

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ÁGUA CONECTA INFRAESTRUTURA HÍDRICA E DE TRANSPORTES EM AMBIENTE URBANO: CLIMA, HIDROLOGIA E PAVIMENTOS

Carla Beatriz Costa de Araújo¹ ; Francisco de Assis de Souza Filho² & Jorge Barbosa Soares³

RESUMO – Este trabalho apresenta uma metodologia para conectar as diferentes variáveis e os modelos que integram a infraestrutura hídrica e de transportes no ambiente urbano, com o objetivo de entender como o clima e as águas podem influenciar no desempenho dos projetos de engenharia. Para aplicação da metodologia, escolheu-se como região de estudo a cidade de Fortaleza/CE. A proposta apresentada consiste no acoplamento dos seguintes modelos: climático, hidrológico, de infiltração (fluxo não saturado em meio poroso) e modelo estrutural de pavimentos. Inicialmente foram definidas as variáveis de ligação entre os sistemas e em seguida realizadas as modelagens. Para o modelo climático, foram estudadas duas condições de precipitação: utilização da equação de chuva para a cidade e série histórica de precipitações. A modelagem de fluxo no meio poroso foi feita com o programa Slide 6.0 da Rocscience utilizando as características hidromecânicas dos materiais. Para as condições estudadas, as precipitações geram variações de umidade nas camadas do pavimento de até 78,2%, o que pode levar a reduções na resistência das camadas do pavimento, comprometendo o seu desempenho. Com base nos resultados, a proposta mostrou-se satisfatória e de simples aplicação, com a utilização de variáveis já conhecidas no meio técnico.

ABSTRACT– This work presents a methodology to connect the different variables and models that integrate water and transport infrastructure in the urban environment, aiming at understanding how climate and water can affect the performance of engineering projects. For the application of the methodology, the city of Fortaleza / CE was selected as a case study. The present proposal consists in the coupling of the models: climatic, hydrological, infiltration (unsaturated flow in porous medium) and pavement structural model. Initially the connection variables between the systems were defined and then the modeling was performed. For the climatic model, two precipitation conditions were considered: rainfall equation for the city and historical series of precipitations. Flow modeling in the porous medium was done using the Rocscience Slide 6.0 program using the hydromechanical characteristics of the materials. For the studied conditions, the precipitations generate variations of humidity in the layers of the pavement of up to 78.2%, which can lead to reductions in the resistance of the layers of the pavement, thus compromising its performance. Based on the results, the proposal proved to be a simple application, with the use of variables well established within the technical literature.

Palavras-Chave – Clima, pavimentos, análise integrada

1) Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, carlabeatriz@crateus.ufc.br

2) Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, assis@ufc.br

3) Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, jsoares@det.ufc.br

INTRODUÇÃO

O ciclo da água e as relações com o clima em ambiente urbano mudaram bruscamente no antropoceno (CRUTZEN; STOERMER, 2000; STEFFEN *et al.*, 2011). Na presente era, a humanidade tem exercido forte poder nos sistemas da Terra, como as mudanças climáticas, além da alteração de cursos de rios, impermeabilização de áreas, desmatamento, barragens, etc. (HAMILTON *et al.*, 2015; STEFFEN *et al.*, 2011). Porém, o clima e o ciclo água nos ambientes antropizados exercem forte poder sobre o desenvolvimento das cidades, pois são fatores, por vezes, causadores de transtornos à população, citando-se: secas e cheias, inundações urbanas, ilhas de calor, entre outros.

As cidades e os diferentes sistemas que a compõem devem ser pensados de forma a conviver com a água e os fatores climáticos. No que se refere as infraestruturas urbanas, ao longo do tempo, grande parte dos projetos de engenharia tem sido desenvolvidos de forma independente. Cada parte é subdividida para elaboração por diferentes especialistas, perdendo-se ou simplificando-se, muitas vezes, a visão conjunta das inter-relações dos sistemas. Por isto, é importante desenvolver ferramentas que permitam uma análise integrada das infraestruturas civis em ambiente urbano, com vistas a identificar as conexões e elaborar planejamento e projetos mais eficazes e robustos ao reconhecer as interligações entre os diferentes subsistemas (abastecimento de água e esgoto, drenagem, pavimento, tráfego, construção civil, entre outros). Nesta perspectiva, apresenta-se um esforço inicial para explorar estas conexões e a análise do subsistema de drenagem urbana e de pavimentos.

