

AVALIAÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA EM FERROVIAS COM DIFERENTES SOLUÇÕES PARA SUBLASTRO

Renan Santos Maia

Daianne Fernandes Diógenes

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

Na estrutura ferroviária, dentre as funções da camada de sublastro, estão a proteção do solo da plataforma e a minimização do bombeamento de finos para a camada de lastro. Quanto às formas de melhoramento dessas funções, um dos enfoques de maior destaque é a incorporação de misturas asfálticas em substituição total ou parcial à camada de sublastro granular. Neste trabalho, misturas asfálticas para aplicação em camadas de sublastro foram dosadas e tiveram suas permeabilidades avaliadas para diferentes valores de volume de vazios e formas de compactação. A partir disso, foi simulado o fluxo de água em estruturas ferroviárias com a adoção de diferentes soluções para a camada de sublastro. Constatou-se que a prevenção oferecida pelo sublastro betuminoso ao bombeamento de finos ao lastro representa um fator essencial para a eficiência de drenagem da estrutura ferroviária.

ABSTRACT

In the railway structure, among the functions of the sub-ballast layer are the protection of the platform soil, and the minimization of the fine aggregates' pumping to the ballast layer. Concerning ways of improving these functions, one of the most prominent approaches is the incorporation of asphalt mixtures for total or partial replacement of the granular sub-ballast layer. In this work, asphalt mixtures for application in sub-ballast were designed and had their permeabilities evaluated for different values of volume of voids and compaction methods. From this, it was simulated the water flow in railway structures with the adoption of different solutions for the sub-ballast layer. It was verified that the prevention offered by the bituminous sub-ballast to the pumping of fines to the ballast represents an essential factor for the drainage efficiency of the railway structure.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil possui a base de sua economia na exportação de commodities; tem-se um grande desafio, portanto, quanto às grandes distâncias que são percorridas no transporte das regiões produtoras para os portos, de onde tais produtos são levados para o exterior. Para que a competitividade do país em escala global aumente, faz-se necessária a redução de custos no transporte desses produtos (de baixo valor agregado, elevados volume e tonelagem, e transportados ao longo de grandes distâncias), destacando-se o modo ferroviário no cumprimento desse objetivo (CNT, 2015). O país, entretanto, possui grandes desafios à consolidação do modo ferroviário como uma alternativa logística para alavancar o seu desenvolvimento econômico.

Segundo pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte – CNT (2015), a operação da infraestrutura ferroviária existente apresenta muitos gargalos. Tal pesquisa expõe que 41,1% dos clientes das ferrovias concessionadas julgam baixa a qualidade da infraestrutura ferroviária em geral, acentuando-se dados que demonstram a persistência de velocidades operacionais reduzidas em diversos trechos. A conclusão desta pesquisa mostrou a necessidade de expandir a malha existente, de superar os atuais gargalos e de adequar a infraestrutura aos desafios logísticos que serão impostos ao país.

Muitas modificações tecnológicas ao curso da história contribuíram para a melhoria do desempenho dessas estruturas, entretanto pouco foi mudado em relação às camadas granulares que compõem a estrutura das vias férreas desde o século XX. Tal situação entra em conflito com os novos objetivos desse modo de transporte, que requer soluções que permitam avanços em termos de velocidade e de cargas transportadas, com menores custos de manutenção.

Diversos estudos brasileiros recentes dedicaram atenção às camadas granulares utilizadas em ferrovias, propondo um foco maior na camada de lastro (Klincevicus, 2011; Merheb, 2014; Vizcarra, 2015; Diógenes, 2016; Paim da Silva, 2018).

A camada de sublastro também requer destaque, por cumprir importantes funções na estrutura de ferrovias. Rose *et al.* (2011) caracterizam o sublastro como camada composta por agregados tipicamente disponíveis a nível local, cuja granulometria possui partículas mais miúdas em relação àquelas utilizadas em lastro, compactadas na umidade ótima para atingir um reduzido Volume de vazios (Vv), reduzindo-se também a permeabilidade da camada. As funções da camada de sublastro são promover a sustentação mecânica da camada de lastro, dissipar as cargas oriundas do tráfego, além de impermeabilizar o solo da plataforma e minimizar o fenômeno do bombeamento de finos. Formas de melhoramento dessas funções são objetos cada vez mais frequentes em estudos internacionais, sendo um dos enfoques de maior destaque a incorporação de misturas asfálticas na camada de sublastro, em substituição total ou parcial à camada de sublastro granular (Rose e Bryson, 2009; Teixeira *et al.*, 2009; Cardona, 2016).

Desde o início dos anos 1980, a indústria ferroviária dos Estados Unidos utiliza misturas asfálticas usinadas a quente na composição da estrutura como uma das camadas de suporte. Essa técnica também já foi aplicada em outros países, com o intuito de melhorar a qualidade e aumentar a vida útil da estrutura. Essa concepção ganhou mais destaque mundialmente nas vias destinadas ao transporte de cargas de elevada tonelagem e, especialmente na Europa, no desenvolvimento de linhas de alta velocidade para transporte de passageiros (Rose *et al.*, 2011).

