

SIMULAÇÃO NÚMERICA DO FLUXO D'ÁGUA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COMPOSTOS POR DIFERENTES MISTURAS ASFÁLTICAS

Wellington Lorrán Gaia Ferreira

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Universidade Federal do Ceará - UFC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – PETRAN

Francisco Chagas da Silva Filho

Universidade Federal do Ceará - UFC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

RESUMO

A água pode atingir o pavimento de diversas formas como por precipitação ou ascensão capilar. O efeito deletério da água é um dos principais fatores responsáveis pelo desgaste de pavimentos flexíveis. Um parâmetro para examinar a qualidade do pavimento com relação ao escoamento de água é a permeabilidade dos materiais que compõem as diversas camadas da estrutura. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o padrão de fluxo d'água em pavimentos flexíveis compostos por diferentes tipos de misturas asfálticas. Para isso, foi utilizado um programa que utiliza elementos finitos para modelar o fluxo d'água em um perfil hipotético de um sistema em camadas. Foram analisadas, no total, seis misturas asfálticas com diferentes percentuais de Volume de vazios (Vv): quatro com granulometria densa, sendo duas do tipo Areia Asfáltica - AA (7% e 9% de Vv) e duas do tipo Concreto Asfáltico - CA (4% e 7% de Vv), e duas com granulometria aberta do tipo Camada Porosa de Atrito - CPA (20% e 23% de Vv). Os resultados demonstram que o padrão de fluxo depende não somente da permeabilidade média do material, mas também da forma como a permeabilidade está distribuída no revestimento.

Palavras Chave: pavimentos, permeabilidade, fluxo de água

ABSTRACT

The water can reach the pavement in various ways such as by precipitation or by capillarity. The deleterious effect of water is a major factor responsible for the distresses in flexible pavements. An important parameter to verify the quality of the pavement with respect to water flow is the material permeability. In this context, this work aims to evaluate the water flow pattern in flexible pavements composed of different types of asphalt mixtures. With this purpose, a finite element program was used to model the flow of water in a hypothetical profile of a flexible pavement. Six types of asphalt mixtures with different air voids content were analyzed: four with dense gradation, two types of asphalt sand (7% and 9% air voids) and two types of asphalt concrete (4% and 7% air voids), and two types of open grade friction course mixtures (20% and 23% air voids). The results show that the flow pattern depends not only on the average permeability of the material, but also on the material permeability distribution.

Key words: pavements, permeability, water flow

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta grande parte de seu território sujeito a chuvas intensas, que têm como principais características a curta duração e o grande volume de água precipitado. O acúmulo de água sobre a superfície do pavimento é responsável por diversos problemas em rodovias como a hidroplanagem, que ocorre quando há falta de aderência no contato pneu-pavimento, e o efeito “*spray*” de água, que surge com a passagem dos pneus no pavimento molhado.

Um dos principais fatores que controla o desempenho do pavimento é a capacidade do revestimento de impedir que a água permaneça no interior do sistema (AL OMARI, 2004). O efeito deletério da água, com relação a camada de revestimento, está relacionado a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados (falha adesiva) e a perda de coesão dentro do próprio filme de ligante asfáltico (falha coesiva). Esse mecanismo (dano por umidade induzida) pode agravar outras formas de danos, tais como a resistência a deformação permanente e o trincamento por fadiga. A permeabilidade é uma propriedade do material que expressa a capacidade de percolação de um fluido por um meio poroso. Em misturas asfálticas, o fluido

em estudo é a água. No Brasil, não há uma metodologia definida para a determinação do coeficiente de permeabilidade de misturas asfálticas. Na literatura existem vários estudos que propõem métodos para avaliar a permeabilidade nesse tipo de material (OLIVEIRA, 2003; NASCIMENTO, 2005; SOUZA, 2008; CHAVES, 2010). A maioria desses estudos adota como válida a lei de Darcy.

Nesse contexto, de forma a entender o comportamento do fluxo de água no pavimento, o presente trabalho analisou este fluxo em uma seção hipotética de pavimento flexível. O programa Slide 6.0, comumente utilizado para análise de fluxo em materiais granulares (e.g., barragens de terra), foi usado para a análise. Foram avaliadas seis misturas asfálticas no total, quatro com granulometrias densas, sendo duas do tipo Areia Asfáltica - AA (7% e 9% de Vv) e duas do tipo Concreto Asfáltico - CA (4% e 7% de Vv), e duas com granulometrias abertas do tipo Camada Porosa de Atrito - CPA (20% e 23% de Vv). A permeabilidade de cada uma dessas misturas foi obtida em FERREIRA (2013), e usada como dado de entrada na análise de fluxo para o presente trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Permeabilidade de Misturas Asfálticas

Na maioria das rodovias do país, os sistemas de drenagem nem sempre estão preparados para o grande volume de água precipitado nas chuvas. Boa parte dos projetos não prevê a infiltração da água para o interior do pavimento. Desde problemas práticos, como o fenômeno da hidroplanagem, até problemas estruturais, como o agravamento da deformação permanente e do trincamento por fadiga, podem ser causados pelo acúmulo de água nos pavimentos. Dessa forma, é essencial avaliar a permeabilidade da camada de revestimento tentando buscar soluções para evitar o acúmulo de água nessas estruturas.

A permeabilidade de um material poroso é definida como a capacidade deste em transportar um fluido através dos seus vazios quando sujeito a pressão (AL OMARI, 2004). O fluido em estudo geralmente é a água, no entanto, existem estudos, como o de ELLIS e SCHMIDT (1960), que usaram o ar sob pressão para avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas. A permeabilidade de qualquer material está diretamente relacionada com as características dos materiais que o constituem, bem como com as características do fluido percolante.