As infraestruturas de transportes estão sujeitas a intempéries, sendo que a precipitação atmosférica e a radiação solar são dois elementos do clima que podem influir no desempenho do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2015). Todavia no Brasil, o dimensionamento de pavimentos ainda não incorpora todas as variáveis climáticas que afetam sua durabilidade, mesmo em suas versões mais recentes (SANTIAGO *et al.*, 2018). O desenvolvimento das soluções para os problemas modernos de engenharia de transportes requer projetos robustos que incorporem a variabilidade climática de forma a atender as demandas para qual foram idealizados.

Para a concepção destes projetos são necessários estudos mais integrados entre as análises do comportamento hidromecânico dos elementos integrantes da estrutura de pavimento e o meio físico, pois este impõe condicionantes espaciais e temporais de grande relevância para o comportamento da obra ao longo de sua vida útil. Há ainda a grande variabilidade ambiental e, também, de material e de comportamento, que caracteriza muitas obras do sistema viário, sendo imposta a necessidade de simplificações e análises integradas (GHELING *et al.*, 2015).

Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia simplificada para a conexão das diferentes variáveis e modelos que integram a infraestrutura hídrica e de transportes do ambiente urbano, a fim de aprimorar a concepção dos projetos de engenharia e compreender como o clima e as águas no meio antropizado afetam o desempenho destes projetos.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário elaborar uma metodologia robusta para conectar os diferentes sistemas que compõem a infraestrutura urbana hídrica e de pavimentos. Foi necessária a compreensão de como estes se relacionam (conexões entre os sistemas) e quais as variáveis mais importantes de ligação entre os modelos. Para tal, seguiu-se as seguintes fases:

- 1ª Etapa: Elaborar a estratégia geral para acoplamento dos modelos climáticos, hidrológicos e de pavimentos;
- 2ª Etapa: Definição dos modelos e variáveis que serão utilizadas no acoplamento;
- 3ª Etapa: Modelo climático: condições de precipitação;
- 4ª Etapa: Modelagem do escoamento e modelo de fluxo transiente em meio poroso não saturado;
- 5ª Etapa: Análise das variações de umidades e consequências nos projetos de pavimentos asfálticos.

A proposta desta pesquisa consiste no acoplamento de diversos modelos incorporando diferentes variáveis, conforme apresentado na Figura 1. Nesta concepção, agrega-se ao projeto de pavimentos asfálticos a análise de fluxo transiente em meio poroso (modelo de infiltração), que utiliza como dado de entrada a intensidade das precipitações da região (P) obtidas através do modelo climático. A resposta do modelo de infiltração é a variação da umidade ($\Delta\Theta$) nas diferentes camadas, sendo que, a variação da umidade acarreta também a variação da resistência dos materiais granulares que compõem o pavimento (modelo de resistência do pavimento), que por sua vez implica na vida útil do pavimento. Para o modelo de resistência do pavimento também são utilizadas informações de temperatura (T) definidas com base no modelo climático.

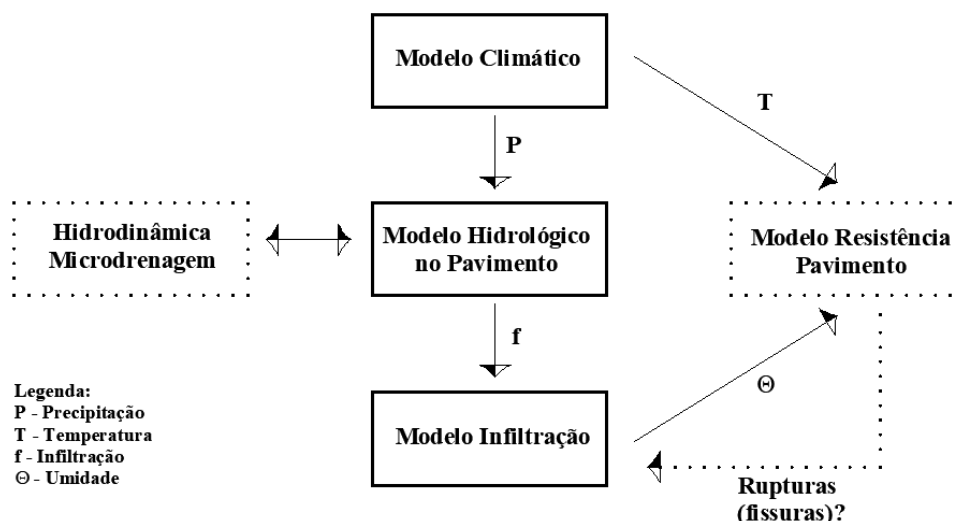


Figura 1 – Esquema metodológico para o projeto integrado de pavimentos

Devido às limitações de espaço, apresenta-se neste artigo apenas a integração do modelo climático com o modelo hidrológico do pavimento e o modelo de infiltração. Os outros acoplamentos são frutos de discussões em outros trabalhos.