Quando se analisa o desempenho de misturas asfálticas no Brasil, manifestações patológicas recorrentes estão relacionadas ao dano provocado pela umidade. O sublastro está posicionado abaixo da camada de lastro, que apresenta elevada permeabilidade, e é constantemente exposto à ação da água, justificando-se investigar a ação da umidade no comportamento dessa camada quanto à proteção das camadas inferiores, bem como quanto à eficiência de drenagem em comparação às soluções mais tradicionais. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o fluxo de água em estruturas ferroviárias com diferentes soluções para a camada de sublastro, especialmente na incorporação de misturas asfálticas em substituição ao sublastro granular.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sublastros Betuminosos

Teixeira *et al.* (2009) citam como uma das soluções viáveis à redução dos custos de manutenção em ferrovias a adoção de uma camada com material mais rígido e durável em substituição à camada de sublastro granular. Diversas referências mostram que misturas asfálticas usinadas a quente incorporadas em ferrovias promovem suporte adicional à estrutura da via, reduzindo as tensões transmitidas ao subleito, além de melhorar a eficiência da drenagem em direção aos corpos coletores e de contribuir para a manutenção da geometria inalterada (Rose *et al.*, 2010). Internacionalmente, não há definição consensual quanto à dosagem dessas misturas, entretanto, dá-se caráter essencial para que a estrutura consiga cumprir os objetivos propostos ao reduzido Vv, entre 1 e 3% (Hensley e Rose, 2000), além de uma granulometria densa (Hensley e Rose, 2000; LNEC, 2010; Di Mino *et al.*, 2015).

2.2. Estudos de permeabilidade em sublastros

Em geral, para o cumprimento de requisitos de drenagem subsuperficial para sublastros, são propostos dois critérios, um relativo à espessura da camada, para que seja evitada a saturação do material, e outro relativo ao tempo de drenagem após o término das precipitações, com base na Lei de Darcy e no modelo de Casagrande e Shannon (Suzuki *et al.*, 2013). Diversos estudos

incorporam a avaliação da permeabilidade para a caracterização de materiais para aplicação em camada de sublastro. Von der Osten (2012) avaliou o potencial de aplicação, como sublastro, de solos lateríticos e não-lateríticos presentes na região da Estrada de Ferro Carajás. Para solos lateríticos argilosos, observou-se uma variação de coeficiente de permeabilidade (k) da ordem de 10^{-7} a 10^{-5} m/s. Já para solo não-laterítico arenoso, um k da ordem de 10^{-4} m/s foi obtido. O fluxo de água na camada de sublastro granular e, conseqüentemente, o seu potencial de saturação e de alteração da umidade do subleito dependem, entretanto, de fatores que vão além do k do material, tais como a limpeza do lastro influenciam no regime de escoamento no qual a água atinge a camada de sublastro, daí a percepção de complexidade do fenômeno.

2.3. Estudos de permeabilidade em misturas asfálticas

A permeabilidade de misturas asfálticas é objeto de diversos estudos nacionais e internacionais por ser uma característica importante para o desempenho de estruturas, especialmente porque a água pode desencadear efeitos deletérios no desempenho de materiais asfálticos. No caso do sublastro betuminoso, considera-se importante que essa análise seja realizada, uma vez que o lastro (camada imediatamente acima do sublastro) possui alta capacidade drenante, devido à elevada permeabilidade, o que tende a expor a mistura asfáltica à combinação de cargas estáticas e dinâmicas com a presença da água. Um dos requisitos esperados das misturas asfálticas utilizadas como sublastro é a impermeabilidade, que, segundo Rose e Souleyrette (2014), é atingida através da redução do Vv da mistura a valores abaixo de 3,0%.

O Vv de uma mistura asfáltica afeta significativamente à permeabilidade, porém essa relação não é sempre suficiente para descrever como os vazios estão distribuídos na mistura asfáltica. O tamanho dos vazios e a conectividade entre eles é fundamental para a caracterização da capacidade drenante da estrutura (Caro *et al.*, 2008). O estudo conduzido por Ferreira (2015) se baseou no critério de Brown *et al.* (2004) para estabelecimento de limites aceitáveis de k para misturas asfálticas. Observou-se que, apesar dos resultados obtidos encontrarem-se abaixo do valor máximo estabelecido ($1,25E-5$ m/s), há consideráveis Coeficientes de Variação (CV) para k , como no intervalo entre 3,5 e 4,5% de Vv. Os resultados corroboram com o estudo de Caro *et al.* (2008), porém entram em conflito com o que é proposto na literatura internacional para misturas asfálticas utilizadas como camada de sublastro, cujas características de impermeabilidade são defendidas como sendo função apenas de um reduzido Vv.

Pirozzolo *et al.* (2017) caracterizaram a permeabilidade de dois tipos de sublastros betuminosos, um Concreto Asfáltico (CA), usinado a elevadas temperaturas, e uma mistura do tipo WMA (*Warm Mix Asphalt*), usinada e compactada a temperaturas menores. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em um permeâmetro de seção quadrada, de acordo com a norma europeia UNE-EN 103403:1999, utilizada para a avaliação de permeabilidade de solos. As misturas asfálticas produzidas utilizaram agregados de origem calcária e com granulometria de acordo com a norma europeia UNE-EN 13108 - 1:2007, com CAP 50/70, utilizando-se o método Marshall para dosagem (75 golpes por face), o que resultou em Vv de 2,6 e 2,7% para CA e WMA, respectivamente. Os resultados mostraram materiais com valores de k abaixo do valor máximo sugerido de 10^{-6} m/s.

2.4. Estudos de fluxo de água em pavimentos asfálticos

2.4.1. Conceito de fluxo de água

O conceito de fluxo parte do princípio de que a água se movimenta de um ponto de maior a um de menor gradiente hidráulico de pressão (carga total), conceito definido a partir da soma de três componentes de energia: a gravitacional, a hidráulica e a cinética. A primeira parcela faz referência à posição dos pontos em relação a uma cota de referência, a segunda é uma função

da pressão do fluido no meio e a terceira uma função da velocidade do escoamento. Em meios como solos compactados e misturas asfálticas, o fluxo de água considera apenas as duas primeiras parcelas, uma vez que a velocidade do escoamento é desprezível. Assim, a definição de gradiente hidráulico, ou carga total, pode ser assumida como:

$$h = z + \frac{u_w}{\rho_w + g} \quad (1)$$

Sendo h a carga total (m), z a cota do ponto em relação a um referencial definido (m), u_w uma referência à pressão gerada pela água no ponto (kPa), ρ_w a densidade da água e g a aceleração da gravidade (m/s^2). Considerando o fluxo ocorrendo em duas direções (bidimensional) – horizontal e vertical, partindo-se da Lei de Darcy, pode-se definir a equação de Laplace para fluxos bidimensionais, sendo k_x e k_z as permeabilidades do meio em referência a eixos perpendiculares (unidade de espaço/unidade de tempo):