Em relação aos materiais que compõem a mistura asfáltica, fatores como a forma dos agregados podem afetar a permeabilidade da mesma. Agregados angulares promovem maior intertravamento e atrito entre si, proporcionando uma estrutura interna mais rígida, diminuindo os espaços vazios no interior do revestimento. Como consequência, estes podem diminuir a permeabilidade da mistura asfáltica através da redução dos vazios interconectados no interior do material. Nesse contexto, o modo como os componentes da mistura asfáltica se organizam no interior da estrutura é fundamental para determinar a permeabilidade da mesma, pois estes definem o tamanho, a quantidade e a distribuição dos vazios. Segundo AL OMARI (2004), além dos materiais constituintes, a permeabilidade de misturas asfálticas é influenciada pelo processo de compactação, e pelas propriedades geométricas do pavimento, como a espessura da camada de revestimento. Este mesmo autor afirma ainda que os fatores citados anteriormente afetam a permeabilidade porque alteram a distribuição de vazios em termos de tamanho, de conectividade e de distribuição dos mesmos.

2.2. Fluxo de Água em Misturas Asfálticas

Entender como ocorre o fluxo d'água no interior de um material poroso é fundamental, pois o padrão de fluxo pode ajudar a prever o comportamento do material quando este está sujeito à presença de água. Dessa forma, existem na literatura internacional alguns estudos que tentam simular o fluxo d'água em pavimentos asfálticos (MASAD *et al.*, 2002; AL OMARI, 2004; KUTAY *et al.*, 2007). Na literatura nacional, FALCÃO (2007) utilizou o programa SEEP/W para simular o comportamento do fluxo em uma barragem com espessura de núcleo de 1,0m de CA com 5,5% de teor de ligante asfáltico e Vv médio de 2%. Os resultados demonstraram que a barragem com núcleo de CA apresenta valores de vazão da mesma ordem de grandeza se comparada a mesma barragem com núcleo de solo com espessura da base maior do que 100m.

Em pavimentos asfálticos, MASAD *et al.* (2002) utilizaram o programa SEEP/W para verificar o fluxo d'água em uma seção transversal hipotética composta por revestimento, base e subleito. Nesse programa, gera-se uma malha de elementos finitos para se obter uma solução numérica. A seção do pavimento analisada por esses autores é apresentada na Figura 1.

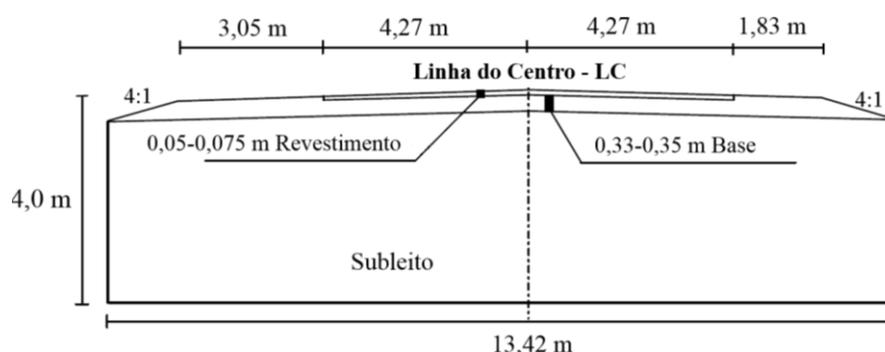


Figura 1: Seção transversal de pavimento flexível (adaptada de MASAD *et al.*, 2002)

A camada de base e o subleito foram considerados saturados, com o coeficiente de permeabilidade admitido como constante ($K_{\text{base}} = 1,54 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ e $K_{\text{subleito}} = 2,75 \times 10^{-8} \text{ m/s}$). Nessa situação, o nível do lençol freático foi considerado a 0,76m abaixo do topo do pavimento. A camada de revestimento foi dividida em quatro subcamadas de 10,4mm cada, pois a permeabilidade do revestimento asfáltico depende da distribuição dos vazios no interior do material. Para cada subcamada de 10,4mm foi admitido um Vv diferente, e o coeficiente de permeabilidade foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$K = \frac{V_a^m \gamma}{c \cdot S_{agg}^t \mu} \quad (1)$$

Onde: $V_a = V_v$, γ = peso específico do fluido ($9,79 \text{ kN/m}^3$ para a água a 20°C), μ = viscosidade do fluido (10^{-3} kg/m.s para a água), S_{agg} = a área de superfície específica dos agregados, assumindo que as partículas são cúbicas, e por fim, c , m e t são valores obtidos na calibração do modelo.

A partir da distribuição interna dos vazios, obtida por meio de tomografia computadorizada, foi possível determinar o Vv médio a cada 10,4mm iniciando a partir do topo do revestimento. A Figura 2 apresenta os vetores obtidos no citado estudo, quando a seção hipotética é modelada simulando um evento de chuva. A precipitação pluviométrica utilizada foi obtida a partir de medidas reais.

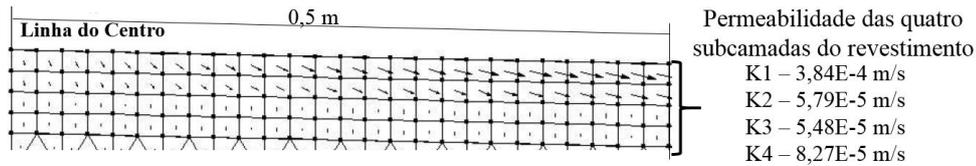


Figura 2: Vetores de fluxo próximo da linha de centro do pavimento (adaptada de MASAD *et al.*, 2002)

Cada subcamada do revestimento apresenta um coeficiente de permeabilidade (K) diferente que foi obtido a partir da Equação 1. Analisando-se a Figura 2, é possível verificar que o fluxo horizontal é predominante nas duas subcamadas iniciais. Vale ressaltar que a permeabilidade da primeira subcamada é aproximadamente seis vezes maior do que a permeabilidade das outras subcamadas (Figura 2). Dessa forma, o fluxo horizontal foi observado, principalmente, na subcamada com maior permeabilidade, no topo do revestimento.