A região de estudo adotada foi a cidade de Fortaleza no Estado do Ceará e foram consideradas duas situações diferentes de condições climáticas de precipitação:

- Equação IDF (intensidade – duração – frequência) de Fortaleza disponível no trabalho de Matos Neto e Fraga (1983) adotando um período de retorno de 100 anos e duração de 24h:

$$i = \frac{506,99.T^{0,181}}{(t+8)^{0,61}} \quad (1)$$

Onde: i denota a intensidade de precipitação (mm/h); T representa o tempo de retorno (anos); t a duração da chuva (min).

- Série histórica de chuva com base em um posto pluviométrico da cidade de Fortaleza para um período de 150 dias, entre fevereiro e junho de 1995, escolhido por ser um dos de maior intensidade de precipitações.

A fim de simular as condições de precipitação e fluxo no pavimento foram definidas algumas hipóteses. Considerou-se que durante a chuva (Figura 2), parte da precipitação (i) vira escoamento superficial direto (q) e outra parte é infiltração (f), conforme equações a seguir:

$$q = C \cdot i \quad (2)$$

$$f = (1 - C) \cdot i \quad (3)$$

Onde: C é o coeficiente adimensional de escoamento superficial

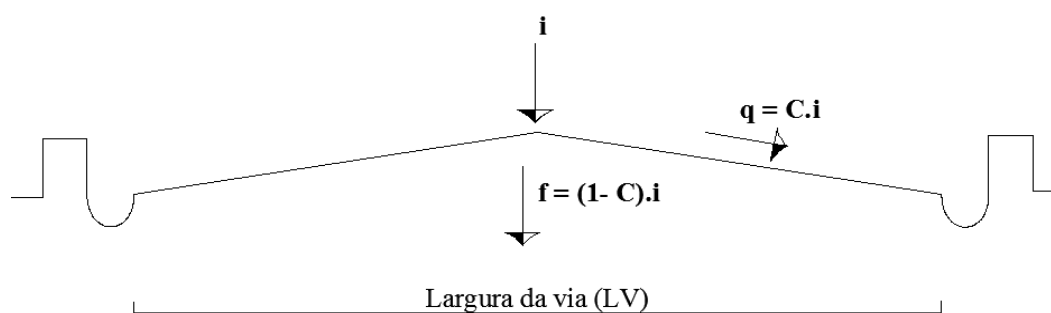


Figura 2 – Modelo de escoamento superficial e infiltração do pavimento

Para o modelo do pavimento, definiu-se uma seção-tipo, conforme indicado nas Figuras 3 e 4. Adotou-se um pavimento com espessuras de base e sub-base de 15 centímetros e revestimento asfáltico de concreto betuminoso com 5 centímetros com base nas seções-tipo disponíveis no trabalho de Bastos (2013). Na condição estudada considerou-se uma estrutura sem acostamento, comum em rodovias de baixo volume de tráfego na região. Na região onde há presença de revestimento asfáltico, adotou-se o coeficiente adimensional de escoamento superficial de 0,95, para a região sem acostamento, o valor adotado foi de 0,30, com base nos trabalhos de Porto (1995).

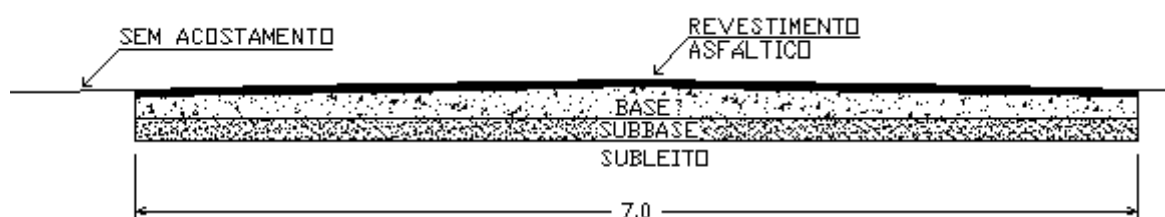


Figura 3 – Geometria estudada (largura do pavimento)

