



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

RENAN SANTOS MAIA

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

FORTALEZA

2017

RENAN SANTOS MAIA

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

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M188a Maia, Renan Santos.
Avaliação do fluxo de água em ferrovias com diferentes soluções para sublastro / Renan Santos Maia. –
2017.
93 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Sublastro Betuminoso. 2. Permeabilidade. 3. Dano por Umidade Induzida. 4. Fluxo de Água. I. Título.
CDD 620

RENAN SANTOS MAIA

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

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 06/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Marcelo Silva Medeiros Júnior, Ph. D.

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Rosângela dos Santos Motta, D. Sc.

Universidade de São Paulo (USP)

AGRADECIMENTOS

A Deus, antes e acima de tudo.

À minha orientadora, Verônica Castelo Branco, por transmitir, muito além dos seus conhecimentos, tanta paixão pela profissão e tanto carinho por mim. Sua presença na minha vida mudou e continua mudando completamente a forma que vejo o mundo. Obrigado por ser fonte de inspiração e amor aos seus alunos!

Aos professores Marcelo Medeiros e Rosângela Motta, por terem aceito participar da banca avaliadora deste trabalho.

Aos “misturados”, em especial à Daianne Diógenes, que me orientou em diversos momentos; aos meus amigos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), em especial ao Rômulo Mesquita, mais do que qualquer coisa, pela amizade e pelas boas risadas, à Annie Karine, que sempre demonstrou comprometimento e cuidado por todos nós e à Regilene Alcântara, por, na correria de todos os dias do LMP, ser a nossa maior fonte de risadas! E a todos do Departamento de Engenharia de Transportes (DET), pelo acolhimento durante os últimos anos.

À Talita Alves e, novamente, à professora Rosângela Motta, por terem gentilmente nos atendido e tirado nossas dúvidas quando precisamos.

À empresa TLSA (Ferrovia Transnordestina), que muito contribuiu para a realização deste trabalho e a todos da empresa Insttale Engenharia LTDA, pela oportunidade e pelos conhecimentos transmitidos durante meu período de estágio.

Aos meus pais, Maria Oclébia e Antonio Roberto, que colocaram a minha educação como prioridade em suas vidas. Às minhas avós, Conceição e Terezinha, à minha irmã, Roberta (e claro, Lúcio, João Vicente e Cibele) e aos meus padrinhos, tios e primos, por me ajudarem em tudo e em todos os momentos, pelos sacrifícios que sempre fizeram em nome do meu melhor.

Ao “Melhor Grupo de Todos”, Geovanny, Gledson, Lília, Marília, Marina e Wendy. Minha vida tem sido mais divertida com vocês ao meu lado; a todos os amigos que fiz ao longo desses anos de engenharia, em especial à Mariana e à Iara; aos meus amigos de Birmingham, Bruno, Gustavo, Pedro, Raquel, Rafaela, Talissa, Henrique, Cauê e Flávia; e aos meus amigos de infância, Rafael, Bruna, Paloma, Mariny, Maryan, Lívia, Ambra, Ainê, Leonardo, Juliana, Mariana, Amanda, Natália, Milena e Rinelle.

RESUMO

O Brasil possui grandes desafios para a consolidação do modo ferroviário como uma alternativa logística para alavancar o seu desenvolvimento econômico. Há, portanto, grande importância no estudo de diferentes pontos relacionados a esse modo de transporte. 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. 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 composição da estrutura, em substituição total ou parcial à camada de sublastro granular (solução usualmente denominada de sublastro betuminoso). Neste trabalho, misturas asfálticas para aplicação em camadas de sublastro foram dosadas e tiveram suas permeabilidades avaliadas para diferentes valores de Volume de Vazios (Vv) e graus de severidade de Dano por Umidade Induzida. Foi observado que, para misturas asfálticas dosadas a partir do método Marshall, são obtidos valores de coeficiente de permeabilidade (k) superiores ao limite sugerido de 10^{-6} m/s a partir de um Vv de 6% e, no caso de misturas dosadas a partir do método Superpave, esse valor de k já é atingido em valores de Vv próximos de 3%. Para as misturas asfálticas avaliadas, não foram observados efeitos de aumento da permeabilidade a partir do condicionamento ao Dano por Umidade Induzida. Foi simulado o fluxo de água em estruturas ferroviárias com a adoção de diferentes soluções para a camada de sublastro, constatando-se que as condições de limpeza da camada de lastro são mais críticas à eficiência da drenagem de estruturas ferroviárias que quaisquer alterações propostas à camada de sublastro e ambas as soluções de sublastro (granular e betuminoso) são eficientes na proteção do subleito à infiltração de água. Ressalta-se, porém, que uma maior eficiência na prevenção do bombeamento de finos para a camada de lastro ocorre com a incorporação de uma camada de sublastro betuminoso, sendo possível afirmar que o comportamento desse material representaria uma melhoria no desempenho da estrutura quanto à drenagem.

Palavras-chave: Sublastro Betuminoso, Permeabilidade, Dano por Umidade Induzida, Fluxo de Água.

ABSTRACT

Brazil has several challenges for the consolidation of railways as a logistical alternative to increase its economic development. Thus, there is great importance in the study of different points concerning to this mode of transportation. 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. Techniques for improving these functions are increasingly frequent in international studies and one of the most important approaches is the incorporation of asphalt mixtures into the structure composition, total or partially replacing the granular sub-ballast layer (the so called bituminous sub-ballast solution). In this work, asphalt mixtures for sub-ballast layers were designed and their permeabilities were evaluated for different values of Volume of voids (Vv) and degrees of severity of Moisture-Induced Damage conditioning processes. It was observed that, for asphalt mixtures designed by the Marshall method, values of the permeability coefficient (k) greater than 10^{-6} m/s were obtained from a Vv of 6% and, in the case of mixtures designed by the Superpave method, the k values reached the reference value with a Vv close to 3%. For the evaluated asphalt mixtures, no effects of increased permeability were observed after the moisture conditioning process. The water flow in railway structures was simulated for different solutions adopted for the sub-ballast layer. It was verified that the cleaning characteristics of the ballast layer are more critical to drainage efficiency than any proposed changes to the sub-ballast layer and both sub-ballast solutions (granular and bituminous) are efficient in protecting the subgrade from water infiltration. It should be noted, however, that the efficiency in preventing the pumping of fine particles to the ballast layer presented by the bituminous sub-ballast layer solution is decisive for establishing that the behavior of this material would represent an improvement in the performance of railway structures concerning to drainage.

Keywords: Bituminous Sub-ballast, Permeability, Moisture-Induced Damage, Water Flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Densidade (km de infraestrutura por 1000 km ² de território) de infraestruturas ferroviárias em diferentes países	15
Figura 2 – Estrutura tradicional de ferrovias, com camadas constituídas por materiais granulares.....	21
Figura 3 – Relação entre coeficiente de permeabilidade (k) e taxa de degradação do lastro ferroviário	23
Figura 4 – Relação de custos de construção e manutenção para as alternativas de estruturas ferroviárias	27
Figura 5 – Representação das formas de utilização de camadas asfálticas em ferrovias nos Estados Unidos	28
Figura 6 – Estrutura de via permanente utilizada no trecho Roma-Florença, na Itália ..	30
Figura 7 – Resultados de coeficiente de permeabilidade (k) obtidos para 4% e 7% de Vv	34
Figura 8 – Avaliação de permeabilidade para misturas asfálticas do tipo CA e WMA .	35
Figura 9 – Fluxograma com a sequência metodológica a ser realizada neste trabalho ..	41
Figura 10 – Granulometria de Projeto da mistura asfáltica utilizada como sublastro betuminoso	43
Figura 11 – Vedação lateral do CP com manta asfáltica impermeabilizante	47
Figura 12 – Amostra após a aplicação de tinta impermeabilizante Neutrol na amostra	47
Figura 13 – Aplicação de manta asfáltica formando uma calha na parte superior do CP (a) e aplicação de CAP e da última demão de tinta Neutrol (b).....	48
Figura 14 – Aplicação de argila plástica para vedação da base do permeâmetro	49
Figura 15 – Etapa final do ensaio de permeabilidade de misturas asfálticas	50
Figura 16 – Processo de condicionamento ao dano por umidade induzida (NBR 15617, 2015).....	52
Figura 17 – Prensa para rompimento de CPs à compressão diametral.....	53
Figura 18 – Ensaio de mancha de areia adaptado para CPs	54

Figura 19 – Seção-tipo da qual derivam as estruturas avaliadas quanto ao fluxo de água	58
Figura 20 – Geometria avaliada para a Estrutura Tradicional.....	59
Figura 21 – Algumas geometrias avaliadas para a solução contendo sublastro betuminoso	60
Figura 22 – Espessura de lâmina d'água proposto para a simulação de fluxo	63
Figura 23 – Resultados de k para CPs com Vv num intervalo de 0 a 8%, compactados a partir do método Marshall, com parâmetros de R ² referentes a faixas crescentes de Vv	66
Figura 24 – Resumo dos resultados de permeabilidade para todas as faixas de Vv para misturas produzidas a partir do método Marshall	67
Figura 25 – Resultados de k para CPs com Vv num intervalo de 0 a 8%, produzidas a partir do método Superpave, com parâmetros de R ² referentes a faixas crescentes de Vv	68
Figura 26 – Resumo dos resultados de permeabilidade para todas as faixas de Vv para misturas produzidas a partir do método Superpave.....	69
Figura 27 – Média e Desvio Padrão para os resultados dos ensaios de permeabilidade (amostras dosadas pelos métodos Marshall e Superpave).....	70
Figura 28 – Relação entre Grau de Severidade do Condicionamento ao DPU versus Permeabilidade para Misturas Asfálticas para composição de Sublastro Ferroviário (Vv= 4%)	72
Figura 29 – Relação macrotextura versus permeabilidade para CPs de misturas asfálticas para composição de camada de sublastro ferroviário.....	74
Figura 30 – Avaliações de fluxo nas condições de inexistência de camada de sublastro e de adoção da adoção de camada de sublastro granular	76
Figura 31 – Orientação dos vetores de fluxo nas condições sem camada de sublastro (a) e com camada de sublastro granular (b)	77
Figura 32 – Tempo necessário para a drenagem de uma coluna d'água de 0,40 m para diferentes graus de colmatção do lastro	79
Figura 33 – Fluxo de água na estrutura após um período de 30 minutos para diferentes permeabilidades relativas à camada de sublastro betuminoso.....	80