Diante dos resultados observados por MASAD *et al.* (2002), verifica-se que o padrão de fluxo no revestimento está diretamente relacionado com a distribuição da permeabilidade na profundidade desta camada. Como a permeabilidade é diretamente influenciada pela distribuição dos vazios interconectados, espera-se que quanto maior for a quantidade deles, maior seja também a permeabilidade do material. Dessa forma, alguns autores, como KUTAY *et al.* (2007), analisaram o padrão de fluxo em amostras cilíndricas de misturas asfálticas com aproximadamente 100cm de altura, dividindo as mesmas em três partes: topo, meio e base. Nesse estudo, foram analisadas misturas do tipo SMA (*stone matrix asphalt*). A permeabilidade foi calculada analiticamente a partir da distribuição interna dos vazios. Para isso foi utilizado o processamento digital de imagens para observar o comportamento dos vazios com a profundidade da amostra. Para o SMA, a porosidade média no topo e na base das amostras é de aproximadamente 17%, enquanto no meio é de aproximadamente 11%. Dessa forma, os autores observaram que o fluxo de água na direção horizontal é melhor observado no topo e na base da amostra, regiões com maior porosidade. Já o fluxo vertical é mais observado na parte central da amostra, região com menor porosidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas analisadas neste trabalho são compostas por britas de 3/4" e de 1/2" como agregado graúdo, e pó de pedra e areia de campo como agregados miúdos. Para a CPA, além dos agregados citados, foi utilizada a cal como material de enchimento (fíler). A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas das misturas asfálticas avaliadas.

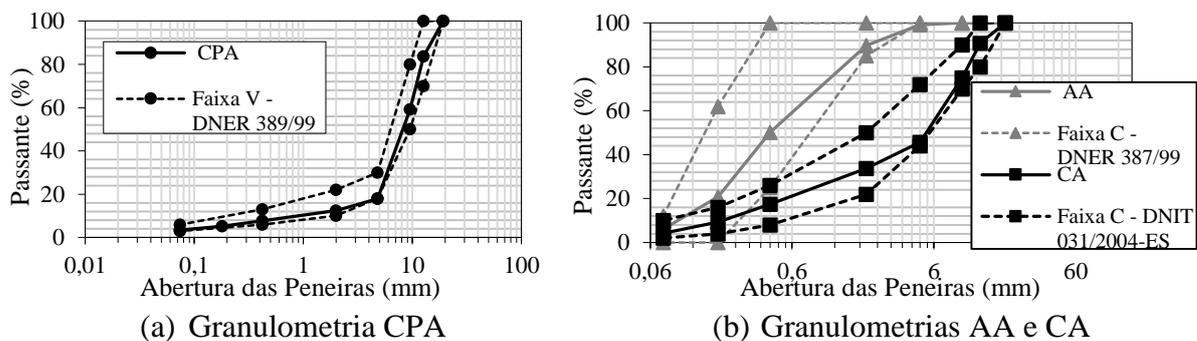


Figura 3: Curvas granulométricas de projeto para as misturas asfálticas avaliadas

Os três tipos de misturas asfálticas (CA, AA e CPA) avaliadas neste estudo foram dosadas seguindo a metodologia Superpave. O ligante asfáltico utilizado foi classificado por penetração como CAP 50/70. Para a mistura do tipo CPA foi utilizado o mesmo ligante (CAP 50/70) modificado com 4% de SBS em massa. O SBS utilizado foi o D 1192 BT, fornecido pela empresa Kraton Polímeros. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros volumétricos obtidos nos processos de dosagem das seis misturas asfálticas avaliadas no presente estudo. Os resultados de permeabilidade foram obtidos por FERREIRA (2013), e também são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros volumétricos das seis misturas asfálticas investigadas

Mistura Asfáltica	CAP (%)	G_{mm}	G_{mb}	RBV (%)	V _v (%)	K (m/s)
CA	5,0	2,447	2,349	74	4	$8,82 \times 10^{-7}$
			2,284	62	7	$3,86 \times 10^{-6}$
AA	6,5	2,383	2,203	65	7	$1,99 \times 10^{-7}$
			2,160	59	9	$2,64 \times 10^{-7}$
CPA	4,0 (modificado com 4% de SBS em massa)	2,463	1,976	28	20	$1,07 \times 10^{-4}$
			1,922	25	23	$1,24 \times 10^{-4}$

3.2. Seção Hipotética Avaliada

O fluxo d'água no pavimento foi modelado utilizando a seção transversal de um pavimento flexível típico, como apresentando na Figura 4. As permeabilidades para as camadas de base e para o subleito foram mantidas constante, e assumidas como as mesmas utilizadas por MASAD *et al.* (2002). A base considerada tem permeabilidade saturada igual a $1,54 \times 10^{-6}$ m/s e o subleito $2,75 \times 10^{-8}$ m/s. Segundo os autores, a base é composta por uma mistura de solo com agregado granítico e o subleito é composto por um solo argilo-siltoso. Dessa forma, somente a permeabilidade do revestimento foi modificada, com o objetivo de verificar a influência da permeabilidade do revestimento no fluxo d'água no pavimento. O subleito teve a lateral prolongada em 10m para cada lado, com o objetivo de simular melhor o que ocorre em campo. Para a presente análise, o lençol freático encontra-se a 0,76m do topo do pavimento, semelhante ao proposto por MASAD *et al.* (2002).

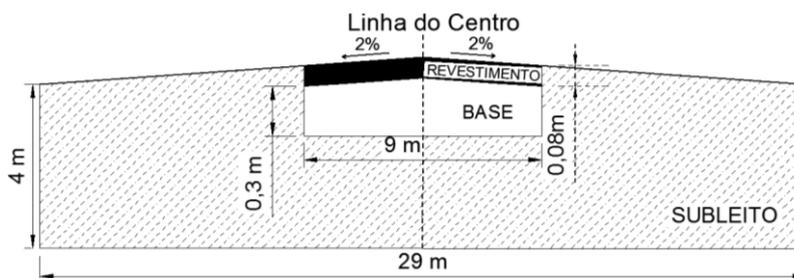


Figura 4: Ilustração da situação hipotética analisada neste trabalho (sem escala)

Vale ressaltar que, seria interessante utilizar valores de permeabilidade da camada de base e do subleito de materiais típicos brasileiros, pois os materiais considerados por MASAD *et al.* (2002) podem ser diferentes dos solos usualmente utilizados no Brasil para pavimentação. Tal fato pode influenciar a análise realizada no presente estudo.