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Dois fatores podem tornar a análise do fluxo de água mais complexa, são eles a condição de variação de gradiente hidráulico e permeabilidade de acordo com o grau de saturação do meio e a condição anisotrópica de fluxo em determinados materiais (Pinto, 2002). Há uma diferença marcante no que concerne ao fluxo de água em meios porosos não-saturados e saturados, uma vez que, nos primeiros, a carga hidráulica no meio é negativa (sucção), e nos segundos, é positiva. Além disso, existem materiais, tais como os solos compactados e as misturas asfálticas, que apresentam um comportamento diferente, no que se refere, especialmente, à permeabilidade do meio, quando em diferentes graus de saturação.

2.4.2. Modelagem e simulação de fluxo de água

A modelagem do comportamento de materiais como esses foi proposta por diversos autores (Fredlund e Rahardjo, 1993; Brooks e Corey, 1964; Van Genuchten, 1980; Ning Lu e Likos, 2004 *apud* Ferreira, 2015), sendo o modelo de Van Genuchten (1980) seguido por Ferreira (2015). O modelo de Van Genuchten visa à formulação de uma equação para a caracterização de k e do Grau de Saturação (GS) de solos em condição não saturada, a partir de valores de sucção (kPa, que é definida como a capacidade que o meio poroso possui de, por capilaridade ou osmose, ter seu conteúdo de água alterado com o tempo). O modelo pode ser traduzido em curvas características de materiais (GS *versus* sucção e k *versus* sucção), que, a partir de parâmetros de ajuste de curva (α , m e n), são comparadas e validadas a partir de dados experimentais. Diversos programas de simulação de fluxo de água a partir de Métodos de Elementos Finitos (MEF) já foram aplicados em infraestruturas de transportes, dentre eles o SEEP-W para rodovias (Masad *et al.*, 2007) e ferrovias (Tennakoon *et al.*, 2012), o CODE_BRIGHT para ferrovias (Ferreira, 2007) e o *Slide 6.0* para ambos os tipos de infraestrutura (Ferreira, 2015 e Ferreira *et al.*, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dosagem das misturas asfálticas

Para a dosagem das misturas asfálticas utilizadas como sublastro, foram observadas faixas granulométricas de referência com base em experimentos internacionais, referentes a misturas produzidas nos Estados Unidos, na Itália e em Portugal (respectivamente por Hensley e Rose, 2000; Di Mino *et al.*, 2015 e LNEC, 2010). Também foi observada a curva granulométrica utilizada no único trecho executado com sublastro betuminoso no Brasil, cedida pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP), da Universidade de São Paulo (USP). Os

limites utilizados são compatíveis com a Faixa B do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), conforme mostrado na Figura 1. O Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados foi de 19,0 mm. O ligante asfáltico utilizado foi do tipo CAP 50-70, produzido pela Lubnor/Petrobras.

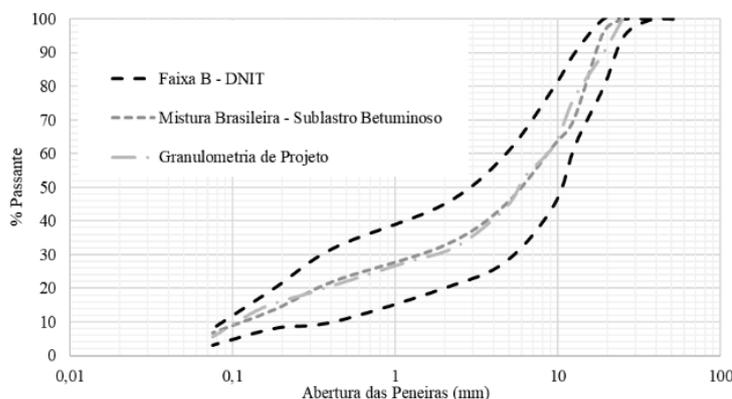


Figura 1: Granulometria de projeto para sublastro betuminoso

As misturas foram dosadas a partir dos métodos Marshall e Superpave. Para a dosagem Marshall, utilizou-se uma energia de compactação por impacto (soquete Marshall) de 75 golpes por face. Já para a dosagem Superpave, utilizaram-se 100 giros no Compactador Giratório Superpave (CGS). Obtiveram-se teores de projeto relativos a 4%, 3% e 1% de Vv. Dos teores de projeto para o Vv = 4%, foi reduzida a energia de compactação para a produção de CPs com Vv de 7%. O resultado das dosagens realizadas, com a Densidade Máxima medida para cada uma (Gmm) é exposto na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados de dosagens para misturas asfálticas utilizadas como sublastro

Tipo de Dosagem	Energia de Compactação	Vv (%)	(%) CAP	Gmm
Marshall	75 Golpes/face	4	4,7	2,479
Marshall	75 Golpes/face	3	5,5	2,449
Marshall	75 Golpes/face	1	6,9	2,399
Marshall*	28 Golpes/face	7	4,7	2,479
Superpave	100 Giros	4	4,3	2,464
Superpave	100 Giros	3	4,6	2,450
Superpave	100 Giros	1	5,3	2,416
Superpave*	20 Giros	7	4,3	2,464

* Obtidos a partir da dosagem para Vv = 4%, com menor esforço de compactação.

3.2. Estágios de avaliação de permeabilidade das misturas asfálticas

3.2.1. Estágio Recém-aplicado (Vv = 7%)

Este estágio busca avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas logo após sua compactação em campo. Para isso, utilizaram-se as misturas com Vv de 7%, obtidas a partir das misturas dosadas com teor de ligante de projeto para um Vv de 4, reduzindo-se a energia de compactação a 28 golpes por face e a 20 giros.