Figura 34 – Fluxo entre camadas para misturas com Vv de 7% (Marshall) antes (a) e após (b) o condicionamento ao dano por umidade	83
Figura 35 – Vetores de Fluxo em estruturas com soluções de sublastro betuminoso com diferentes espessuras.....	85
Figura 36 – Vetores de Fluxo e Carga Total no topo o subleito para diferentes recobrimentos do solo de fundação pela camada de sublastro	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características normatizadas para lastro ferroviário que contribuem para a sua capacidade drenante.....	22
Tabela 2 – Especificações necessárias ao material granular utilizado em sublastro ferroviário.....	24
Tabela 3 – Métodos de avaliação de dano por umidade induzida em misturas asfálticas	37
Tabela 4 – Características do CAP 50-70 utilizado nesta pesquisa.....	43
Tabela 5 – Classificação subjetiva do nível de correlação entre variáveis.....	55
Tabela 6 – Resumo de cenários de geometria avaliados para estruturas com uso de camada de sublastro betuminoso	60
Tabela 7 – Resumo dos resultados de dosagens realizadas a partir dos métodos Marshall e Superpave para misturas asfálticas utilizadas em sublastro betuminoso.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Iniciais	15
1.2	Problema de Pesquisa	17
1.3	Justificativa	18
1.4	Questões Motivadoras	18
1.5	Objetivos	19
<i>1.5.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>19</i>
<i>1.5.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>19</i>
1.6	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Estrutura Tradicional para Ferrovias	21
<i>2.1.1</i>	<i>Lastro</i>	<i>22</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Sublastro</i>	<i>23</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Considerações acerca do Subleito em Ferrovias</i>	<i>25</i>
2.2	Desempenho da Estrutura Ferroviária Tradicional	25
2.3	Sublastro Betuminoso – Experiências Internacionais	27
<i>2.3.1</i>	<i>Estados Unidos</i>	<i>27</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Europa</i>	<i>29</i>
2.4	Sublastro Betuminoso – Experiência Nacional	30
2.5	Dosagem das Misturas Asfálticas utilizadas em Sublastros Betuminosos	30
2.6	Desempenho de Ferrovias com Sublastros Betuminosos	31
2.7	Permeabilidade de Misturas Asfálticas	32
<i>2.7.1</i>	<i>Permeabilidade de Sublastros Betuminosos</i>	<i>34</i>
2.8	Dano por Umidade Induzida	36
<i>2.8.1</i>	<i>Definição</i>	<i>36</i>

2.8.2	<i>Mecanismos</i>	36
2.8.3	<i>Ensaio para avaliação do Dano por Umidade Induzida</i>	37
2.8.4	<i>Relações entre Dano por Umidade Induzida e características das Misturas Asfálticas</i>	38
2.8.5	<i>Dano por Umidade Induzida em Sublastros Betuminosos</i>	38
2.9	Fluxo de Água	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Materiais Utilizados	42
3.1.1	<i>Agregados</i>	42
3.1.2	<i>Granulometria de Projeto</i>	42
3.1.3	<i>Ligante Asfáltico</i>	43
3.2	Dosagem das Misturas Asfálticas	44
3.3	Estágios de Avaliação de Permeabilidade das Misturas Asfálticas	45
3.3.1	<i>Estágio Recém-aplicado ($V_v = 7\%$)</i>	45
3.3.2	<i>Estágio Consolidado ($V_v = 1$ a 4%)</i>	45
3.3.3	<i>Estágio de Dano ($V_v = 7$ e 4%)</i>	45
3.4	Ensaio de Permeabilidade para Misturas Asfálticas	46
3.5	Dano por Umidade Induzida em Misturas Asfálticas	50
3.6	Avaliações Adicionais de Parâmetros Referentes à Permeabilidade e ao Dano por Umidade Induzida	53
3.6.1	<i>Influência do Dano por Umidade Induzida no Comportamento Mecânico</i>	53
3.6.2	<i>Avaliação da influência da Condição de Superfície do CP na Permeabilidade das amostras de Misturas Asfálticas</i>	53
3.7	Parâmetro de Avaliação de Correlações	55
3.8	Fluxo de Água	55
3.8.1	<i>Dados de Entrada: Propriedades Hidráulicas</i>	56
3.8.1.1	<i>Propriedades Hidráulicas do Lastro Granular</i>	56

3.8.1.2	<i>Propriedades Hidráulicas do Sublastro Granular</i>	56
3.8.1.3	<i>Propriedades Hidráulicas do Sublastro Betuminoso</i>	57
3.8.1.4	<i>Modelo proposto para Subleito</i>	57
3.8.2	<i>Geometria da Estrutura</i>	57
3.8.2.1	<i>Lastro diretamente apoiado sobre o Subleito</i>	58
3.8.2.2	<i>Estrutura Tradicional (Lastro + Sublastro Granular (20 cm e $i = 3\%$) apoiados sobre o subleito)</i>	58
3.8.2.3	<i>Estrutura Tradicional sem Inclinação no Sublastro ($i = 0\%$)</i>	59
3.8.2.4	<i>Lastro + Sublastro Betuminoso</i>	59
3.8.3	<i>Condições de Contorno: Lâmina d'água e Tempo de Fluxo</i>	62
3.8.4	<i>Metodologia de Análise</i>	63
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	64
4.1	Dosagens das Misturas Asfálticas	64
4.2	Permeabilidade das Misturas Asfálticas	65
4.2.1	<i>Estágios Inicial e Consolidado</i>	66
4.2.2	<i>Considerações sobre a Permeabilidade das Misturas Asfálticas com V_v de 1%, 3% e 4%</i>	69
4.2.3	<i>Estágio de Dano por Umidade Induzida em Misturas Asfálticas</i>	71
4.2.4	<i>Avaliação de fatores que podem interferir na determinação da Permeabilidade das Misturas Asfálticas</i>	73
4.2.5	<i>Observação da Influência do Dano por Umidade Induzida no Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas</i>	75
4.3	Fluxo de Água em Ferrovias com Camadas Granulares	75
4.3.1	<i>Avaliação da Influência da Ausência de Sublastro no Fluxo de Água</i>	76
4.3.2	<i>Avaliação da Influência das Condições de Limpeza e Umidade do Lastro no Fluxo de Água</i>	78
4.3.3	<i>Avaliação da Influência da Inclinação do Sublastro no Fluxo de Água</i>	79

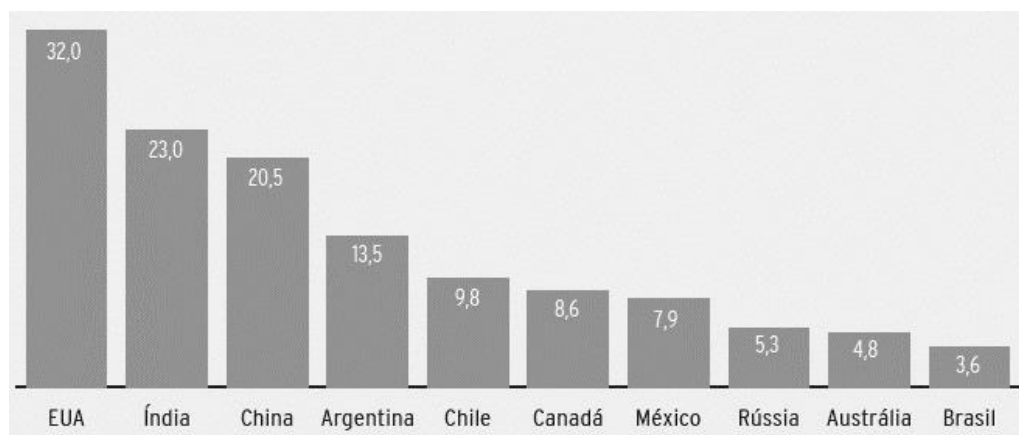
4.4	Avaliação de Fluxo de Água em Ferrovias com Sublastro Betuminoso.....	80
4.4.1	<i>Fluxo de Água no Topo do Subleito.....</i>	80
4.4.2	<i>Eficiência da Drenagem Lateral.....</i>	82
4.4.3	<i>Considerações sobre os Estágios Inicial, Consolidado e de Dano por Umidade...</i>	82
4.4.4	<i>Influência da Espessura da Camada de Sublastro Betuminoso no Fluxo de Água</i>	84
4.4.5	<i>Influência da Extensão Transversal da Camada de Sublastro Betuminoso no Fluxo de Água</i>	85
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O Brasil, país de dimensões continentais, possui a base de sua economia na exportação de *commodities*, dentre as quais estão minério de ferro, petróleo bruto, soja, café, carne e açúcar. 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 (em geral, 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; REIS e MIGUEL, 2015). O país, entretanto, ainda possui grandes desafios no que se refere à consolidação do modo ferroviário como uma alternativa logística para alavancar o seu desenvolvimento econômico, conforme exposto na Figura 1, que mostra a densidade da infraestrutura ferroviária no país (em quilômetros de infraestrutura a cada 1000 km² de território), resultado que posiciona o Brasil abaixo de diversos países com características semelhantes.

Figura 1 – Densidade (km de infraestrutura por 1000 km² de território) de infraestruturas ferroviárias em diferentes países



Fonte: CNT (2015).