3.3. Programa – Slide 6.0

Para realizar a análise de fluxo, foi utilizado o programa Slide 6.0. Esse programa baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos mais abrangentes e disponíveis para realizar análises de estabilidade de taludes, infiltração, fluxo e outros, em materiais porosos. Fluxos,

pressões e gradientes são calculados com base nas condições de contorno hidráulicas que o usuário define.

Com relação as condições de contorno, foi verificado na literatura a altura da lâmina d'água em pavimentos de acordo com a intensidade da chuva. PRADO *et al.* (2012) determinaram uma metodologia analítica para determinação da lâmina d'água em pavimentos aeroportuários, pois, assim como em rodovias, a formação de lâmina d'água pode gerar problemas funcionais, como o fenômeno da hidroplanagem. No citado trabalho a lâmina d'água no pavimento foi determinada a partir de diversos valores de intensidade de chuva, variando de 5 a 100mm/h, para um pavimento com declividade igual a 1,5%. A *Internacional Civil Aviation Organization* – ICAO (2002) afirma que é necessária a manutenção dos pavimentos quando a lâmina d'água é superior a 3mm. Entretanto, a lâmina d'água vai depender de diversos fatores, como a declividade da pista, a macrotextura do revestimento, a intensidade da chuva, dentre outros. No entanto, de acordo com o observado por PRADO *et al.* (2012), somente com uma chuva muito intensa (superior a 100mm/h) será possível atingir uma lâmina d'água de 3mm ou superior. Dessa forma, no presente trabalho foi considerado o caso crítico, com uma lâmina d'água igual a 3mm mantida constante sobre a superfície do pavimento, isto é, quando ocorre uma chuva intensa de 100mm durante uma hora.

Para verificar o comportamento do sistema com o tempo, foi realizado uma análise transiente, resultando em alterações na quantidade de água no interior do sistema com o tempo. Os casos de fluxo denominados transientes indicam que a quantidade de água que passa através de uma superfície de um elemento varia com o tempo (FREEZE & CHERRY, 1979). Dessa forma, para chuvas intensas com uma hora de duração, o tempo foi dividido em cinco estágios (10, 20, 30, 40 e 60 minutos). Em cada estágio é possível verificar o comportamento do sistema quando sujeito à uma lâmina d'água constante de 3mm de espessura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Mistura Asfáltica do Tipo CA

Para verificar o padrão de fluxo no revestimento, pode-se analisar a variação da carga total, pois para que o fluxo ocorra de um ponto para outro é necessário que haja uma diferença positiva entre a carga total dos dois pontos. A carga total é a soma de duas parcelas: carga altimétrica e carga piezométrica. A carga altimétrica é a diferença entre o ponto considerado e qualquer cota definida como de referência. A carga piezométrica é a pressão d'água no ponto, expressa em altura de coluna d'água (PINTO, 2002). Dessa forma, foi analisada a carga total na superfície do revestimento e na intersecção do revestimento com a base do pavimento, de modo a observar se o padrão de fluxo é horizontal e/ou vertical. As Figuras 5a e 5b apresentam o comportamento da carga total a partir do afastamento da linha do centro do pavimento para as duas misturas do tipo CA avaliadas.

Quanto maior for a diferença entre a carga total no topo do revestimento (superior) e na base do mesmo (inferior), maior deve ser a quantidade de água fluindo na direção vertical. Na Figura 5, verifica-se que com o tempo essa diferença entre a carga total nos dois pontos diminui. No estágio 1 (10min) a diferença média entre os pontos (topo e base) é de 0,15m. Já no estágio 5 (60min) essa diferença média é de 0,03m. Portanto, houve uma redução de 80% na diferença entre as cargas totais. Essa diferença tende a diminuir com o tempo, pois com uma lâmina d'água constante sobre a superfície, o grau de saturação no interior do material tende a

aumentar, como consequência, o fluxo na direção vertical tende a diminuir e o fluxo na direção horizontal tende a crescer.

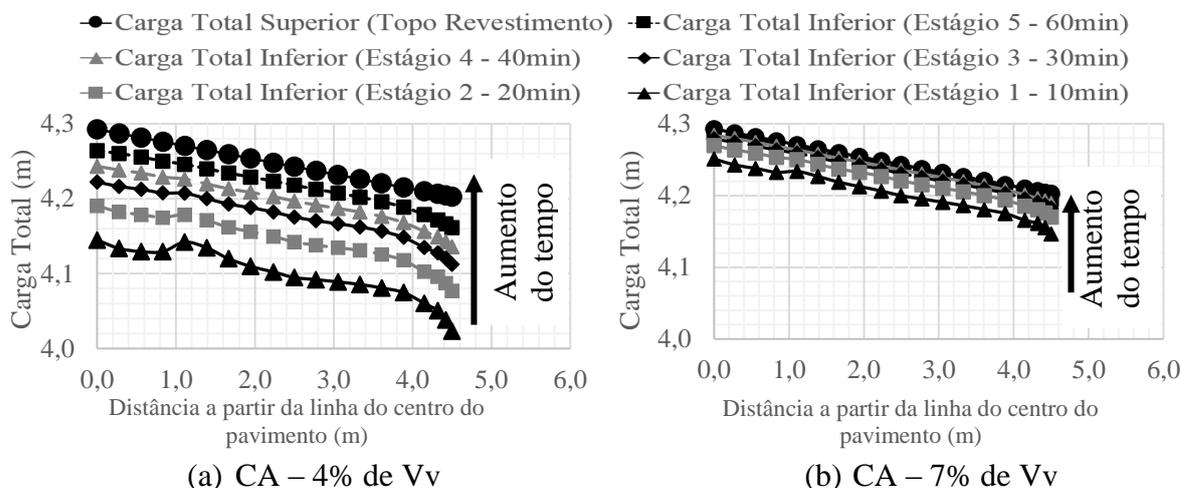


Figura 5: Variação da carga total a partir da linha de centro do pavimento para as duas misturas do tipo CA analisadas