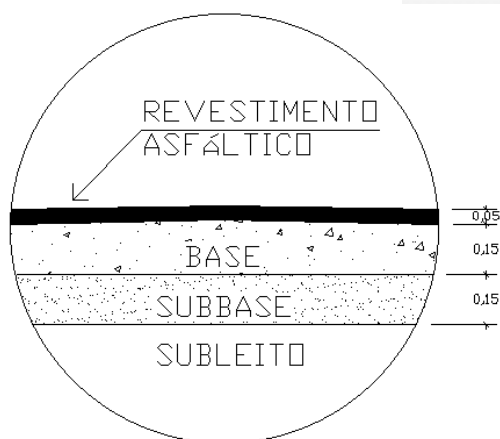


Figura 4 – Geometria estudada (espessura das camadas) – Dimensões em metros

O clima da região de estudo é semiárido, portanto, os pavimentos passam maior parte de sua vida útil submetidos a condição não-saturada, havendo ainda o revestimento asfáltico que funciona como uma barreira impermeabilizante que dificulta a passagem da água para as camadas inferiores. Em função desse aspecto, a modelagem de fluxo nas camadas do pavimento deve ser feita considerando a condição inicial não saturada, visto que os fluidos que estão presentes nos vazios da estrutura granular modificam suas propriedades hidráulicas e mecânicas. Para esta condição (fluxo em regime transiente e meio não saturado), temos a equação governante para fluxo tridimensional (Equação 3), denominada de equação de Richards (FREEZE e CHERRY, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (4)$$

Onde: h representa a carga hidráulica; Ψ é a sucção matricial; $C(\Psi)$ é a curva característica do solo e $K(\Psi)$ é curva de curva de condutividade hidráulica.

As soluções analíticas para esta equação são obtidas para poucos casos e condições restritas. Observa-se que a não linearidade da equação de Richards torna o problema de difícil resolução. Como alternativa, têm-se os métodos numéricos e computacionais que são geralmente utilizados a fim de tornar menos complicada e possível essa tarefa (QUEIRÓZ, 2017). Neste trabalho, para o modelo de fluxo em regime transiente e meio não saturado foi feito uso programa Slide 6.0 da Rocscience com a licença da Universidade Federal do Ceará. A modelagem utiliza o método dos elementos finitos (MEF) conforme apresentado na Figura 5. Como dados de entrada são necessários os coeficientes de permeabilidade dos materiais, bem como a curva característica do solo e a curva de curva de condutividade hidráulica. Pode-se ainda considerar diferentes profundidades do lençol freático. Para as situações analisadas, adotou-se o lençol a uma profundidade de 4,5 metros do nível do terreno.

Os valores do coeficiente de permeabilidade foram determinados com base em dados disponíveis na literatura. Ferreira *et al.* (2014) analisaram as condições de fluxo em seis misturas asfálticas com diferentes percentuais de volume de vazios (Vv). Dentre as misturas analisadas, optou-

se pela utilização do tipo concreto asfáltico (CA) com 4% de vazios com a permeabilidade indicada na Tabela1. As características hidráulicas dos materiais granulares foram obtidas no trabalho de Vogel *et al.* (2000). Considerou-se que o terreno natural (subleito) é constituído de um material arenoso com presença de finos, que é característico de vários locais da cidade de Fortaleza e Região Metropolitana. As camadas de base e sub-base em estruturas viárias são constituídas de solos grossos (areias e pedregulhos), por isto, adotou-se o coeficiente de permeabilidade de uma areia do mesmo trabalho de Vogel *et al.* (2000) (Tabela1).