Os desafios do Brasil não se limitam apenas à inexistência dessa infraestrutura em pontos cruciais do território. Segundo pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte – CNT (2015), a operação da infraestrutura existente também apresenta muitos gargalos. Em tal publicação, ao mesmo passo em que são mostrados resultados positivos, como o aumento de 28,9% da infraestrutura existente entre os anos de 2006 e 2014 com uma redução em 50,0%

dos acidentes, expõe-se que 41,1% dos clientes das ferrovias concessionadas referem-se a uma baixa qualidade da infraestrutura ferroviária em geral (acentuando-se dados que demonstram a persistência de velocidades operacionais reduzidas em diversos trechos). Segundo dados fornecidos pela CNT (2015), o panorama atual do setor mostra que existem 29.291 km de linhas férreas sob administração privada, concentradas principalmente no centro-sul do país (com uma integração pouco expandida aos outros centros de produção nas demais regiões). Fica exposta no documento a necessidade de expandir a malha existente, de superar os atuais gargalos e, também fundamental, de adequar a infraestrutura aos desafios logísticos que serão impostos ao país, movimentando um investimento necessário estimado em cerca de 282 bilhões de reais.

Partindo para um contexto global, pode-se afirmar que as estruturas de ferrovias evoluíram consideravelmente ao longo do tempo, tomando-se como referência a década de 1830, na qual predominava a concepção de trilhos paralelos apoiados em espaçadas tiras de madeira, que por sua vez eram apoiadas diretamente no solo (ROSE *et al.*, 2011). Desde então, uma característica intrínseca a esse modo de transporte é a capacidade de catalisar transformações econômicas, gerando um efeito multiplicador nas indústrias ligadas ao setor, sendo a evolução dessa estrutura uma busca contínua (CNT, 2013). Muitas modificações tecnológicas ao curso da história contribuíram para a melhoria do desempenho dessas estruturas de forma a consolidar o que se tem hoje globalmente como estado da prática (RANGEL *et al.*, 2015).

Ferrovias são constituídas pela integração entre a via permanente e o material rodante. A via permanente é um conjunto de camadas e elementos que permitem a sustentação para a passagem de trens, sendo a infraestrutura a camada final de terraplenagem, chamada de plataforma ou subleito, e a superestrutura as camadas granulares de sublastro e lastro, além dos trilhos, dormentes e sua fixação (KLINCEVICIUS, 2011). As modificações tecnológicas anteriormente citadas passam pela resistência de trilhos, hoje predominantemente feitos de aço, por técnicas de fixação trilho-dormentes com materiais elásticos, além da produção em larga escala de dormentes de concreto (em substituição aos dormentes de madeira). Entretanto, pouco foi mudado em relação às camadas granulares (também chamadas por alguns autores de geotécnicas) que compõem a estrutura das vias férreas desde o século XX (RANGEL *et al.*, 2015), o que 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 (ALBALAT *et al.*, 2011).

Diversos estudos brasileiros recentes dedicaram atenção às camadas granulares utilizadas em ferrovias, propondo um foco maior na camada de lastro (KLINCEVICIUS, 2011; MERHEB, 2014; DIÓGENES, 2016). A camada de sublastro também necessita receber o devido destaque, uma vez que esta cumpre 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 aquelas utilizadas na camada de 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, minimizando 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 composição da estrutura, 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 estrutura da via 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, devido a uma tendência global de crescimento no volume do tráfego de trens, de crescimento dos volumes e das tonelagens transportadas (que representam um aumento das cargas transmitidas internamente na estrutura), das velocidades a serem desenvolvidas no transporte de passageiros, dos ganhos econômicos por toneladas-distâncias transportadas, dentre outros fatores. 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 transporte de passageiros em alta e crescente velocidade (ROSE *et al.*, 2011).

1.2 Problema de Pesquisa

O panorama contemporâneo do setor ferroviário brasileiro engloba problemas visíveis na infraestrutura existente, considerada de qualidade ruim por 41,1% dos usuários das concessionárias de transporte ferroviário. Essa percepção reflete, no presente, a improdutividade oriunda de uma prática que tem sido pouco modificada há décadas, impedindo o país de transportar passageiros e cargas em velocidades comparáveis ao estado da prática de diversos países, além das interrupções frequentes para manutenção e da ocorrência de acidentes. A longo prazo, prevê-se uma incompatibilidade entre as técnicas construtivas de ferrovias

empregadas atualmente frente aos desafios do futuro, que exigem soluções com cada vez melhor desempenho, inclusive no que se refere às camadas da superestrutura.

1.3 Justificativa

O problema desta pesquisa envolve o panorama contemporâneo do modo de transporte ferroviário, no qual a infraestrutura é considerada de baixa qualidade. Dentre as diversas soluções propostas para esse problema, destaca-se, no contexto dos avanços tecnológicos em camadas granulares de ferrovias, a incorporação do Concreto Asfáltico (CA) à estrutura, especialmente em substituição à camada de sublastro granular. Diversos trabalhos internacionais revelam procedimentos de construção e resultados de caracterização da camada de sublastro betuminoso, com focos diferentes, porém com concordância entre si no tocante ao melhoramento da capacidade da via em questões essenciais, dentre as quais é possível citar o aumento da rigidez da estrutura, a possibilidade de se manter inalterada a umidade do subleito e a diminuição da ocorrência do processo de bombeamento de finos que resulta na colmatação do lastro.

Quando se analisa o desempenho de pavimentos asfálticos no Brasil (nesse caso, preponderantemente aplicados ao modo rodoviário), algumas das manifestações patológicas mais recorrentes estão relacionadas ao dano provocado pela umidade nas misturas asfálticas. O sublastro está posicionado abaixo de uma camada muito permeável (lastro) e é constantemente exposto à ação da água, justificando-se, assim, uma investigação mais profunda de como mecanismos de dano provocados pela ação da umidade podem alterar o comportamento da estrutura naquela que é uma de suas funções primordiais, que é a proteção das camadas inferiores, bem como colocar essa estrutura (sublastro betuminoso) em perspectiva, quanto ao fluxo de água, comparada a soluções usualmente empregadas para tal camada.

1.4 Questões Motivadoras

- Como realizar e quais os fatores a serem observados na dosagem de misturas asfálticas para composição de sublastros betuminosos?
- Como essas misturas se caracterizam quanto à permeabilidade nos estados anterior e posterior ao condicionamento ao dano pela ação da umidade induzida?
- Outros fatores, como a textura superficial da amostra, podem impactar na permeabilidade das misturas asfálticas utilizadas como camada de sublastro?
- Como as condições de limpeza e umidade da camada de lastro influenciam no fluxo de água no sublastro e no subleito de ferrovias?

- Como a geometria (por exemplo, inclinação transversal, espessura e largura) da camada de sublastro (granular e betuminoso) impacta no fluxo de água numa estrutura ferroviária?
- Como se dá o fluxo de água em estruturas de ferrovias com sublastro betuminoso constituído por misturas asfálticas de diferentes permeabilidades e com diferentes níveis de dano por umidade?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o fluxo de água em estruturas ferroviárias com diferentes soluções para a camada de sublastro, especialmente a solução referente à incorporação de misturas asfálticas em substituição ao sublastro granular.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os processos de dosagem de misturas asfálticas utilizadas em sublastros betuminosos;
- Avaliar a permeabilidade das misturas asfálticas utilizadas em sublastros betuminosos antes e depois de processos de condicionamento ao dano por umidade induzida;
- Realizar uma avaliação simplificada da influência da textura superficial na permeabilidade dos Corpos-de-Prova (CPs) de misturas asfálticas utilizadas como sublastro;
- Avaliar o fluxo de água entre camadas em ferrovias com diferentes condições de limpeza e umidade da camada de lastro;
- Avaliar os impactos da geometria da camada de sublastro no fluxo de água em estruturas ferroviárias;
- Avaliar o fluxo de água em ferrovias com camada de sublastro constituída por misturas asfálticas com diferentes valores de permeabilidade e níveis de dano por umidade.

1.6 Estrutura do Trabalho

Os capítulos a seguir tratam, especificamente, de uma revisão da literatura quanto aos aspectos abordados neste trabalho, como a estrutura de ferrovias, a apresentação da solução com o uso do sublastro betuminoso, além de aspectos referentes à permeabilidade, fluxo de água e dano por umidade induzida em misturas asfálticas (Capítulo 2). Na sequência, são

apresentados os materiais e métodos aplicados para a realização dos objetivos previamente mencionados (Capítulo 3), e os resultados obtidos são apresentados e discutidos a seguir (Capítulo 4). O Capítulo 5 apresenta um fechamento do trabalho, com conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

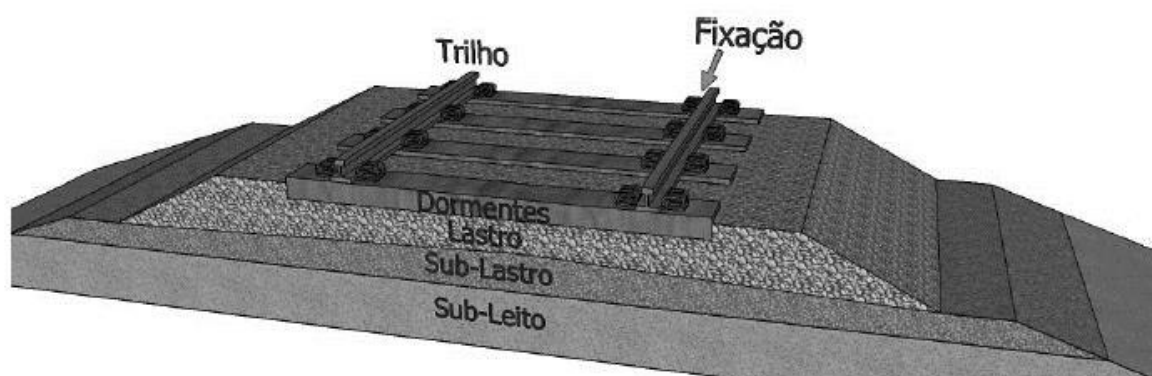
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estado da prática mundial no que concerne à estrutura de ferrovias se divide, basicamente, entre estruturas construídas em um formato tradicional, sendo as camadas de suporte da via permanente constituídas por materiais granulares, e estruturas alternativas, que ocorrem principalmente pela substituição de camadas granulares por placas rígidas. É no contexto atual, de proposição de estruturas alternativas, que se evidencia o uso de misturas asfálticas em ferrovias, objeto de estudo deste trabalho.