Para a mistura do tipo CA com 7% de Vv, o comportamento da variação da carga total com o tempo é semelhante ao observado para a mistura do tipo CA com 4% de Vv, como pode ser observado na Figura 5b. Entretanto, para a mistura asfáltica com 7% de Vv, verifica-se que a diferença entre a carga total no topo do revestimento e na parte inferior do mesmo é menor do que o que foi observado para a mistura asfáltica com 4% de Vv. Esse comportamento é justificado pela permeabilidade do material, pois a mistura com 7% de Vv apresenta maior permeabilidade (quatro vezes maior), portanto, a quantidade de água contida na camada tende a aumentar mais rapidamente. Quanto maior for a permeabilidade do material, menor deverá ser o tempo necessário para que o grau de saturação da camada aumente. Para a mistura com maior permeabilidade (CA com 7% de Vv), para o último estágio avaliado (estágio 5 – 60min), verificou-se que a diferença média entre a carga total para pontos na horizontal (a partir da linha do centro até o final do revestimento) é maior (25%) do que a diferença média entre os pontos na vertical (topo e base do revestimento). Como consequência, começa a surgir fluxo na direção horizontal. Na Figura 6 pode-se observar o comportamento dos vetores de fluxo próximo a linha do centro para a mistura do tipo CA com 7% de Vv.

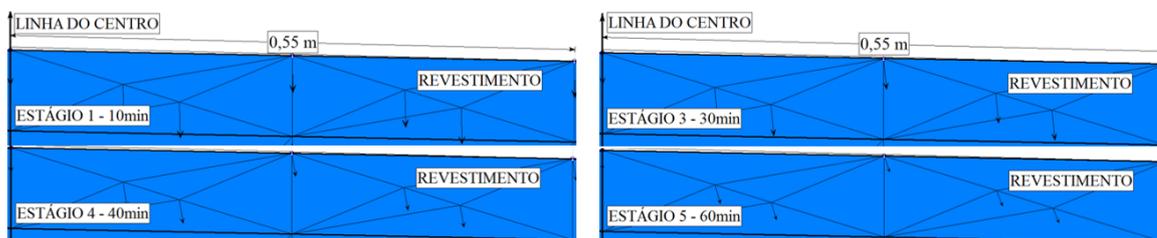


Figura 6: Comportamento dos vetores de fluxo próximos a linha de centro do pavimento para a mistura asfáltica do tipo CA com 7% de Vv

Observando a Figura 6, verifica-se que o comportamento dos vetores corrobora com a avaliação feita anteriormente a partir da análise da variação da carga total. Com o tempo, os tamanhos dos vetores na vertical tendem a diminuir e o fluxo horizontal começa a surgir lentamente. Vale ressaltar que para as análises apresentadas anteriormente, foi considerado que a permeabilidade

horizontal é igual a vertical. Entretanto, é importante salientar que misturas asfálticas são materiais anisotrópicos (ZHANG *et al.*, 2012), portanto, podem apresentar comportamentos diferentes nas direções vertical e horizontal. AL OMARI (2004) analisou a permeabilidade horizontal e vertical de diferentes tipos de misturas asfálticas. Este autor afirmou que para misturas com granulometria densa a razão entre a permeabilidade horizontal e a vertical está entre 8,35 e 11,40. Já para misturas asfálticas com granulometria aberta, esse intervalo varia de 1,65 a 4,02. Acredita-se que a permeabilidade horizontal deve ser maior do que a permeabilidade vertical também para as misturas asfálticas avaliadas nesse trabalho.

Para avaliar a condição anisotrópica de misturas asfálticas do tipo CA, foi simulado o comportamento do revestimento quando a permeabilidade horizontal (K_h) é dez vezes maior do que a permeabilidade vertical (K_v). Esse valor foi adotado, pois está dentro do intervalo (8,35 – 11,40) obtido por AL OMARI (2004) para misturas asfálticas com granulometrias densas. A Figura 7 apresenta o comportamento dos vetores de fluxo próximo da linha do centro do pavimento para a situação inicialmente avaliada ($K_h/K_v = 1$) e para a condição anisotrópica do material ($K_h/K_v = 10$).

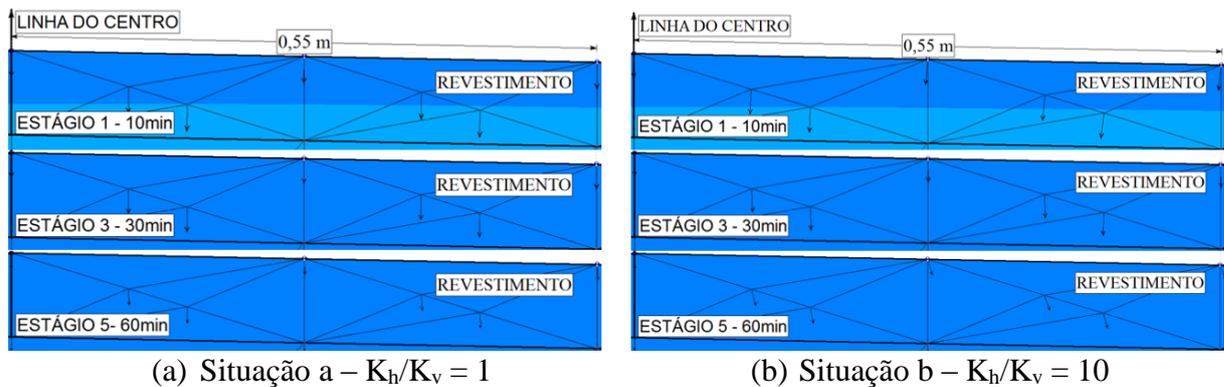


Figura 7: Comportamento dos vetores de fluxo próximo da linha de centro para a mistura asfáltica do tipo CA com 4% de Vv