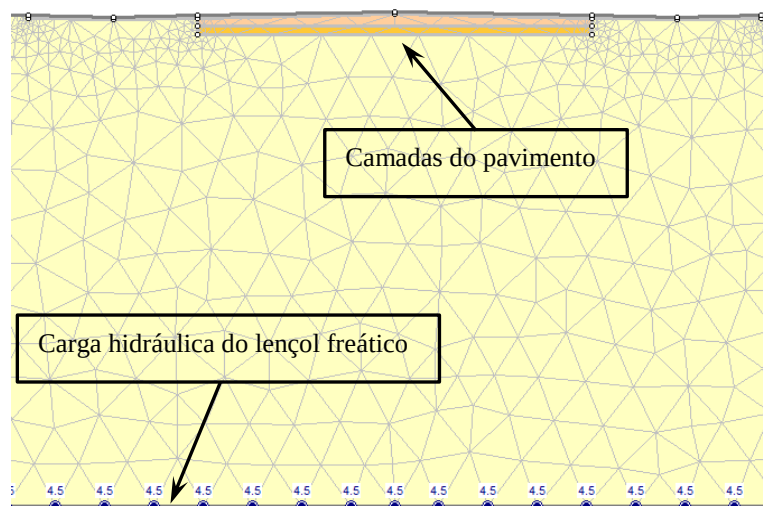


Figura 5 – Malha de elementos finitos utilizada na modelagem de fluxo – Software Slide

Tabela 1 – Coeficiente de permeabilidade dos materiais constituintes das camadas do pavimento

Material	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
Revestimento Asfáltico	$8,82 \times 10^{-7}$
Subleito	$4,00 \times 10^{-5}$
Sub-Base e Base	$8,25 \times 10^{-5}$

As funções de permeabilidade não saturada podem ser obtidas através do próprio software Slide com base na magnitude da permeabilidade saturada (K_s). Neste modelo simplificado há uma diminuição da permeabilidade insaturada em uma ordem de magnitude, dentro da faixa inicial de valores de sucção matricial. Ressalta-se que é necessário definir o tipo de material (areia, silte, argila, geral), pois as curvas médias são determinadas a partir de valores típicos da literatura. As variações de permeabilidade em função da sucção matricial utilizadas no trabalho podem ser observadas na Figura 6.

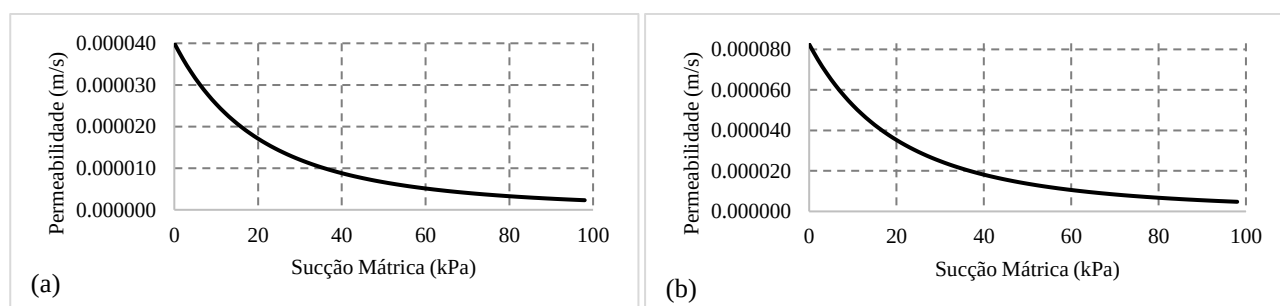


Figura 6 – Curva de condutividade hidráulica (a) terreno natural – subleito; (b) base e sub-base

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado anteriormente, foram estudadas duas condições climáticas diferentes (equação de chuva Fortaleza e série histórica de precipitação) para o desenvolvimento da análise integrada dos modelos. Os principais resultados obtidos da modelagem de fluxo nas camadas do pavimento são variações de umidade ao longo tempo, que influenciarão as propriedades mecânicas do pavimento.

Análise do Sistema Integrado com Base na Equação de Chuva de Fortaleza

Na situação analisada determinou-se a intensidade (mm/h) de uma precipitação com duração de 2 horas e período de retorno de 100 anos. Com base na Equação 2, esse valor foi de 60,5 mm/h. Na Figura 7 é possível observar a evolução da umidade volumétrica ao longo tempo. Simulou-se um período de 36 horas a fim de analisar quanto tempo seria necessário para que o pavimento voltasse a condição de umidade anterior a chuva (umidade de equilíbrio). Verifica-se que a máxima umidade coincide com o final da precipitação, e que é necessário um período de 26 horas após o início da chuva para que as camadas retornem à umidade de equilíbrio.