3.2.2. Estágio Consolidado (Vv = 1 a 4%)

Este estágio busca avaliar as misturas asfálticas quando, após determinado tempo, apresentam o Vv de projeto. Um dos objetivos dessa análise é verificar a capacidade de impermeabilização, dados os limites de Vv propostos por Rose e Bryson (2009) de 3% e 1%.

3.2.3. Estágio de Dano (Vv = 4 e 7%)

No estágio de dano, a permeabilidade será avaliada a partir da indução de ciclos de congelamento e descongelamento, que, pela contração e dilatação da amostra, induz ao

aparecimento de microfissuras internas e externas no CP. Os CPs inicialmente com 4% de vazios, serão avaliados em três estágios de dano, um não severo, que é alcançado pela colocação da amostra em banho-maria a 60°C durante 24 horas, e também dois estágios de maior severidade, um com um ciclo a -18°C por 16 horas seguido de banho-maria a 60°C por 24 horas, e o outro com dois dos referidos ciclos. A permeabilidade das amostras será avaliada nessas três condições e comparada com a média dos valores encontrados quando a amostra não sofre nenhum tipo de condicionamento. Os CPs com 7% de V_V , para simular danos no estágio inicial do uso da estrutura, serão avaliados antes e depois de um ciclo de condicionamento severo.

3.3. Ensaio de permeabilidade para misturas asfálticas

Uma vez dosadas, as misturas foram avaliadas nos diferentes estágios quanto à permeabilidade, com o intuito de descobrir o k da camada de sublastro betuminoso em diferentes condições, gerando dados que foram utilizados em simulações de fluxo. Adotou-se o método aplicado por Ferreira (2015) para a análise de permeabilidade vertical para amostras de misturas asfálticas, realizado a partir de uma adaptação da norma NBR 14545 (2000) referente à permeabilidade de solos argilosos.

3.4. Simulações de fluxo de água

As simulações de fluxo foram realizadas a partir do uso do *software* de elementos finitos *Slide6.0* já aplicado em estudos prévios (Ferreira, 2015) em infraestruturas de transporte. O principal dado de entrada consiste nas propriedades hidráulicas representadas pelos valores de permeabilidade (além de parâmetros como a anisotropia e o comportamento em estado não-saturado dos materiais que compõem as camadas da estrutura), obtidos a partir de ensaios de permeabilidade, conforme mencionado anteriormente, ou de valores contidos na literatura (que, para este estudo, será o caso dos materiais granulares). Já as condições de contorno passam pela definição da lâmina d'água sobre a estrutura e o tempo de fluxo a ser avaliado, e a geometria engloba a espessura e o posicionamento de cada uma das camadas.

3.4.1. Propriedades hidráulicas

Para o lastro granular, o sublastro granular e o subleito, as propriedades hidráulicas dos materiais foram obtidas a partir de dados encontrados na literatura (Tennakoon, 2012; Von der Osten, 2012; Ferreira, 2015; Ferreira *et al.*, 2015). Como *input*, é necessária a definição do modelo de fluxo que o material irá seguir. Os materiais que compõem o lastro granular foram simplificados a um modelo geral, que considera apenas a permeabilidade e a anisotropia do material. Isso se dá em virtude de o lastro granular possuir elevado k e a disposição dos materiais na camada nos sentidos horizontal e vertical é semelhante. Já os materiais de sublastro (granular e betuminoso) e subleito foram simulados a partir do uso do modelo de Van Genuchten (1980).

Na definição das propriedades do lastro granular, adotou-se a premissa de que a permeabilidade da camada possui $k = 0,3$ m/s no estado considerado limpo, pela análise de k para diferentes Índices de Colmatação (IC) conduzida por Tennakoon *et al.* (2012) e $k = 5,0E-05$ m/s, quando o material é considerado razoavelmente limpo, resultado obtido por Ferreira *et al.* (2015). A permeabilidade do sublastro granular foi definida com base no estudo conduzido por Von der Osten (2012), adotando-se a referência de $k = 1,36E-07$ m/s. Para a simulação de fluxo, os parâmetros de Van Genuchten relacionados ao material foram obtidos a partir da biblioteca do programa *Slide6.0*, para solo argiloso de permeabilidade semelhante. A condição anisotrópica foi baseada no estudo conduzido por Santos (2015), que avaliou a anisotropia referente à permeabilidade de solos lateríticos da região de São Carlos/SP, mostrando resultados que variavam de 4 a 8 na relação permeabilidade horizontal-vertical para solos lateríticos úmidos.

Para as misturas asfálticas, os valores de permeabilidade (k) e conteúdo de água (WC) são obtidos diretamente dos ensaios realizados. Quanto ao modelo de fluxo, os parâmetros foram os mesmos utilizados por Ferreira (2015) para misturas asfálticas densas. No caso, o ajuste do modelo de Van Genuchten fornecido ao programa se deu pela definição de $\alpha = 0,348$ e $n = 1,137$. Nas simulações de fluxo conduzidas por Ferreira (2015), para contexto rodoviário, o modelo de subleito proposto foi baseado em curvas características de sucção *versus* conteúdo de água e valores de permeabilidade desenvolvidas por Peixoto (2011). O solo proposto era uma areia argilosa tipicamente encontrada no estado de São Paulo. As curvas características foram baseadas em um valor de k no estado saturado de $1,6E-06$ m/s.

3.4.2. Geometria e condições de contorno

As diferentes propostas de seções transversais de ferrovias avaliadas neste trabalho se basearam em um seção-tipo de uma obra ferroviária em execução. Simularam-se situações de: (i) lastro diretamente apoiado sobre o subleito – ausência de sublastro, (ii) estrutura tradicional lastro + sublastro granular (20 cm e $i = 3\%$) apoiados sobre o subleito, (iii) estrutura tradicional sem inclinação no sublastro ($i = 0\%$) e (iv) lastro + sublastro betuminoso em diferentes configurações.