Analisando a Figura 7, observa-se que para a condição isotrópica (situação a) o fluxo vertical é predominante, mesmo no estágio 5 (60min). Já para condição anisotrópica (situação b), verifica-se que depois do estágio 3 o fluxo horizontal começa a ser visualizado. Comparando a situação (a) com a situação (b), no geral, houve uma pequena redução, em média de 3%, na diferença entre a carga total no topo e na base do revestimento. Essa pequena redução na diferença entre as cargas totais foi suficiente para modificar o comportamento dos vetores no estágio 5 (60min). Dessa forma, verificou-se que mesmo considerando a permeabilidade horizontal como sendo dez vezes maior do que a permeabilidade vertical, o fluxo na direção vertical continua predominante. Entretanto, observou-se que na condição anisotrópica, o sistema tende a aumentar o grau de saturação em um menor tempo, pois nessa situação a permeabilidade na direção horizontal é maior, como consequência, a quantidade de água dentro do sistema aumenta em um tempo menor. Desse modo, o fluxo na direção horizontal surge antes do que surgiria se a camada fosse considerada isotrópica

4.2. Mistura Asfáltica do Tipo AA

A análise de fluxo para a mistura asfáltica do tipo AA para os dois Vv analisados foi semelhante, pois a permeabilidade é praticamente a mesma para os dois casos estudados, como pode ser observado na Tabela 1. Na Figura 8, verifica-se que o comportamento dos resultados para a

mistura asfáltica do tipo AA com 7% de Vv é o mesmo observado anteriormente para a mistura do tipo CA. À medida que o tempo aumenta, a diferença entre a carga total no topo e na base do revestimento diminui, isto é, a quantidade de água fluindo verticalmente diminui com o tempo. A ordem de grandeza da permeabilidade para a AA para os dois Vv avaliados é a mesma observada para o CA com 4% de Vv. Apesar de possuir a mesma ordem de grandeza (10^{-7} m/s), a AA apresenta permeabilidade menor (quatro vezes menor) se comparada a mistura do tipo CA.

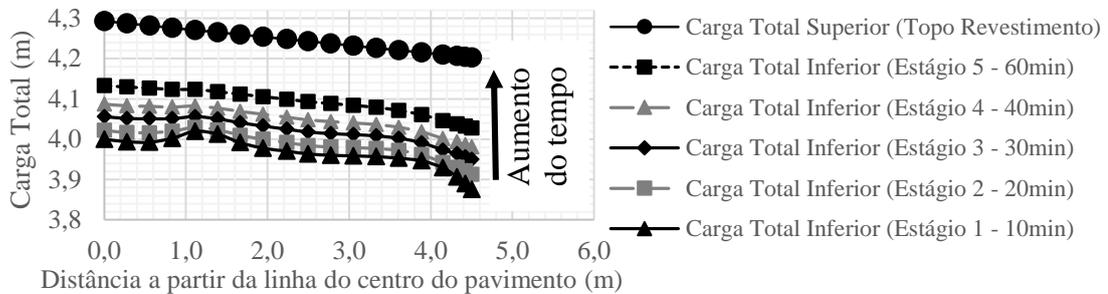


Figura 8: Variação da carga total a partir da linha de centro do pavimento para a mistura do tipo AA com 7% de Vv

Além disso, analisando os resultados das Figuras 8 e 5a, observa-se que a diferença entre a carga total inferior no último estágio avaliado (estágio 5 – 60min) e no topo do revestimento é maior para a AA (mistura com menor permeabilidade). Isto significa que a baixa permeabilidade faz com que o material demore mais para saturar, tornando o fluxo vertical predominante por um maior tempo. Do contrário, um material com permeabilidade maior, precisa de um menor tempo para saturar. Quando o material começa a saturar, o fluxo horizontal começa a ser observado. Dessa forma, na situação inicialmente avaliada (condição isotrópica), para as misturas asfálticas com baixa permeabilidade (AA e CA), o fluxo na direção horizontal somente será observado com um tempo superior a 60min. Já para as misturas asfálticas com elevada permeabilidade, caso das misturas asfálticas com granulometria aberta, o comportamento é diferente, como será abordado adiante.

Considerando a condição anisotrópica para a mistura asfáltica do tipo AA, foi simulado o mesmo caso analisado anteriormente ($K_h/K_v = 10$). Para esse tipo de mistura, não foi observado fluxo na direção horizontal mesmo no estágio 5 (60 min). Dessa forma, para verificar a partir de que momento o fluxo na direção horizontal começa a surgir, foram testados outros estágios (200, 300 e 400min). Verificou-se que para a AA, mesmo considerando a permeabilidade horizontal como dez vezes maior, o fluxo na direção horizontal somente tende a surgir depois de 300 minutos, isto é, o material tende a saturar depois de 300 minutos. Além disso, foram testados outros valores da relação entre as permeabilidades horizontal e vertical. Foi observado que quando essa relação é acima de 50, o fluxo na direção horizontal surge antes, a partir de 100 minutos.

4.3. Mistura Asfáltica do Tipo CPA

Para analisar o fluxo no revestimento composto por CPA, a espessura do revestimento foi modificada. Considerou-se um revestimento com espessura igual a 10cm, sendo 4cm de CPA e 6cm de CA, pois quando utilizam-se misturas asfálticas do tipo CPA, é necessária uma camada abaixo da mesma com uma permeabilidade inferior. Em termos de dados de entrada no programa, foi utilizada a permeabilidade do CA com 4% de Vv, já para a CPA foi utilizado o

valor de permeabilidade obtido para o V_v de 20%. Para a CPA com V_v de 23%, os resultados foram semelhantes aqueles observados para mistura asfáltica com V_v de 20%.