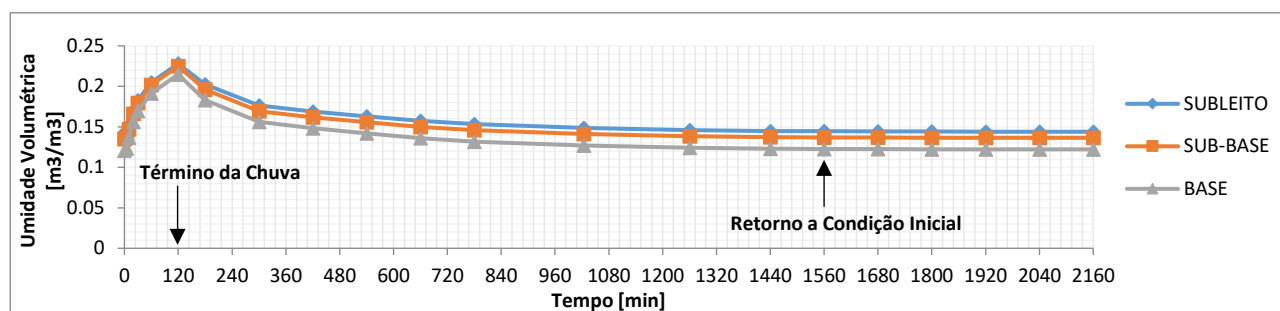


Figura 7 – Variação no tempo da umidade volumétrica nas camadas do pavimento

Na Tabela 2 é possível verificar os valores de umidade da condição inicial e o máximo valor que corresponde ao período de 2 horas de precipitação. Analisando estes resultados, observa-se que as variações percentuais de umidade foram elevadas em todas as camadas, chegando a 78,2% na camada de base do pavimento.

Tabela 2 – Umidade volumétrica máxima e variação percentual

Camada	Umidade Volumétrica (m³/m³)		Variação Percentual
	Condição Inicial	Valor máximo	
Subleito	0,143	0,228	59,9%
Sub-Base	0,135	0,225	66,8%
Base	0,120	0,215	78,2%

Análise do Sistema Integrado com Base na Série histórica de precipitações

A fim de analisar o efeito de precipitações contínuas sobre o pavimento, foi escolhido um dos períodos mais intensos de precipitação da série histórica da cidade de Fortaleza (de fevereiro a junho de 1995), conforme apresentado na Figura 8. Nesta simulação foi possível observar que as precipitações contínuas conduzem a um aumento progressivo da umidade, acarretando também uma elevação no nível freático de 4,00 m para 5,059m (Figura 9). Percebe-se que é importante não somente

a intensidade das precipitações, mas sua sequência ao longo do tempo, indicando que para a conexão dos modelos é importante simular diversas condições de chuva, analisando as tendências e características das séries temporais de precipitação da região.

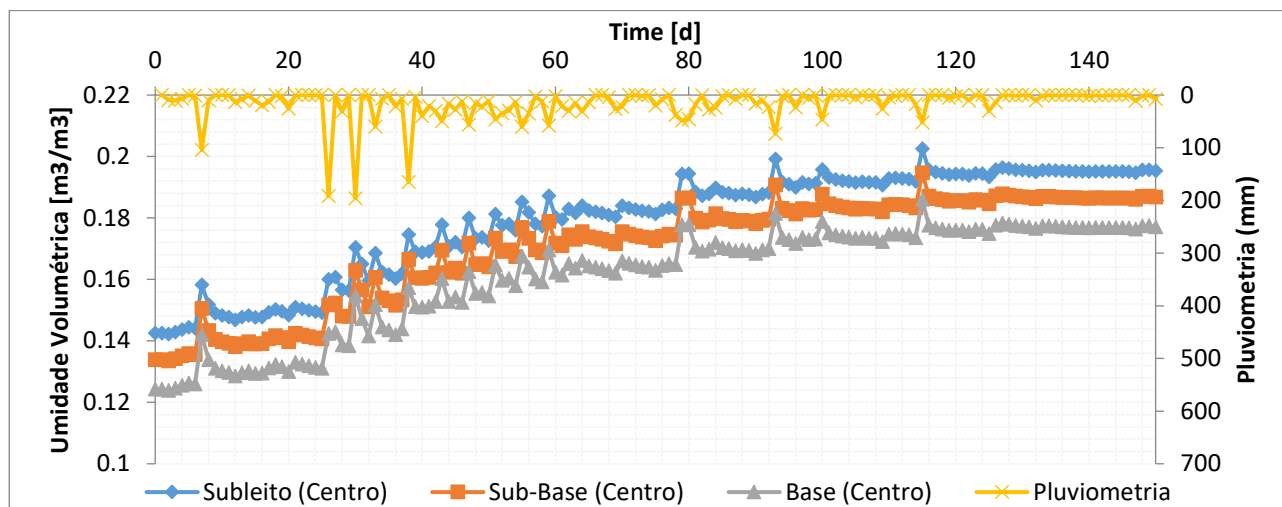


Figura 8 – Variação no tempo da umidade volumétrica nas camadas do pavimento e intensidade pluviométrica no período de março a maio de 1995