Para estruturas com sublastro betuminoso, definiu-se como padrão uma camada com recobrimento total do subleito, 12,5 cm de espessura e inclinação de 3%. Desejou-se avaliar a influência no fluxo de água de três parâmetros: (i) a redução da inclinação da camada de sublastro betuminoso, (ii) o aumento da espessura da camada e o efeito de (iii) uma menor cobertura do subleito pela camada asfáltica, conforme mostrado na Tabela 2 e na Figura 2.

Tabela 2: Geometrias avaliadas para estruturas com uso de camada de sublastro betuminoso

Recobrimento	Espessura (cm)	Inclinação (%)
Total	12,5	3
Total	12,5	1
Total	12,5	0
Parcial	12,5	3
Parcial	12,5	0
Total	15,0	3

Conforme proposto por Tennakoon *et al.* (2012) e Ferreira *et al.* (2015), avaliou-se uma lâmina d'água de espessura proporcional à do lastro, posicionada no topo da camada, conforme mostrado na Figura 2. No caso deste estudo, dada espessura da camada de lastro, estabeleceu-se uma lâmina d'água de 40 cm para as avaliações de fluxo. O tipo de análise realizada foi a simulação de fluxo transiente, definida como sendo o tipo de fluxo que ocorre quando as pressões no solo são variáveis ao longo do tempo, em função de condições de contorno variáveis ou mesmo em função da presença de materiais cujas permeabilidades são baixas. Para a análise aqui proposta, foram avaliados 6 estágios de tempo de escoamento da lâmina d'água: 0,25; 0,50; 1,00; 2,00; 12,00 e 24,00 horas.

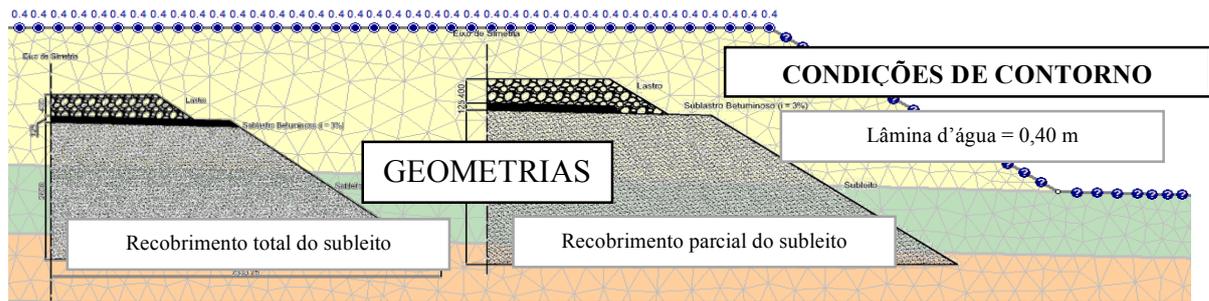


Figura 2: Exemplificação das definições de geometria e condições de contorno das análises de fluxo realizadas no *software Slide 6.0*

3.4.3. Método de avaliação da eficiência de drenagem

A avaliação do fluxo de água entre camadas se deu considerando a descarga hidráulica no “ombro” do lastro e na base inferior do sublastro (topo do subleito). Considera-se que, para uma mesma lâmina de água e mesmo tempo de avaliação de fluxo transiente, compreende-se como uma estrutura mais eficiente quanto à drenagem a que possuir menor tempo para a redução da velocidade de fluxo na lateral do lastro a 0 m/s, além de menor descarga vertical na base do sublastro, o que significa uma maior proteção do subleito à entrada de água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Permeabilidade das misturas asfálticas

Todas as misturas dosadas pelo método Marshall avaliadas no intervalo de Vv de 0 a 7% apresentaram permeabilidade média menor que o critério estabelecido por Brown *et al.* (2004) e utilizado por Ferreira (2015), de k máximo de $1,25E-05$ m/s, referente a misturas asfálticas densas utilizadas no meio rodoviário. Quanto ao critério de impermeabilidade utilizado por Pirozzolo *et al.* (2017), os CPs avaliados com Vv superiores a aproximadamente 6% não cumprem o requisito, possuindo um k médio de $4,72E-06$ m/s, mais de 4 vezes superior ao limite proposto de $1,00E-06$ m/s para sublastros ferroviários. Entretanto, tal critério foi atingido para todos os CPs em estágio consolidado. O R^2 obtido para CPs dosados e compactados de acordo com o método Superpave foi de 0,62 (no caso dos CPs Marshall, foi de 0,64). Entretanto, no que se refere à permeabilidade em si das misturas asfálticas, pode-se observar que amostras com Vv de 4% de Vv já começaram a apresentar valores de k superiores ao limite de $1,0E-06$ m/s (Pirozzolo *et al.*, 2017), porém todos os CPs avaliados apresentaram k menor que $1,25E-05$ m/s proposto por Brown *et al.* (2004), conforme pode ser visto na Figura 3.