Para avaliar o comportamento da carga total na camada de revestimento, diferentemente dos dois casos apresentados anteriormente, será observado a carga total no topo do revestimento (sobre a superfície da CPA), no encontro da CPA com o CA e no fim do revestimento (base do CA). Vale ressaltar que a principal função da CPA é retirar o excesso de água proveniente da chuva da superfície do pavimento. Dessa forma, o objetivo da CPA é justamente eliminar a lâmina d'água da superfície do pavimento. A Figura 9 apresenta o comportamento da carga total nos três segmentos analisados para os estágios 1 (10 min) e 5 (60 min).

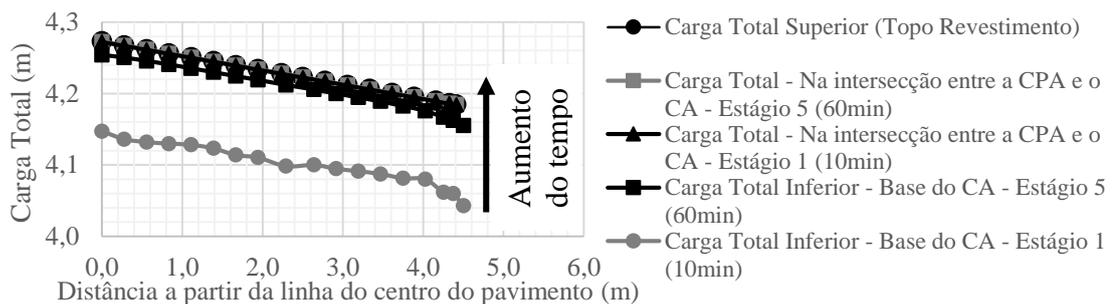


Figura 9: Variação da carga total a partir da linha de centro do pavimento para a mistura do tipo CPA com 20% de V_v – Estágio 1 (10min) e Estágio 5 (60min)

Para a CPA a carga total no topo do revestimento e na intersecção da CPA com o CA é praticamente a mesma, tanto no estágio 1 (10min) quanto no estágio 5 (60min). Isto significa que a maior parte da água já está fluindo horizontalmente com apenas 10min. Dessa forma, observa-se claramente que a CPA realiza sua principal função de coletar a água e rapidamente escoar lateralmente a mesma para o sistema de drenagem do pavimento. A condição anisotrópica também foi simulada no revestimento composto por CPA. A razão entre as permeabilidades horizontal e vertical foi considerada igual a três para a subcamada de CPA. Já para a subcamada de CA que se encontra abaixo da CPA a razão considerada foi igual a dez. A Figura 10 apresenta o comportamento dos vetores de fluxo próximo a linha de centro do pavimento para a situação inicialmente avaliada ($K_h/K_v = 1$) e para a condição anisotrópica do material (CPA: $K_h/K_v = 3$ e CA: $K_h/K_v = 10$).

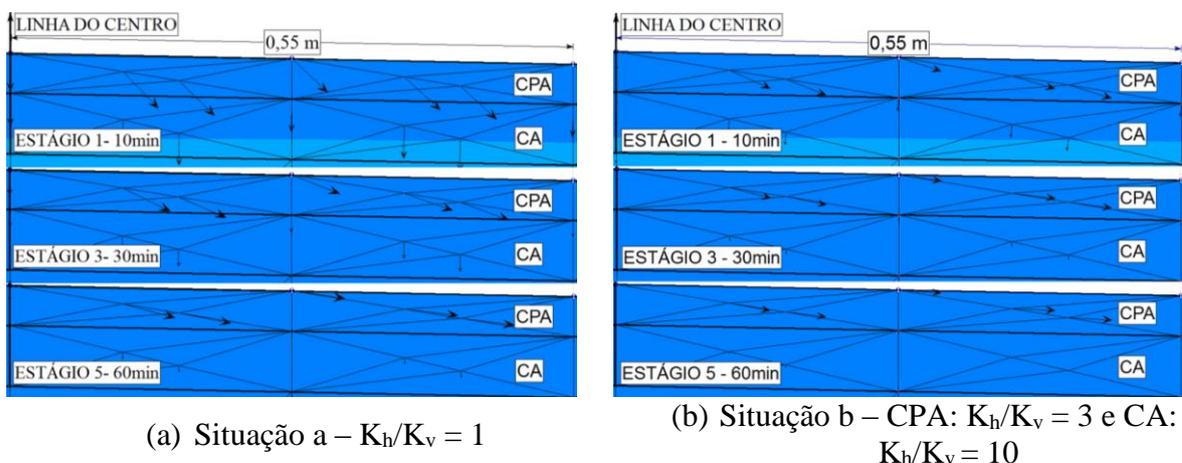


Figura 10: Vetores de fluxo próximo da linha do centro para um revestimento composto por uma subcamada de CPA (20% de V_v), e por uma subcamada de CA (4% de V_v)

O valor da razão igual a três, para a mistura do tipo CPA, foi adotada pois está dentro do intervalo (1,65 – 4,02) obtido por AL OMARI (2004) para misturas asfálticas com granulometrias abertas. Dessa forma, analisando os resultados apresentados na Figura 10, observa-se, tanto para a situação (a) quanto para a situação (b) que o tamanho dos vetores na subcamada de CPA é praticamente o mesmo em todos os estágios avaliados, isto é, o fluxo horizontal é praticamente constante nessa camada. Já no CA, os vetores indicam fluxo vertical, que diminui de intensidade com o tempo. Dessa forma, observam-se padrões de fluxo diferentes dentro da camada de revestimento. Na subcamada de CPA o fluxo é horizontal, enquanto na subcamada de CA o fluxo é vertical. Na condição anisotrópica, o fluxo na direção vertical na subcamada de CA tende a desaparecer, isto é, a maior parte do fluxo na camada de revestimento passa a ser totalmente na direção horizontal dentro da subcamada de CPA.