2.1 Estrutura Tradicional para Ferrovias

No âmbito tradicional, costuma-se dividir a estrutura de ferrovias em infraestrutura e superestrutura. Constituem a infraestrutura das estradas de ferro a superfície final de terraplenagem (chamada também de leito ou plataforma) e todas as obras situadas abaixo de seu greide. Já a superestrutura das ferrovias é constituída pela via permanente, estrutura sujeita às solicitações oriundas dos veículos e às intempéries ambientais (BRINA, 1988). Mais especificamente, a superestrutura da via permanente é composta por trilhos e dormentes (o que inclui a fixação entre essas estruturas), lastro e sublastro (BRINA, 1988; KLINCEVICIUS, 2011; DNIT, 2015), como mostrado na Figura 2. A definição de via permanente não é consenso entre diferentes autores, uma vez que também se defende a versão de que a infraestrutura é parte constituinte da via permanente, e que as camadas de lastro e sublastro são consideradas parte da infraestrutura em países como os Estados Unidos, como mostrado por Klinevicius (2011). Rangel *et al.* (2015) utilizam o termo camadas geotécnicas em referência às camadas de lastro, sublastro e subleito.

Figura 2 – Estrutura tradicional de ferrovias, com camadas constituídas por materiais granulares



Fonte: Klinevicius (2011).

2.1.1 Lastro

O lastro é uma camada geralmente composta por pedra britada, situada entre os dormentes e o sublastro. Dentre as funções do lastro estão a distribuição uniforme das cargas oriundas dos veículos sobre a plataforma, o impedimento de deslocamentos verticais e horizontais dos dormentes, a formação de um suporte que atenua as trepidações resultantes das passagens dos veículos e suprima as irregularidades da plataforma, além da facilitação da drenagem da estrutura (DNIT, 2015). A capacidade drenante é uma das principais características do lastro. Brina (1988) expõe a permeabilidade como uma das qualidades necessárias ao lastro para o bom desempenho de suas funções. Algumas características exigidas ao material de lastro, expostas na Instrução de Serviço Ferroviário (ISF) 212 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2015), demonstram a necessidade de cumprimento de requisitos quanto à permeabilidade, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características normatizadas para lastro ferroviário que contribuem para a sua capacidade drenante

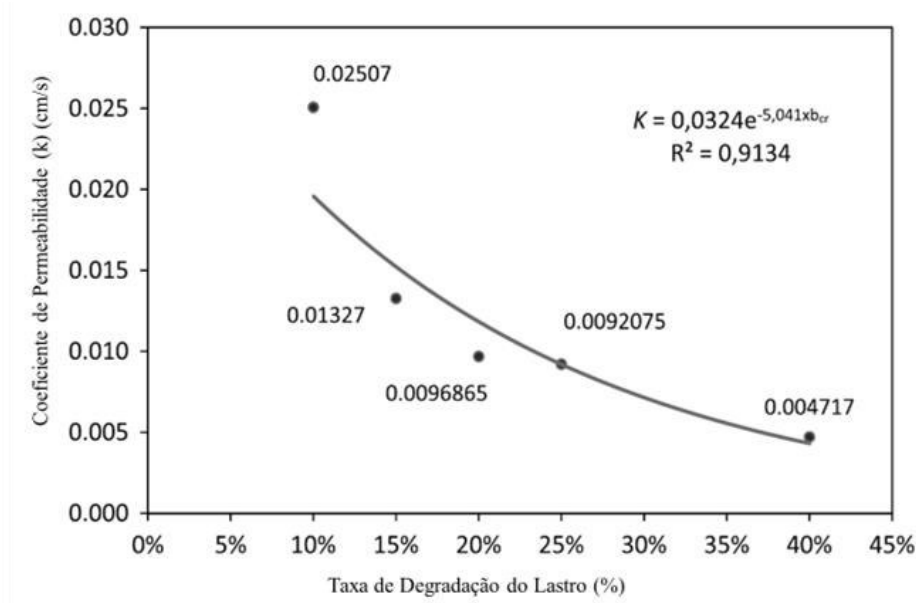
Característica	Valores (%)
Absorção máxima de água (ABNT NBR 5564/2011)	0,8
Porosidade aparente mínima (ABNT NBR 5564/2011)	1,5
Limites de porcentagem de partículas inferiores a 12,7 mm (ABNT NM ISO 2395/1997, 3310/1997, 3310-2/1997 e ABNT NBR 5564/2011)	0,0 a 5,0
Percentual tolerável de material pulverulento (ABNT NBR NM 46/2003)	1,0
Percentual tolerável de torrões de argila (ABNT NBR 7218/2010)	0,5

Fonte: Adaptada de DNIT (2015).

Ferreira *et al.* (2015) verificaram a capacidade drenante de lastros ferroviários para materiais com diferentes origens mineralógicas e graus de degradação, que representam a presença de material fino preenchendo os vazios da camada, colmatando os poros e reduzindo sua capacidade drenante. Os citados autores basearam-se numa vazão crítica de 2×10^{-4} m³/s na camada de lastro, proposta por Tennakoon *et al.* (2012). O critério de classificação para uma drenagem livre no lastro é o fluxo de água 100 vezes maior que o crítico, no mínimo. Com relação ao coeficiente de permeabilidade (k) da camada de lastro, Ferreira *et al.* (2015) obtiveram valores que variaram de 0,0034 a 0,0047 cm/s para diferentes materiais de lastro, em condições de degradação que variaram entre moderada e razoavelmente limpas. Conforme esperado, em condições de degradação induzida, a capacidade drenante das estruturas avaliadas apresentou-se como “muito deficiente”. O efeito da degradação na capacidade drenante de

lastros também foi estudada no Brasil por Paiva *et al.* (2014), que verificaram uma relação entre a permeabilidade do lastro granular e o grau de degradação da estrutura, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Relação entre coeficiente de permeabilidade (k) e taxa de degradação do lastro ferroviário



Fonte: Adaptada de Paiva *et al.* (2014).

2.1.2 Sublastro

Segundo DNIT (2015), o sublastro é uma das camadas que compõem a superestrutura ferroviária, posicionado abaixo do lastro e acima da plataforma ou subleito. As funções primordiais dessa camada na estrutura consistem em absorver os esforços oriundos do lastro e transmiti-los para a plataforma em uma taxa adequada à capacidade de suporte da mesma. Também cabe ao sublastro a prevenção do bombeamento de finos, o que, conforme exposto anteriormente, aumenta o índice de contaminação e reduz a permeabilidade do lastro. A ISF 212 (DNIT, 2015), cita também como uma das funções do sublastro permitir a redução da espessura necessária para a camada de lastro. A Tabela 2 mostra as principais especificações que o sublastro granular deve cumprir.

Tabela 2 – Especificações necessárias ao material granular utilizado em sublastro ferroviário

Característica	Especificação
Granulometria (DNER M 80-64)	Enquadrada nas faixas A, B, C, D, E ou F da AASHTO
Índice de Suporte Califórnia (ISC – DNER ME 49-94 compactado segundo DNER ME 162-94)	Mínimo de 20%
Percentagem passante na peneira nº 200 (0,075 mm)	Máximo de 2/3 da percentagem passante na peneira nº 40 (0,42 mm)
Limite de Liquidez (LL) do material passante na peneira nº 40	Igual ou inferior a 25%
Índice de Plasticidade (IP) do material passante na peneira nº 40	Igual ou inferior a 6%
Expansão Máxima	1%
Índice de Grupo (IG)	0

Fonte: Adaptada de DNIT (2015).

As especificações para sublastro propostas pela *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* – (AREMA, 2013) informam que algumas distribuições granulométricas normatizadas nos Estados Unidos atingem os requisitos necessários ao sublastro granular, citando-se as graduações densas de agregados e graduações para materiais utilizados em bases de rodovias. Com relação à percentagem de finos na mistura de agregados de diferentes tamanhos, recomenda-se que menos que 5% do material utilizado passe na peneira nº 200 (0,075 mm). Para Selig e Waters (1994), as funções do sublastro são: reduzir as tensões no subleito, proteger o subleito do congelamento, manter a separação entre subleito e lastro, prevenir a migração de finos do subleito para o lastro, prevenir o desgaste pelo atrito subleito-lastro, barrar a umidade oriunda das camadas inferiores e drenar a água oriunda das camadas superiores. Para os autores, o principal requisito de permeabilidade do sublastro consiste em possuir uma ordem de grandeza inferior à do lastro, com seção transversal com inclinações em direção aos corpos coletores para fins de drenagem.

Diversos estudos incorporam a avaliação da permeabilidade para a caracterização de materiais para fins de aplicação em camada de sublastro granular. 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 permeabilidade 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. Navikas *et al.* (2016) avaliaram a permeabilidade de sublastros granulares em duas condições (em ensaio de carga constante): a partir de amostras de agregados provenientes de pilhas de britagem e posteriormente misturados, e amostras de agregados retiradas da própria via. A permeabilidade média encontrada foi de 3,65E-07 m/s, entretanto observou-se uma maior permeabilidade (média de 4,13E-07 m/s) para os agregados da via

permanente, em comparação aos oriundos das pilhas e posteriormente misturados e compactados (média de $2,55E-07$ m/s).