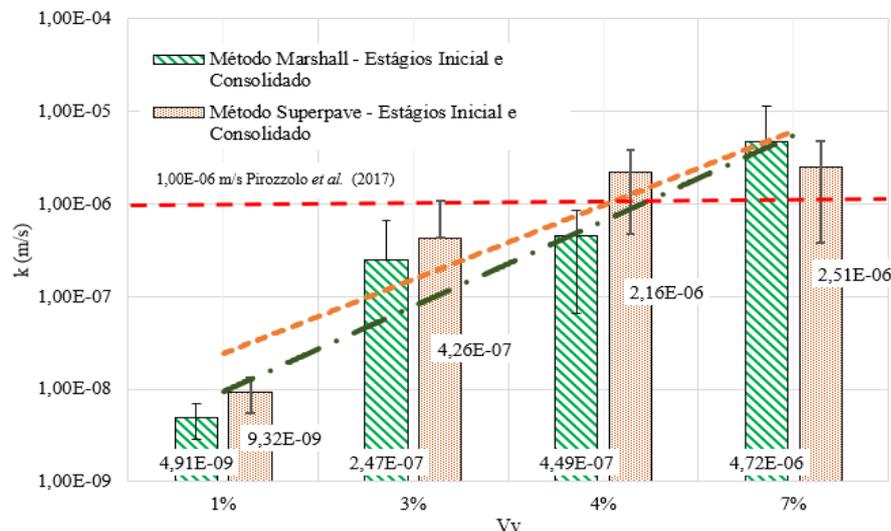


Figura 3: Média e desvio padrão para os resultados dos ensaios de permeabilidade

A análise estatística para verificar a diferença entre permeabilidades de CPs no estágio de aplicação (Vv de aproximadamente 7%), com 95% de confiança, indica a não rejeição da hipótese de que as permeabilidades das misturas são iguais para os métodos Marshall e Superpave, seja para as avaliações dos mesmos antes, seja para depois da indução de ciclos de dano por congelamento e descongelamento. Todas as estatísticas de teste *t-Student* foram inferiores ao $t_{critico}$ necessário à rejeição das hipóteses de igualdade. Quanto aos valores de permeabilidade obtidos para o estágio consolidado nos diferentes métodos de compactação, com Vv entre 1 e 4%, a análise do $valor-p = 9,4\%$ em testes de hipóteses com 95% de confiança permite afirmar que, neste caso, existe uma maior diferença entre os valores de permeabilidade obtidos, por mais que tais indícios ainda não sejam suficientes para a rejeição da hipótese de igualdade entre médias de k para os diferentes métodos. Quanto à análise da indução de dano por meio de ciclos de congelamento e descongelamento, a análise estatística realizada também mostra que não há indícios suficientes para se afirmar que o procedimento foi suficiente para a alteração dos valores de permeabilidade dos CPs, indicando que métodos alternativos, como a aplicação de cargas, seriam mais adequados para que se provocasse uma relevante alteração de permeabilidade.

4.2. Fluxo de água

A ausência de uma camada de sublastro é prejudicial ao fluxo de água nas camadas de fundação da estrutura ferroviária. A infiltração de água no subleito ocorre rapidamente quando não há sublastro na estrutura e a drenagem é deficiente, comparando-se ao caso da existência de sublastro granular com 20 cm de espessura e inclinação transversal de 3%. Na Figura 4, observa-se que a penetração de água no subleito é imediata quando da ausência de sublastro, e em 30 minutos, a carga hidráulica máxima chega aos 0,40 m, indicando que o solo poderia atingir maior GS, levando a deformações excessivas e elevando o risco de acidentes.

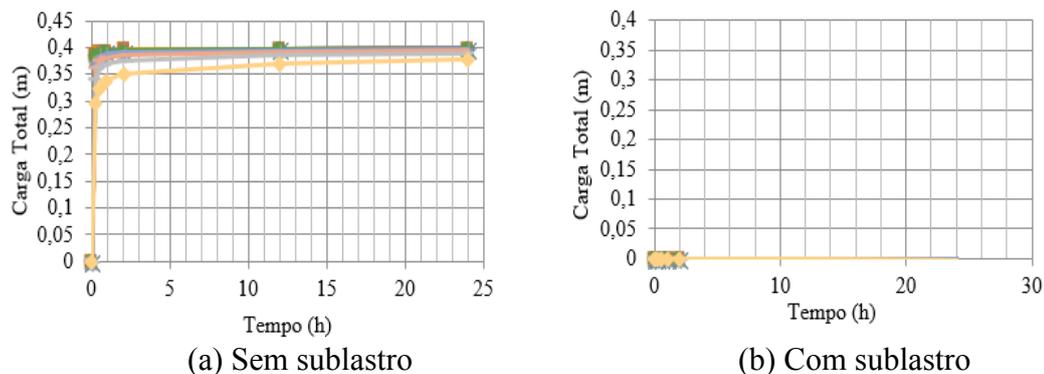


Figura 4: Carga hidráulica no topo do subleito

Considerando uma estrutura com sublastro granular presente na proteção do solo de fundação, diferentes condições de limpeza ($k_s \text{ limpo} = 0,3 \text{ m/s}$ e $k_s \text{ razoavelmente limpo} = 0,00005 \text{ m/s}$) foram avaliadas. Como observado na Figura 5, o tempo necessário para a drenagem da coluna d'água de 0,40 m na condição de maior colmatação é 4 vezes maior do que aquele observado na condição limpa, dada a referência de tempo até o fluxo nulo na lateral do lastro.