A variação da permeabilidade dentro do revestimento, saindo de uma subcamada com maior permeabilidade ($K = 1,07 \times 10^{-4} \text{m/s}$) na superfície (CPA) até uma subcamada (CA) de menor permeabilidade ($K = 8,82 \times 10^{-7} \text{m/s}$) força um fluxo horizontal na parte mais permeável do revestimento. Esse comportamento observado na CPA indica que em um revestimento não somente a média da permeabilidade ajudará a entender como o padrão de fluxo ocorre neste material, pois se o revestimento apresenta permeabilidade diferente no topo, no meio e na base, o padrão de fluxo será diferente se for considerada apenas a permeabilidade média do material.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi utilizado um programa (Slide 6.0), comumente utilizado para análise de percolação em materiais granulares, para realizar análises de fluxo em uma seção hipotética de um pavimento flexível. A seção hipotética, bem como as características dos materiais de base e do subleito foram mantidas constantes. A partir de diferentes tipos de revestimentos foi observado o comportamento do padrão de fluxo, mantendo-se uma lâmina d'água de 3mm sobre a superfície do revestimento. Observou-se que quanto maior for a permeabilidade do revestimento maior também deverá ser o fluxo na direção horizontal. Materiais com baixa permeabilidade (CA e AA) apresentaram fluxo na direção horizontal depois de um certo tempo (no mínimo acima de 60min para os casos em estudo), pois o grau de saturação na camada aumenta. Nesse ponto, o fluxo horizontal tende a surgir. Para o caso da mistura asfáltica do tipo CPA, o revestimento foi dividido em uma camada de 4cm de CPA e outra camada de 6cm de CA. O resultado dessa análise serviu para constatar que o padrão de fluxo no revestimento depende não somente da média da permeabilidade, mas sim de como a permeabilidade está distribuída nas diversas partes da camada, como por exemplo no topo, no meio e na base do revestimento. Dessa forma, para entender como ocorre o padrão de fluxo no material é importante compreender como a permeabilidade pode estar variando nas diversas partes do mesmo. Nesse contexto, como a permeabilidade é diretamente influenciada pela distribuição dos vazios interconectados, entender como esses vazios estão distribuídos pode ajudar a compreender o padrão de fluxo no interior do material. Quando a condição anisotrópica foi simulada, verificou-se que o fato da permeabilidade horizontal ser maior do que a permeabilidade vertical contribuiu para aumentar o grau de saturação da camada em um menor tempo, pois, nessa situação a água terá maior facilidade de fluir na direção horizontal. Desse modo, foi observado que a componente horizontal do fluxo surge antes do que surgiria se a camada fosse considerada isotrópica.

Diante dos resultados obtidos no presente estudo, sugere-se determinar o coeficiente de permeabilidade de uma camada de revestimento em três partes: no topo, no meio e na base.

Além disso, seria interessante obter o coeficiente de permeabilidade horizontal dos materiais estudados nessa pesquisa, pois todas as análises da condição anisotrópica foram realizadas considerando valores encontrados na literatura. Sugere-se também tentar correlacionar o padrão de fluxo com o dano por umidade no material e verificar como a presença da lâmina d'água (e a consequente eliminação da mesma) pode afetar a segurança viária.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP/DET/UFC) pelo apoio operacional concedido e ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro e ao segundo autores. Além disso, os autores agradecem ao grupo de geotecnia do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA/UFC, pelo fornecimento da licença para utilização do programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-OMARI, A.A.M. (2004) Analysis of HMA Permeability through Microstructure Characterization and Simulation of Fluid Flow in X-ray CT Images. Tese de Doutorado, Texas A&M University, Texas.
- CHAVES, F.J. (2010) Estudo de Misturas de Areia Asfalto a Frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará – Contribuição ao Método de Dosagem. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- ELLIS, W.H.; SCHMIDT, R.J. (1960) A Method for Measuring the Air Permeabilities of Asphalt Concrete Pavements. Road and Paving Session, ASTM, Atlantic City, New Jersey.
- FALCÃO, P.R.F. (2007) Estudo das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de Concretos Asfálticos para Aplicação em Barragens. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília – UNB, Brasília, DF.
- FERREIRA, W.L.G. (2013) Avaliação da Permeabilidade de Misturas Asfálticas com Diferentes Granulometrias. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) Groundwater. 3 Ed., Prentice Hall, London, UK.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Airport Service Manual: Pavement Surface Conditions (DOC 9132, part 2.) 4 ed. Montreal: ICAO (2002).
- KUTAY, M.E, AYDILEK, A.H., MASAD, E. (2007) Estimation of Directional Permeability of HMA Based on Numerical Simulation of Micro-scale Water Flow. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 2001, p. 29-36, Washington, D.C.
- MASAD, E.; BIRGISSON, B.; AL OMARI, A.; COOLEY, A. (2002). Analysis of Permeability and Fluid Flow in Asphalt Mixes. *In*: 82th Annual Meeting Transportation Research Board, USA.
- NASCIMENTO, R.R. (2005) Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação: uma Alternativa para o Estado do Acre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- OLIVEIRA, C.G.M. (2003) Estudos de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF.
- PINTO, C.S. (2002) Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 2ª Ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP.
- PRADO, L.A., PALMA, G. (2012) Metodologia Analítica para Estimativa da Lamina D'Água em Pavimentos Aeroportuários. Revista Conexão SIPAER, No. 2, Vol. 3, p. 38-65, Brasília, D.F.
- SILVA, C.E.B.D. (2005) Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- SOUZA, S.A. (2008) Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água em Mistura Asfáltica Drenante: Proposta de Ensaio de Laboratório. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- ZHANG, Y.; LUO, R.; LYTTON, R. (2012) Anisotropic Viscoelastic Properties of Undamaged Asphalt Mixtures. Journal of Transportation Engineering, Vol. 138, No. 1, p. 75-89.

Wellington Lorrán Gaia Ferreira (wlorrán@hotmail.com)

Verônica T.F. Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Francisco Chagas da Silva Filho (fchagas@ufc.br)

Departamentos de Engenharia de Transportes e de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Engenharia Civil/UFC
Campus do Pici, s/n Blocos 703 e 713 – Fortaleza, CE, Brasil