research Journal of Engineering and Technology. vol. 06.
- Preussler, E. S.; Pinto, S. (1982). *Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis considerando a resiliência*. Rio de Janeiro: IPR.
- Ramires, M. (2010). *Estudo dos efeitos da presença do nível d'água no comportamento de dois solos lateríticos utilizados em fundações de rodovias no Rio Grande do Sul*. Doutorado em Engenharia. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 261 p.
- Senço, W. (1964). *Pavimentos de paralelepípedos de alvenaria poliédrica e de blocos de concreto pré-moldados*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 126p.