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 relativo ao material selecionado. Fatores como a limpeza do lastro (referente a taxas de degradação do material) influenciam no regime de escoamento no qual a água atinge a camada de sublastro, daí a percepção de complexidade do fenômeno. 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).

2.1.3 Considerações acerca do Subleito em Ferrovias

O subleito é a fundação de uma ferrovia. e se constitui de solo natural, ou camada de solo selecionada, transportada e compactada. O bom desempenho do subleito, que é solicitado por cargas oriundas do tráfego dos veículos dissipadas pelas estruturas a ele superiores, consiste em garantir a estabilidade da estrutura, não permitindo que recalques excessivos ocorram (KLINCEVICIUS, 2011). A manutenção das características de projeto do subleito é importante para o não comprometimento da vida útil da estrutura como um todo, dentre as quais está a umidade, cuja manutenção da característica original é conseguida quando ocorre a impermeabilização da plataforma pelo sublastro. No Brasil, o subleito é construído com as 3 últimas camadas compactadas a 100% do Proctor Normal, e os controles tecnológicos envolvidos baseiam-se, predominantemente, na verificação da granulometria, no valor de CBR e no grau de compactação (RANGEL *et al.*, 2015).

2.2 Desempenho da Estrutura Ferroviária Tradicional

Vias permanentes construídas a partir da utilização de camadas granulares são amplamente utilizadas em diversos países. Esse tipo de construção ainda é predominante, em virtude de aspectos como a resiliência e a resistência frente à ação de carregamentos repetidos, combinados ao baixo custo inicial de construção, além da facilidade de realização de manutenções. Defende-se, entretanto, que, apesar de haver uma disseminação global da técnica, alguns aspectos podem torná-la menos eficiente. Cita-se, inicialmente, a necessidade de manutenções frequentes, em virtude das deformações e da degradação decorrentes da quebra de partículas e, por consequência, colmatação do lastro (INDRARATNA *et al.*, 2010). A

questão de custos é relativizada, entretanto, na avaliação de distâncias de transporte de materiais. Cita-se que quando a distância de transporte dos materiais granulares atinge patamares entre 20 e 80 km, os custos a ela relativos podem dobrar. Pirozzolo *et al.* (2017) citam que aspectos econômicos podem inviabilizar a utilização de material granular para compor a camada de sublastro, especialmente quando a camada, por questões estruturais, necessita de uma elevada espessura, gerando elevados custos de transporte.

As perspectivas contemporâneas desse modo de transporte indicam o aumento do volume de tráfego ferroviário, das velocidades operacionais dos veículos e das cargas transportadas, concomitantes a um menor esforço possível de manutenção, que, dentre outros fatores, no caso do modo de transporte ferroviário, leva a interrupções do tráfego dos trens e gera perdas econômicas. Defende-se que, para as condições anteriormente citadas, a utilização da estrutura granular se mostra ainda mais deficiente quando são observados pontos específicos da via, como em trechos com Aparelhos de Mudança de Via (AMV), que geram sobrecargas à estrutura, além de passagens de nível, entradas e saídas de obras de arte como pontes, viadutos e túneis, além de pátios ferroviários, onde as cargas oriundas de veículos solicitam a estrutura ferroviária por períodos longos. Algumas dessas condições são citadas por Rose *et al.* (2011).

A via permanente construída com placas de elevada rigidez, em geral de Concreto de Cimento Portland (*slab-tracks*) passa a ser uma opção indicada para responder a solicitações consideradas críticas (como em linhas de alta velocidade em regiões urbanas) com um melhor desempenho mecânico. Entretanto, o fator que mais colabora para a baixa disseminação desse tipo de solução é o investimento inicial demandado, consideravelmente superior ao necessário à construção de estruturas granulares. Assim, soluções intermediárias entre estruturas mais rígidas e estruturas completamente granulares (de menor rigidez) são interessantes em uma escala global, uma vez que placas de Concreto de Cimento Portland, apesar de demandarem menores custos de manutenção, apresentam elevados custos de construção. Por esse motivo, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que incrementem o desempenho da via sem a necessidade de investimentos tão elevados. Citam-se, nesse contexto, o desenvolvimento de ligações elásticas entre trilhos e dormentes, além da utilização de materiais alternativos na composição das camadas, aumentando sua capacidade geotécnica sem o comprometimento de custos (TEIXEIRA *et al.*, 2009). Pode-se, assim, estabelecer a relação mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Relação de custos de construção e manutenção para as alternativas de estruturas ferroviárias



Fonte: Adaptada de Teixeira *et al.* (2009).

Teixeira *et al.* (2009) citam como uma das soluções viáveis, em relação à redução dos custos de manutenção, a adoção de uma camada com material mais rígido e durável como sublastro, em substituição à camada de sublastro granular. É objeto de experiências internacionais cada vez mais recorrentes a utilização de misturas asfálticas no cumprimento dessa característica. 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 da via inalterada (ROSE *et al.*, 2010).

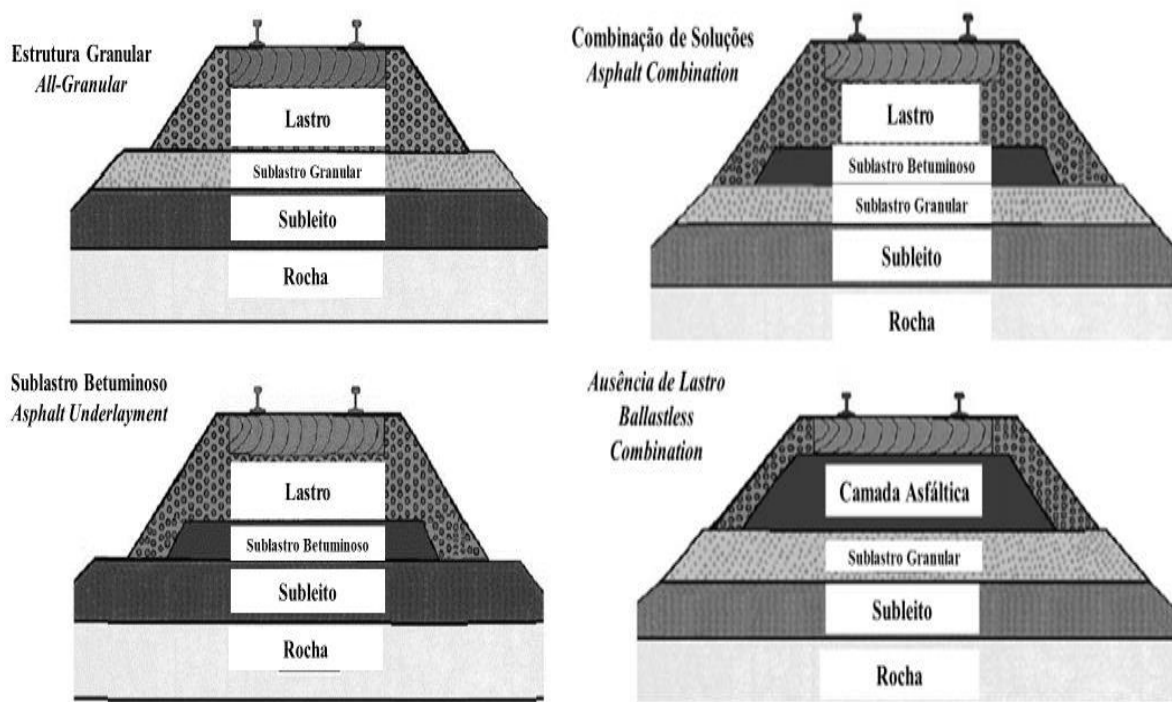
2.3 Sublastro Betuminoso – Experiências Internacionais

2.3.1 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, o setor ferroviário, nos últimos 30 anos, passou a responder aos desafios impostos por novas tendências desse modo de transporte a partir da aplicação seletiva de misturas asfálticas usinadas a quente, de características semelhantes às aplicadas no meio rodoviário, como camada de suporte, especialmente em linhas férreas com elevadas solicitações em toneladas de cargas transportadas. Existem, basicamente, três combinações de camadas aplicadas em relação ao uso de misturas asfálticas na experiência americana. A primeira consiste na substituição total do sublastro granular pelo betuminoso (a camada asfáltica funciona como a barreira entre o lastro permeável e o subleito que deve manter a sua umidade inalterada), chamada de *asphalt underlayment*. A segunda consiste na substituição parcial do sublastro por uma camada asfáltica entre o lastro e o sublastro granular (*asphalt combination*),

e a terceira consiste na execução de uma estrutura semelhante às *slab tracks* (chamada de *ballastless asphalt combination*) em material asfáltico (uma camada de sublastro granular pode ser incluída na estrutura), em substituição à utilização de placas de concreto armado (ROSE e SOULEYRETTE, 2014). Tais estruturas são mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Representação das formas de utilização de camadas asfálticas em ferrovias nos Estados Unidos



Fonte: Adaptada de Rose e Souleyrette (2014).

Quanto aos aspectos geométricos e de volumetria, Rose *et al.* (2010) afirmam que as estruturas utilizadas possuem, de forma geral, 3,7 m de largura, com altura entre 12,5 e 15 cm, em situações mais gerais, e equivalente a 20 cm nos casos de subleitos com baixa capacidade de suporte e de locais com elevados impactos de cargas. A camada de lastro possui espessura acima de 20 cm, o tamanho máximo do agregado utilizado na mistura varia entre 25 e 37 mm e o teor de ligante utilizado varia de 4,5 a 7,0%, representando um Vv entre 1 e 3%, para atingir um nível aceitável de impermeabilização do subleito. Os critérios para a dosagem das misturas asfálticas utilizadas nos Estados Unidos são mostrados por Hensley e Rose (2000) e datam, inicialmente, da década de 1980, sendo o método de dosagem Marshall predominante à época e ainda utilizado nos dias atuais.