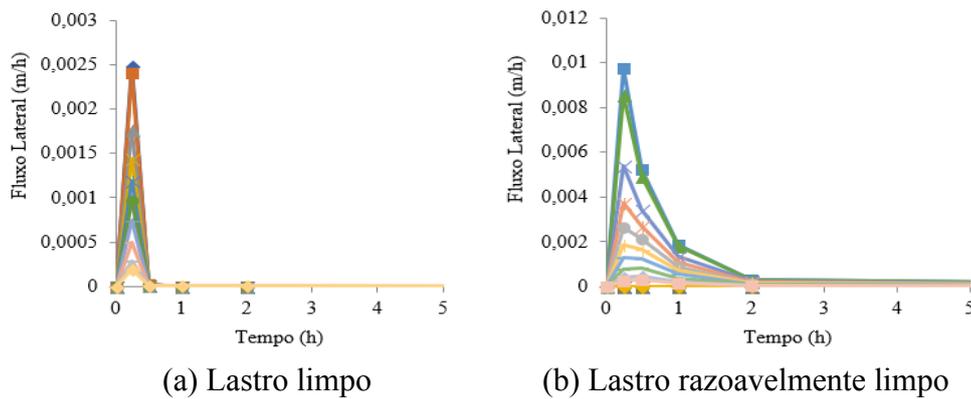


Figura 5: Tempo de drenagem para diferentes graus de colmatação do lastro

Quanto às estruturas com sublastro betuminoso, avaliando-se o topo do subleito, observou-se que o fluxo foi menor quanto menor foi a permeabilidade, dado o fato de este ser o fator mais importante para a capacidade de impermeabilização do subleito. As misturas com 4 e 3% de Vv não apresentaram variação de ordem de grandeza de seus valores de k (na ordem de 10^{-7} m/s) e o fluxo de água no topo do subleito, para esses casos, apresentou valor de aproximadamente 10^{-4} m³/h, 10 vezes menor que o fluxo no estágio recém-aplicado da mistura asfáltica (Vv = 7%). Um fato interessante quanto à estrutura granular está em seu comportamento em estado não-saturado, muito diferente das estruturas asfálticas. Na estrutura granular, nos minutos iniciais de avaliação do fluxo transiente, em virtude da maior capacidade de sucção do material granular em relação ao material asfáltico, a tendência do fluxo é ascendente, da ordem de 10^{-8} a 10^{-7} m³/h, oposta à apresentada por estruturas com sublastro betuminoso.

Observou-se que o aumento da espessura da camada de sublastro betuminoso, para as condições simuladas, não resultou em alteração do fluxo em relação às soluções com sublastro de espessura de 12,5 cm. Além disso, a adoção de uma camada de sublastro betuminoso de maior espessura implicaria em um aumento relevante do custo inicial da obra. Quanto à inclinação transversal da camada asfáltica, observou-se que a influência na qualidade da drenagem é irrelevante se comparada à proporcionada pela redução da colmatação do lastro. Quando a camada de sublastro betuminoso não cobre totalmente a superfície superior do subleito, observa-se um fluxo 49 vezes maior e maior carga hidráulica no solo da fundação da ferrovia no trecho não recoberto. Entretanto, observando-se os valores de carga total ao longo do topo do subleito, conclui-se que tais valores no centro da estrutura (zona mais próxima dos pontos de aplicação de cargas) são similares aos atingidos com total recobrimento, conforme exposto na Figura 6.

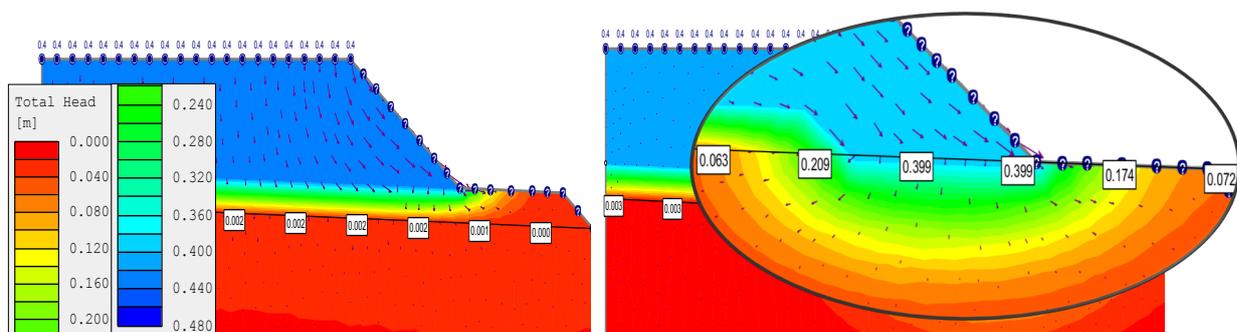


Figura 6: Vetores de fluxo para (esquerda) recobrimento total do subleito pelo sublastro betuminoso e (direita) recobrimento parcial do subleito pelo sublastro betuminoso

5. CONCLUSÕES

A adoção de soluções como o sublastro betuminoso para estruturas de ferrovias tem se tornado mais comum, dadas as diversas demandas desse modo de transporte quanto às cargas transportadas e às velocidades alcançadas com o aumento da tecnologia. Em geral, é comum a classificação de estruturas de Concreto Asfáltico (CA) como sendo impermeáveis, entretanto, sabe-se que essa simplificação não é condizente com o comportamento real desse material. Observou-se que a permeabilidade das misturas num estágio inicial (após a aplicação), simulado com um Vv mais elevado, apresentou valores considerados superiores ao limite de 10^{-6} m/s, o que torna, no que se refere ao fluxo de água, a estrutura betuminosa, em um primeiro momento, mais suscetível a provocar alterações nas propriedades hidráulicas da fundação da estrutura ferroviária (subleito) e também mais susceptíveis a ações deletérias oriundas da umidade. Os métodos de compactação, que resultam em diferentes estruturas do esqueleto mineral de misturas asfálticas, podem alterar as condições de conexão e tamanho dos vazios, provocando, em diversas ocasiões, elevada variação. Assim sendo, as variações observadas para diferentes Vv não permitem a definição de um valor de Vv máximo específico para o bom desempenho da estrutura no que se refere à permeabilidade e ao fluxo de água.