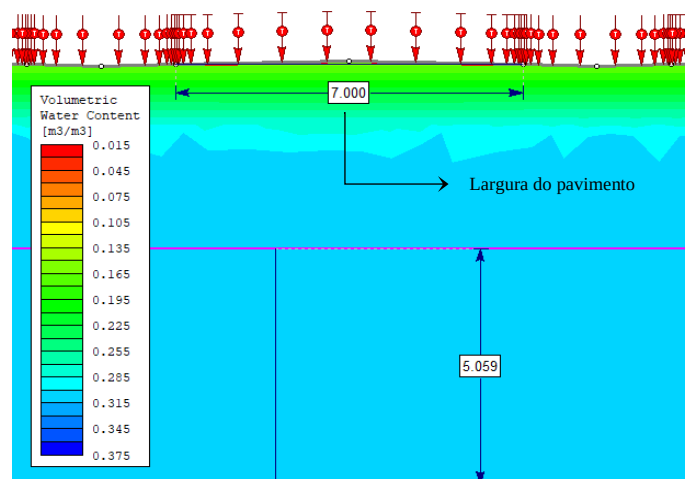


Figura 9 – Elevação do Nível Freático para o período

Modelo de Resistência do Pavimento

As análises de fluxo no pavimento indicaram que as precipitações geraram aumento na umidade das diversas camadas da estrutura analisada. As variações climáticas as quais os pavimentos estarão submetidos, como as precipitações, refletem-se em variações nas propriedades dos solos, como o módulo de resiliência (principal parâmetro de caracterização da rigidez dos solos aplicados na pavimentação). Trabalhos como os de Zaman e Khoury, (2007) Kim e Kim (2007) e Bastos (2013) avaliaram a variação da umidade das camadas granulares constituintes dos pavimentos e as alterações no módulo de resiliência (MR), indicando grandes mudanças nas características mecânicas dos solos.

Baseado no trabalho de Barros (2013), que analisou a variação da umidade e as alterações no MR dos solos característicos da cidade de Fortaleza e Região Metropolitana, a elevação da umidade gravimétrica em + 2% em relação a umidade ótima de compactação reduziu este parâmetro em até

51%. Na Figura 10 observa-se que nas condições climáticas analisadas, a umidade gravimétrica aumenta em até + 5,3%, levando então a rigidez das camadas a uma redução. Isto implica em um aumento na deformação do pavimento, que pode reduzir sua vida útil, ou no caso de um projeto, pode levar a necessidade de aumentar a espessura das camadas da estrutura. Para as condições estudadas por Barros (2013), o dimensionamento considerando o MR correspondente a um aumento de 2% de umidade no subleito acarretou a necessidade de incremento de 22 centímetros de espessura na camada total da estrutura, quando esta é comparada a consideração do solo com características mecânicas obtidas na umidade de compactação. Trata-se de um número significativo e com forte impacto econômico.