No tocante, especificamente, ao desempenho das estruturas frente à permeabilidade, comprovou-se que o solo abaixo de uma camada asfáltica de sublastro não teve a umidade ótima

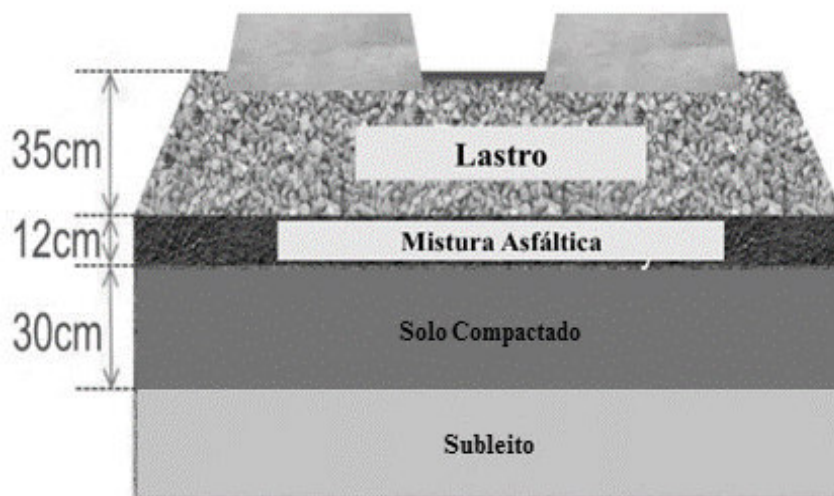
alterada ao longo do tempo, tendo sido demonstrado que a umidade se encontrava menos de 1% distante do valor estabelecido nos ensaios de Proctor. Esse resultado indicou que a camada de sublastro betuminoso é eficiente com relação à manutenção do solo de subleito próximo à densificação máxima (ROSE e BRYSON, 2009).

2.3.2 Europa

No continente europeu, o desenvolvimento de alternativas à estrutura granular tradicional surge no contexto das linhas férreas de alta velocidade para transporte de passageiros. Em relação à utilização de misturas asfálticas na via permanente ferroviária, tem-se registros da construção de estruturas cujos dormentes se apoiam diretamente em um revestimento de Concreto Asfáltico (CA), além de estruturas com substituição parcial de material granular por materiais asfálticos. A adoção de soluções como essas revela, dentre outros benefícios, a facilidade de construção, a menor frequência e a maior facilidade de manutenção, além da redução da espessura da via permanente (e, portanto, da possibilidade de construção de túneis de menores diâmetros). Aplicações de misturas asfálticas em camadas de ferrovias são documentadas em diferentes países europeus, com destaque para Itália, Espanha e França, numa proposição semelhante à estrutura do tipo “*asphalt underlayment*” utilizada nos Estados Unidos. Registros de estudos dessa alternativa também foram desenvolvidos em Portugal, como relatado por Mendes (2011). Cita-se também a Alemanha, com a utilização de pavimentos ferroviários de CA, que funcionam de forma análoga à técnica de *slab track* (EAPA, 2014).

Na Itália, a aplicação de misturas asfálticas em vias permanentes ferroviárias data da década de 1970, com a ligação entre as cidades de Roma e Florença. A experiência, que foi iniciada em parte da via, foi expandida para sua total extensão, e gerou como resultados a prevenção da infiltração da água da chuva nas camadas inferiores, o melhor desempenho da plataforma sob as condições de elevadas solicitações de cargas, além da eliminação do fenômeno de colmatagem do lastro. O diferencial da experiência italiana consiste na existência de uma camada de solo “super compactado” abaixo da camada asfáltica, o que contribui para a elevação da capacidade de carga da estrutura para 80 MPa (ROSE *et al.*, 2010; EAPA, 2014). Na ocasião, a economia de material granular gerada foi cerca de 40%, e, em referência ao projeto da mistura asfáltica utilizada, procurou-se produzir um concreto asfáltico cujo Volume de vazios (V_v) fosse equivalente a 2% (no caso, atingido com teor de ligante, com penetração 50/70, entre 4,1% e 4,7%) (CARDONA, 2016). Uma representação da estrutura utilizada no trecho Roma-Florença é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura de via permanente utilizada no trecho Roma-Florença, na Itália



Fonte: Adaptada de Cardona (2016).

Na Espanha, as misturas asfálticas para aplicação em sublastro são produzidas de acordo com especificações rodoviárias, com Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com penetração equivalente a 50/70 ou 70/100, com adição de fíler e teores de ligantes acima de 4,8%. Na França, foi construído um trecho de teste com 3 km de extensão para aplicação de sublastro betuminoso na linha de alta velocidade entre Paris e Estrasburgo. Anteriormente, havia uma camada de lastro sobre uma camada de sublastro granular de 20 cm de espessura, assente sobre uma camada de solo compactado de 30 cm, que foi reduzida para 20 cm após a adoção de uma camada de 14 cm de CA como sublastro. Com relação ao projeto de mistura utilizada no referido trecho e naqueles que, posteriormente, replicaram a técnica, tem-se registros da utilização de misturas asfálticas rodoviárias tradicionais, incluindo-se a avaliação de misturas com CAP modificado por polímero (EAPA, 2014; CARDONA, 2016).

2.4 Sublastro Betuminoso – Experiência Nacional

No Brasil, o primeiro trecho de via permanente com sublastro betuminoso foi executado em 2017 e seu desempenho está sendo monitorado no estado de São Paulo. Inicialmente, projetou-se uma estrutura com espessura de 12,5 cm, contendo granulometria intermediária entre as experiências italiana e norte-americana, misturada com 4% de CAP 30/45, de modo a se obter um Vv de 3 a 5% (ALVES *et al.*, 2016).

2.5 Dosagem das Misturas Asfálticas utilizadas em Sublastros Betuminosos

Uma das questões mais importantes no que tange à adoção de soluções alternativas para o melhoramento do desempenho da via permanente ferroviária com a utilização de misturas

asfálticas é o projeto de tais misturas. Internacionalmente, as práticas adotadas variam, entretanto alguns pontos são repetidamente referidos como essenciais para que a estrutura consiga cumprir os objetivos propostos, como o reduzido Vv (HENSLEY e ROSE, 2000), além da granulometria densa (HENSLEY e ROSE, 2000; LNEC, 2010; DI MINO *et al.*, 2015) e, de uma forma menos precisa na literatura, a utilização de misturas semelhantes às especificadas para pavimentos rodoviários.

Os teores de projeto de ligante encontrados variam de acordo com as especificidades de projeto, sendo o valor de 7,0% o mais elevado observado na literatura, nos Estados Unidos (HENSLEY e ROSE, 2000), e valores entre 4,0 e 5,0% recorrentes nos casos europeus (TEIXEIRA *et al.*, 2009; ROSE *et al.*, 2011; CARDONA, 2016). No caso do Vv, o recomendado para a impermeabilização da camada inferior é um valor menor que 3%, entretanto testes *in-situ* em ferrovias americanas constataram variações neste valor, chegando a valores de Vv da ordem de 9% em um dos casos (ROSE e SOULEYRETTE, 2014). O método de dosagem utilizado não é objeto recorrente de avaliações, e não há, portanto, registros de novos métodos de dosagem específicos para essas misturas. Em geral, aplicam-se métodos de dosagem utilizados para projeto de rodovias, como no caso dos Estados Unidos, quando, na década de 80, vigorava o método *Marshall*, porém novas experiências tendem a utilizar o método *Superpave*, com o uso de compactadores giratórios (HENSLEY e ROSE, 2000).

2.6 Desempenho de Ferrovias com Sublastros Betuminosos

Uma das vantagens da utilização do sublastro betuminoso em vias permanentes de ferrovias é a redução da frequência de manutenções. Essa vantagem fica clara quando se comparam as operações de manutenção realizadas em estruturas tradicionais com as realizadas em estruturas contendo sublastro betuminoso, como acontece na França, em estudo mostrado por Cardona (2016). Segundo o autor, a linha Paris-Estrasburgo, em operação a partir de 2007 com a utilização de sublastro betuminoso, foi comparada com linhas cujas características de tráfego foram consideradas similares. No caso, foi avaliado um parâmetro de desgaste da via pelo desnivelamento vertical da estrutura em relação às cotas que deveriam estar sendo obedecidas, cuja taxa de crescimento foi claramente maior na estrutura tradicional. Os trabalhos de manutenção preventiva permaneceram constantes para ambas, uma vez que seguiam cronogramas já pré-estabelecidos pelas autoridades francesas. Com relação à execução de correções de nível, a estrutura com sublastro betuminoso não atingiu o nível máximo de desgaste estabelecido durante o período de observação e a necessidade de correções de nível foi reduzida a apenas uma única vez num período de 9 anos.

O estudo conduzido por Rose e Bryson (2009) visou à avaliação das estruturas contendo sublastro betuminoso em comparação com medições datadas de um espaço de tempo de 9 anos. Os resultados de ensaios de CBR também foram considerados próximos na comparação entre os materiais nos diferentes períodos, mostrando que o sublastro betuminoso é uma forma eficiente de preservação das características do subleito. Ao longo dos anos também não foram observadas variações significativas na distribuição granulometria da mistura asfáltica, e o teor de ligante obtido a partir da extração de Corpos-de-Prova (CPs) foi próximo ao valor projetado. Quanto ao ligante asfáltico, os autores defendem que a pouca exposição ao sol e à ação do oxigênio são responsáveis pela pouca oxidação e enrijecimento, em termos de penetração do ligante e de viscosidade, diferente do que é esperado para misturas asfálticas utilizadas em pavimentos rodoviários, tendência que foi confirmada com os resultados obtidos em amostras de misturas asfálticas para uso em sublastro betuminoso avaliadas antes e após 9 anos de serviço.