Avaliando-se as diferentes soluções para sublastros a partir do fluxo de água, ficou demonstrada a importância da camada de sublastro para a qualidade da drenagem e da proteção do subleito, além de que a qualidade da drenagem de uma estrutura ferroviária é mais sensível à variação do índice de colmatação do lastro do que aos aspectos relacionados à geometria e à volumetria de sublastros considerados apropriados para tal uso. A colmatação do lastro resultou em um tempo de drenagem 300% superior aos avaliados para todas as soluções de sublastro avaliadas, com diferentes geometrias e permeabilidades. Quanto ao uso de misturas asfálticas como camada de sublastro e o fluxo de água nessas condições, observou-se que, no caso dos parâmetros avaliados pelo modelo selecionado, o fluxo de água tende a variar numa proporção semelhante à variação do k das misturas asfálticas, não sendo verificada uma influência considerável no aumento da espessura e da inclinação da camada para a impermeabilização do subleito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2000) *NBR 14545: Solos – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável*. Rio de Janeiro, RJ.
- Brown, E. R.; Hainin, M. R.; Cooley, A.; Hurley, G. (2004) *NCHRP. National Cooperative Highway Research Program (TRB): Relationship of Air Voids, Lift Thickness, and Permeability in Hot Mix Asphalt Pavements. Report 531*.
- Cardona, D. R. (2016) *Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures*. Tese de Doutorado - L'Université de Lyon, Lyon.
- Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D. N. (2008) Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures - Part 1: Mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.9, n.2, p.81–98. DOI: 10.1080/10298430701792128
- CNT (2015) *Pesquisa CNT de Ferrovias*. Brasília, DF.
- DNIT (2006) *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, RJ.
- Di Mino, G.; Di Liberto, M.; Noto, S.; Soto, F. M. (2015) The Resistance to Fatigue of Dry Asphalt Rubber Concrete for Sub-Ballast Layer. DOI: 10.13140/RG.2.2.11104.89606
- Diógenes, D. F. (2016) *Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados utilizados em Lastro Ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Ferreira, T. M. (2007) *Influence of Incorporating a Bituminous Sub-Ballast Layer on the Deformations of Railway Trackbed*. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- Ferreira, W. L. G. (2015) *Análise do Fluxo D'água em Revestimentos Asfálticos com Diferentes Permeabilidades*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

- Ferreira, W. L. G.; Costa, S. L.; Castelo Branco, V. T. F.; Motta, R. S. (2015) Análise Experimental e Numérica da Capacidade Drenante de Diferentes Lastros Ferroviários. In: *XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*. Ouro Preto, MG.
- Hensley, M.; Rose, J. G. (2000) Design, Construction and Performance of Hot Mix Asphalt for Railway Trackbeds. In: *1st World Conference of Asphalt Pavements*.
- Klincevicus, M.G.Y. (2011) *Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários*. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- LNEC (2010) *Optimization of High-Speed Railway Track Using Bituminous Sub-Ballast - Progress Report of Project PDTC / ECM / 70571 / 2006-2009*. Lisboa.
- Masad, E.; Al Omari, A.; Chen, H. (2007) Computations of Permeability and Anisotropy of asphalt Concrete Based on Microstructure Simulation of Fluid Flow. *Computational Materials Science*, No. 40, p. 449-459, Washington. DOI: 10.1016/j.commatsci.2007.01.015
- Mendes, S. F. (2011) *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infra-estruturas de Transportes*. Monografia – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Merheb, A. H. M. (2014) *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário Por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos*. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Paim da Silva, F. H. (2018) *Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em modelo físico de verdadeira grandeza*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Peixoto, V. C. (2011) *Análise Paramétrica e Dimensionamento de Poços de Infiltração para Fins de Drenagem Urbana*. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos SP.
- Pinto, C. S. (2002) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 2a Ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pirozzolo, L.; Sol-Sánchez, F.; Moreno-Navarro, G.; Martínez-Montes, M.; Rubio-Gámes, C. (2017) Evaluation of Bituminous Sub-Ballast Manufactured at Low Temperatures as an Alternative for the Construction of More Sustainable Railway Structures. *Materiales de Construcción*. Vol. 67, n. 327, p. 1–12. DOI: 10.3989/mc.2017.04816
- Rose, J. G.; Bryson, L. S. (2009) Hot Mix Asphalt Railway Trackbeds: Trackbed Materials, Performance Evaluations, and Significant Implications. In: *International Conference on Perpetual Pavements*.
- Rose, J. G.; Teixeira, P. F.; Ridgway, N. E. (2010) Utilization of Asphalt/Bituminous Layers and Coatings in Railway Trackbeds – A Compendium of International Applications. In: *2010 Joint Rail Conference*, p. 1–17.
- Rose, J. G.; Teixeira, P. F.; Veit, P. (2011) International Design Practices, Applications, and Performances of Asphalt/Bituminous Railway Trackbeds. In: *Railway Geotechnical Engineering International Symposium*, IFSTTAR, Paris.
- Rose, J. G.; Souleyrette, R. R. (2014) Hot-Mix Asphalt (Bituminous) Railway Trackbeds: In-Track Tests, Evaluations, and Performances - A Global Perspective. In: *Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, CRC Press 2014, p. 667–681.
- Santos, R. A. (2015) *Comportamento Anisotrópico de um Solo Laterítico Compactado*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Suzuki, C. Y.; Azevedo, A. M.; Kabbach Júnior, F. I. (2013) *Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: Conceitos e Dimensionamento*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Teixeira, P. F.; Ferreira, P. A.; Pita, A. L.; Casas, C.; Bachiller, A. (2009) The Use of Bituminous Subballast on Future High-Speed Lines in Spain: Structural Design and Economical Impact. *International Journal of Railway*, Vol. 2, p. 1–7.
- Tennakoon, N.; Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Nimbalkar, S.; Neville, T. (2012) The Role of Ballast-Fouling Characteristics on The Drainage Capacity of Rail Substructure. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35, n. 4, p. 1–4. DOI: 10.1520/GTJ104107
- Van Genuchten, M. T. A (1980) Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, N°44, p. 892-898.
- Vizcarra, G. O. C. (2015) *Efeito da granulometria no comportamento mecânico de lastro ferroviário*, Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Von der Osten, F. B. (2012) *Avaliação de quatro Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás*. Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

Renan Santos Maia (renanmaia@det.ufc.br); Daianne Fernandes Diógenes (daianne@det.ufc.br); Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, s/n – Bloco 703 – CEP: 60440-554 – Fortaleza, Ceará, Brasil.