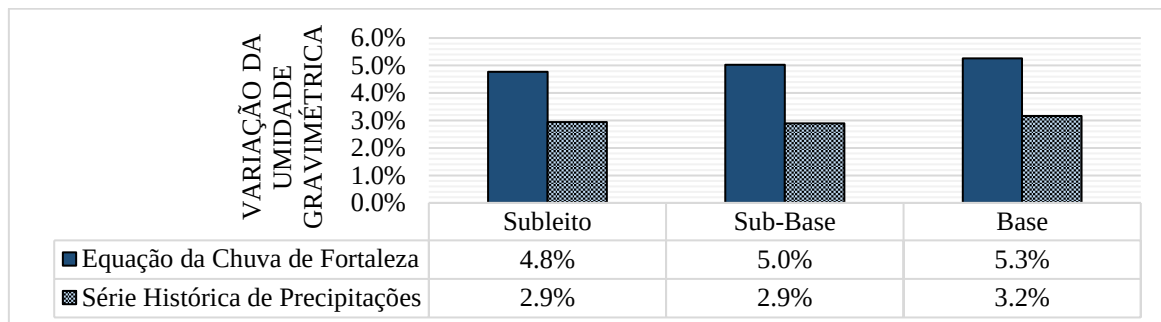


Figura 10 – Variações máximas de umidade gravimétrica nas camadas do pavimento

CONCLUSÕES

A metodologia apresentada neste trabalho possibilita a conexão das diferentes variáveis e modelos que integram a infraestrutura hídrica e de transportes do ambiente urbano. Esta metodologia mostrou-se robusta, porém, de simples aplicação, com a proposição de utilização de variáveis já conhecidas no meio técnico, porém, por vezes não consideradas nas interconexões dos subsistemas, o que pode acarretar a não identificação de todos os riscos e potenciais falhas do sistema.

Os resultados apresentados indicam que considerar os sistemas urbanos de forma integrada permite entender como o clima, as variáveis climáticas e hidrológicas afetam o comportamento da infraestrutura de transportes. Foi possível observar que para as condições estudadas, tomando como base as características climáticas, geológico-geotécnicas e de infraestruturas de transportes da cidade de Fortaleza, as precipitações geram variações de umidade nas camadas do pavimento de até 78,2%. Verificou-se ainda que não apenas a intensidade das precipitações é importante, mas a sequência das chuvas, devendo-se analisar as tendências e características das séries temporais de precipitação da região.

Por fim, ressalta-se que a tomada de decisão em problemas de engenharia deve ser fundamentada em modelos que se aproximem as condições reais, a fim de dar respostas mais assertivas e desenvolver projetos que tenham desempenho adequado durante toda a vida útil para a qual estes foram concebidos. Neste sentido, a análise acoplada dos modelos aproxima-se mais as condições existentes em ambientes antropizados e pode gerar soluções para aos problemas modernos

de engenharia do antropoceno, além de auxiliar no adequado dimensionamento das infraestruturas civis urbanas.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, J. B. S. (2013). *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- CRUTZEN, P.J.; STOERMER, E.F. (2000). *The 'Anthropocene'*, Global Change Newsletter, v. 41, p. 17-18.
- FERREIRA, W. L. G.; BRANCO, V. T. F. C.; SILVA FILHO, F. C. da. (2014). *Simulação Numérica do Fluxo D'água em Pavimentos Flexíveis Compostos por Diferentes Misturas Asfálticas*. In: ANPET - XXVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2014, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ANPET.
- FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs,: PrenticeHall, Inc.
- GHELING, W. Y. Y. *et al.* (2015) Estruturas de pavimento no contexto dos solos não saturados. In: CARVALHO, J. C. de *et al.* *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).
- HAMILTON, C.; BONNEUIL, C.; GEMENNE, F. (2015). *The Anthropocene and the Global Environmental Crisis*. London/New York: Routledge.
- KIM, D. KIM, J. R. (2007). *Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test*. Construction and Building Materials, 21, 1470–1479.
- MATOS NETO, C. E. A.; FRAGA, N. S. (1983). *Equação de Chuvas Intensas para a Cidade de Fortaleza*. In: V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1983, Blumenau-SC. Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora Interciência, 3a Edição, 640 p.
- PORTO, R. L. (1995) Escoamento Superficial Direto. In: TUCCI, C. E. M. ; PORTO, R. la L.; BARROS, M. T. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS.
- QUEIRÓZ, B. F. (2017). *Estudo de Soluções Numéricas da Equação de Richards através do Método de Elementos Finitos e Diferenças Finitas para Simulação de Fluxo Unidimensional em Solo Não-Saturado*. 2017. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- SANTIAGO, L.S.; SILVA, S. A. T. ; SOARES, J. B. (2018) . *Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas*. TRANSPORTES (RIO DE JANEIRO), v. 26, p. 31-43.
- STEFFEN, W. *et al.* (2011). *The Anthropocene: conceptual and historical perspectives*. Philosophical Transactions of The Royal Society, 369: 842-867.
- VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M.T. e CISLEROVA, M. (2000). *Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions*. Advances in Water Resources, p. 133-144.
- ZAMAN, M. e KHOURY, N. N. (2007). *Effect of soil suction and moisture on resilient modulus of subgrade soils in Oklahoma*. University of Oklahoma, Norman. Disponível em: <http://www.okladot.state.ok.us/hqdiv/p-r-div/spr-rip/library/reports/2167-fffy2006.pdf>. Acesso em 25 de abril de 2019