Análises com *softwares* baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) são comuns na literatura para a caracterização das estruturas de ferrovias com sublastro betuminoso. Rangel *et al.* (2015) realizaram simulações computacionais para analisar o desempenho do sublastro betuminoso, com o foco na espessura da camada, mostrando que os deslocamentos verticais e os esforços de tração nos trilhos da via aumentam na medida em que se reduz a espessura da camada. Assim, foi recomendada para a camada de sublastro betuminoso uma espessura mínima de 12,5 cm. Albalat *et al.* (2011) forneceram uma conclusão similar e recomendaram uma espessura mínima entre 12 e 14 cm para a camada asfáltica.

Numericamente, o aumento da resistência da camada asfáltica em comparação à camada de sublastro granular é mostrado no estudo conduzido por Pita *et al.* (2006). A título de comparação, enquanto o módulo de elasticidade do sublastro granular de referência é aproximadamente 200 MPa, o do sublastro betuminoso pode variar de 2.000 a 11.000 MPa, em virtude de fatores como a temperatura e a frequência de carregamento. A conclusão desse estudo revela que, para os valores de referência mostrados, para que as tensões na plataforma sejam equivalentes, estima-se uma espessura de 12 a 14 cm de sublastro betuminoso para o desempenho que seria alcançado com 30 cm de sublastro granular.

2.7 Permeabilidade de Misturas Asfálticas

Ferreira (2015) baseia seu estudo de permeabilidade em misturas asfálticas para uso em pavimentos rodoviários na Lei de Darcy, de 1856, que é válida para meios porosos na condição saturada, nos quais o fluido escoar em regime laminar, alcançado pelo desenvolvimento de

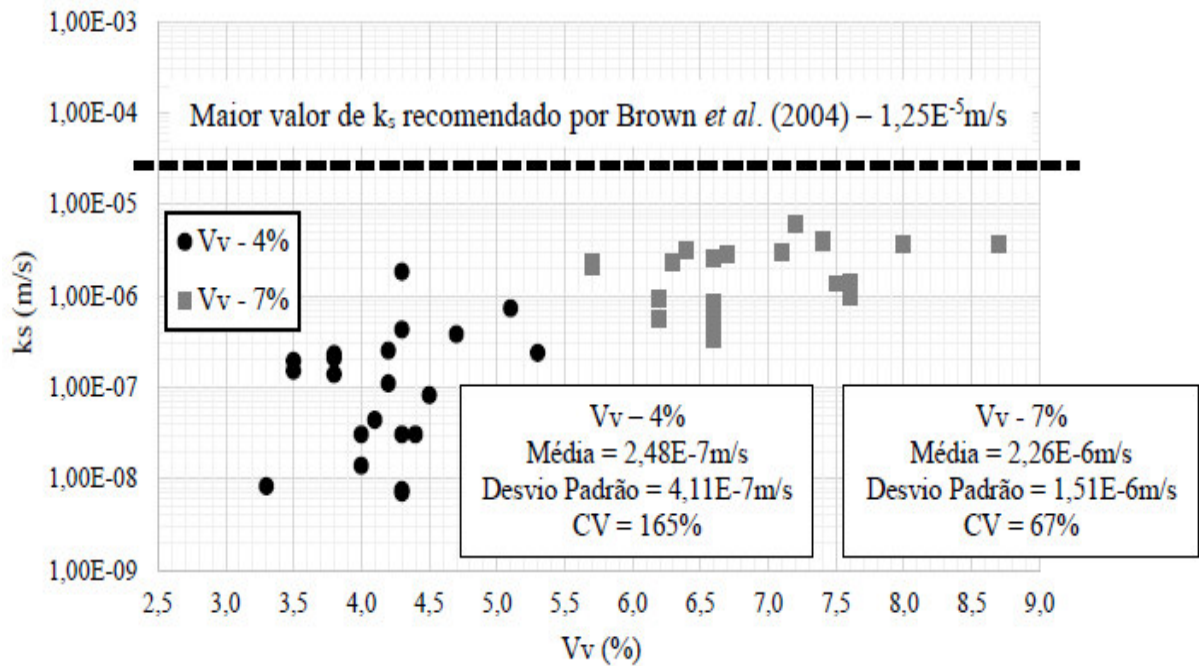
pequenas velocidades, em deslocamento perpendicular à seção transversal e dependente da viscosidade do permeante. Segundo a Lei de Darcy, a velocidade de fluxo de água em meio poroso ocorre de forma proporcional ao gradiente de carga hidráulica, conforme mostrado em (1). Na equação, v representa a velocidade de fluxo e k o coeficiente de permeabilidade do meio (cuja unidade é expressa em espaço/tempo). Quanto maior o coeficiente de permeabilidade, mais livre é o fluxo de água na estrutura.

$$v = -k \times \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1)$$

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, conforme exposto anteriormente, o lastro (camada imediatamente acima da camada de sublastro) possui alta capacidade drenante, devido a 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 V_v da mistura a valores abaixo de 3,0%.

O V_v de uma mistura asfáltica afeta significativamente sua permeabilidade, porém essa relação não é sempre evidente, e não é suficiente para descrever como estes vazios estão distribuídos na estrutura. 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 (2004) para estabelecimento de limites aceitáveis de permeabilidade de misturas asfálticas. Observa-se que, apesar dos resultados obtidos encontrarem-se abaixo do valor máximo estabelecido ($1,25E-5$ m/s), há considerável variação entre os coeficientes de permeabilidade encontrados, como observado no intervalo entre 3,5 e 4,5% de V_v , na Figura 7, o que corrobora com o que foi concluído por Caro *et al.* (2008), porém entra 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 do reduzido V_v . É comum, portanto, que mesmo quando misturas asfálticas apresentam o mesmo V_v , seja em laboratório ou em campo, estas apresentem a estrutura interna do esqueleto mineral e de comportamento quando misturadas com o ligante asfáltico diferentes, o que pode implicar diretamente em diferentes valores de permeabilidade.

Figura 7 – Resultados de coeficiente de permeabilidade (k) obtidos para 4% e 7% de Vv



Fonte: Ferreira (2015).

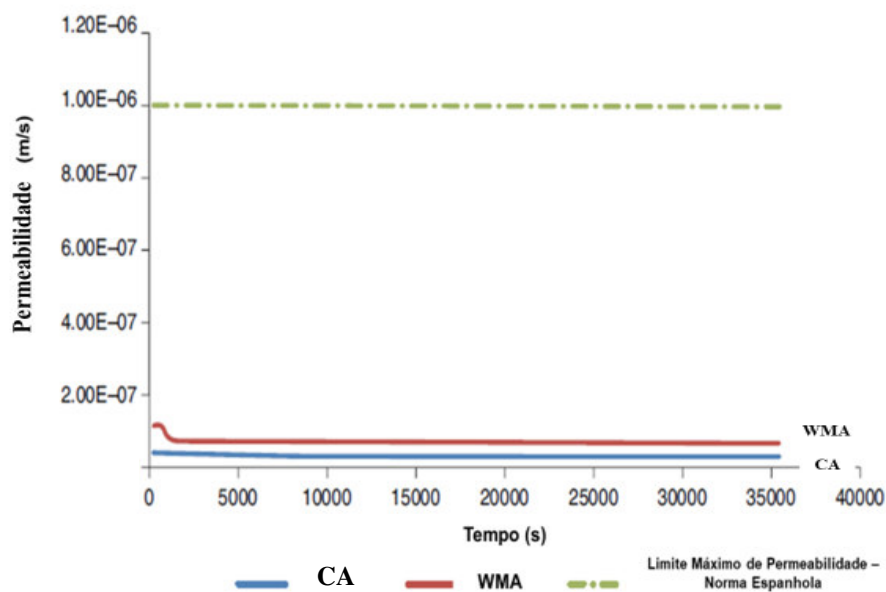
Outro fator a ser considerado no estudo do fluxo interno de umidade em misturas asfálticas é o fato deste processo ser dinâmico e tender a mudar ao longo da vida útil do pavimento, sendo influenciado, inclusive, pela ação e pelo efeito deletério da água internamente na mistura asfáltica. Trata-se de um processo cujos efeitos são potencializados ao longo de sua vida útil (KRINGOS *et al.*, 2008). Choubane, Page e Musselman (1997) apresentam um estudo da permeabilidade de misturas asfálticas compactadas a partir do CGS, comparadas a misturas asfálticas obtidas a partir de graduação fina compactadas a partir do soquete Marshall. Segundo o estudo, o grau de interconexão entre os vazios em campo é maior que os obtidos a partir de ensaios de laboratório, dada a maior permeabilidade observada em campo. Além disso, há uma consideração de que a estrutura interna, incluindo-se a distribuição e interconexão entre vazios a partir do CGS não é comparável com o observado em campo e, por consequência, ao atingido quando se compactam amostras com o equipamento Marshall.

2.7.1 Permeabilidade de Sublastros Betuminosos

Pirozzolo *et al.* (2017) avaliaram a permeabilidade de sublastros betuminosos de dois tipos, um CA, usinado a elevadas temperaturas, e uma mistura do tipo WMA (*Warm Mix Asphalt*), usinada e compactada a temperaturas menores, como uma alternativa ambiental para a execução de misturas asfálticas. A avaliação ocorreu com a utilização de um permeômetro de

seção quadrada (30 cm × 30 cm de base e altura de 50 cm) com um coletor para a água drenada no fundo do equipamento. O método de ensaio seguiu a norma europeia UNE-EN 103403:1999, utilizada para a avaliação de permeabilidade de solos, seguindo-se a Lei de Darcy. 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 com 75 golpes por face, o que resulta em teor de ligante de 4,5% para 2,6 e 2,7% de Vv para o CA e a WMA, respectivamente, em uma espessura projetada de 12 cm. Ambos os materiais apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade abaixo do valor de 10^{-6} m/s, aproximando-se do valor de 10^{-7} m/s, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Avaliação de permeabilidade para misturas asfálticas do tipo CA e WMA



Fonte: Adaptada de Pirozzolo *et al.* (2017).

Ao se comparar os resultados de permeabilidade obtidos no estudo realizado por Pirozzolo *et al.* (2017) com os resultados obtidos por Ferreira (2015), observa-se que, dentre as misturas testadas com variação entre 3 e 8% de vazios, existe a possibilidade de tais misturas não serem propícias para aplicação em camadas de sublastro, tomando-se como base o limite estabelecido pelas especificações espanholas. A avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas para sublastro também é feita em comparação à permeabilidade encontrada por meio de procedimentos similares utilizando-se o permeômetro recomendado para avaliação de sublastros granulares. Na literatura internacional, tem-se registros de valores de k para sublastro granular da ordem de $2,39E-06$ m/s, com material de composição granulométrica estabelecida segundo especificações espanholas (SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2015). Tais valores são maiores

que os encontrados pelos mesmos autores para sublastro betuminoso de composição granulométrica de acordo com os limites espanhóis, teor de CAP 50/70 de 4,3% e 2,8% de Vv, que é de $5,7E-07$ m/s. A permeabilidade de sublastros granulares com relação à granulometria utilizada foi avaliada por Jing *et al.* (2015), que variaram a composição granulométrica de acordo com os limites para sublastro mostrados pela norma chinesa, da mais fina para a mais graúda, resultando-se em valores de k de, aproximadamente, $5E-06$ m/s para a composição mais fina e $5E-04$ m/s para a composição mais graúda.

Liu *et al.* (2017) analisaram a viabilidade da utilização de CA auto adensável para proteção do subleito em ferrovias, defendendo-se a impermeabilidade como característica essencial a ser atingida em projeto. Os autores demonstram que a existência de trincas e fissuras nesta camada são relevantes para a análise, por meio da avaliação do conteúdo de água no subleito durante diferentes períodos do ano, que aumenta à medida que temperaturas mais frias ocorrem, pois há um aumento no trincamento térmico.

2.8 Dano por Umidade Induzida

2.8.1 Definição

Segundo Kiggundu e Roberts (1988), o dano por umidade é uma progressiva deterioração funcional do pavimento, ocasionada pela perda de adesividade entre o ligante asfáltico e a superfície de agregados e/ou a perda de coesão do ligante asfáltico em virtude da presença de água. Dessa forma, associa-se o dano por umidade a um efeito negativo no desempenho e na vida de serviço de pavimentos asfálticos, portanto, identificar o potencial da ação deletéria da água em misturas asfálticas torna-se importante para a seleção de materiais e para a dosagem dessas misturas. Quando essa identificação é inadequada, defeitos prematuros nos pavimentos e custos elevados de manutenção e de recuperação podem surgir (VASCONCELOS *et al.*, 2006).

2.8.2 Mecanismos

Os mecanismos de dano por umidade se relacionam com a adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados, a coesão do ligante asfáltico e, de forma menos aplicada à realidade brasileira, com a degradação de agregados em virtude do congelamento (Vasconcelos *et al.*, 2006). Caro (2009) detalha como se dão os mecanismos de dano por umidade, que ocorrem pela sequência de dois processos, o primeiro é o transporte da umidade, e o segundo é a resposta do sistema. As características físicas, químicas e geométricas dos materiais e da combinação entre eles governam esses processos. O transporte da umidade é uma consequência da relação

entre o ambiente externo e as características internas da mistura asfáltica, que poderão ser mais ou menos susceptíveis, em virtude de questões como a umidade do ambiente, os períodos de chuva, os ciclos de temperatura, combinados, por exemplo, com a percentagem, o tamanho e a conectividade entre os vazios da mistura. Já a resposta do sistema pode ocorrer por diversos processos, dentre os quais a separação/descolamento do filme de ligante sem maiores quebras na estrutura, o deslocamento do filme de ligante, cuja característica representa maiores quebras na estrutura, a dispersão do mástique, pela perda de resistência de coesão em virtude da difusão de umidade, a ruptura do filme de ligante com o aparecimento de microfissuras, que retroalimentam o processo de dano, a desSORÇÃO do material de mástique, que é a “lavagem” de componentes pela ação da água e a emulsificação espontânea do ligante, tornando-o menos coeso.

Diversos fatores influenciam à susceptibilidade de misturas asfálticas ao dano por umidade, incluindo as propriedades físicas e mecânicas do ligante asfáltico e dos agregados (e sua interação), o teor de ligante, a curva granulométrica, a interconexão entre os vazios na mistura (o que está diretamente ligado à permeabilidade da camada asfáltica), além do tráfego e das atividades de manutenção realizadas na estrutura (VARVERI, ZHU e KRINGOS, 2015). Kringos *et al.* (2008) mostram que o dano por umidade induzida impacta na coesão do ligante asfáltico e são potencializados quando há elevados gradientes de pressão sobre a estrutura. O processo de dano por umidade com efeitos na adesão agregado-ligante ocorre devido ao processo continuado de fluxo de umidade na estrutura.

2.8.3 Ensaios para avaliação do Dano por Umidade Induzida

Existem ensaios que identificam o potencial de dano por umidade para misturas asfálticas nas condições não-compactadas e compactadas. A avaliação de amostras compactadas é mais comum. Bernucci *et al.* (2010) citam alguns dos principais ensaios para avaliação do dano por umidade induzida em misturas asfálticas, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Métodos de avaliação de dano por umidade induzida em misturas asfálticas

Teste	Método de Avaliação
<i>Moisture vapor susceptibility</i>	<i>California Test 307</i>
<i>Immersion-compression</i>	ASTM D1075/ AASHTO T165/ ASTM STP 252
<i>Marshall immersion</i>	Stuart (1986)
<i>Modified Lottman indirect tension</i>	AASHTO T 283
Ensaio <i>Lottman</i> Modificado (Brasil)	ABNT NBR 15617

Fonte: Adaptada de Bernucci *et al.* (2010).

2.8.4 Relações entre Dano por Umidade Induzida e características das Misturas Asfálticas

Sabe-se que o reduzido V_v , por mais que seja um parâmetro de elevada correlação com a permeabilidade da mistura asfáltica executada, pode, mesmo assim, representar um potencial de dano pela ação da umidade na estrutura interna da camada, em virtude da interconexão entre os vazios e ao fato da umidade, que porventura percolar na camada, poder ficar retida dentro da estrutura, deteriorando a adesão ligante-agregado. Há registros de que misturas como concretos asfálticos (CA) de granulometria densa, indicadas para a produção de sublastro betuminoso, representam a situação descrita acima, com valor de V_v considerado como péssimo (FERREIRA, 2015).

No que se refere ao efeito do dano por umidade na permeabilidade de misturas asfálticas, há indícios de que o efeito deletério da água pode aumentar a permeabilidade da camada (o que não seria desejável para a camada de sublastro, por exemplo), em virtude, dentre outros fatores, do aparecimento de fissuras na estrutura, como mostrado por Freitas (2015), apesar de que o referido autor obteve resultados diferentes do mencionado em virtude de deficiências do processo de avaliação de permeabilidade.

2.8.5 Dano por Umidade Induzida em Sublastros Betuminosos

Para misturas asfálticas que compõem sublastros betuminosos, é escassa na literatura internacional a abordagem específica do dano por umidade. Destaca-se, entretanto, o procedimento experimental proposto por Cardona (2016), cujo objetivo concentrou-se em avaliar as propriedades termomecânicas de misturas aplicadas para o referido fim, dentre as quais o dano por umidade em virtude da indução de ciclos de congelamento e descongelamento. No método citado, diferenças são observadas em relação ao método de Lottman, adaptado para normas técnicas como a AASHTO T 283 (2014) e a NBR 15617 (2015). No método, a mistura asfáltica é compactada em placa retangular e, posteriormente, são extraídos CPs cilíndricos, sendo estes submetidos a um processo de imersão em água a 60°C por 7 dias e, posteriormente, congelados a -18°C por 1 dia. Ao fim do processo de condicionamento, a temperatura é estabilizada e novos ensaios (fadiga e módulo complexo) são feitos, em comparação a amostras não submetidas ao condicionamento. Como resultados, as misturas produzidas com CAP comum ou modificado foram classificadas como próprias para aplicação em sublastros, no que se refere à influência do processo de condicionamento ao dano por umidade em relação à fadiga e ao módulo complexo.

A análise do dano por umidade em misturas asfálticas utilizadas em estruturas de ferrovias compreende não só camadas de sublastro, mas também estruturas do tipo *slab-track*, estudadas em países como a Coreia do Sul. No estudo conduzido por Lee *et al.* (2015), utilizou-se o método AASHTO T 283 (2014) para avaliar a susceptibilidade de misturas cujo Vv projetado foi de 3% em diferentes granulometrias (com percentagens maior, intermediária e menor de agregados miúdos). Os valores de RT para a graduação mais densa (intermediária, com Vv considerado péssimo) foram maiores tanto na condição seca como na condicionada, entretanto o oposto ocorre com a RRT, que é menor para a graduação mais densa. Ao mesmo tempo, verificou-se que a mistura de granulometria mais graúda apresentou valores de coeficiente de permeabilidade superiores (por meio de ensaio de permeabilidade) e maior descolamento do filme de ligante (avaliado por meio de Processamento Digital de Imagens - PDI).

2.9 Fluxo de Água

O conceito de fluxo de água parte do princípio de que a mesma se movimenta de um ponto de maior gradiente hidráulico de pressão (carga total) a um de menor gradiente hidráulico de pressão, 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:

$$h = z + \frac{u_w}{\rho_w + g} \quad (2)$$

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:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

Sendo k_x e k_z as permeabilidades do meio em referência a eixos perpendiculares (unidade de espaço / unidade de tempo).

Dois fatores podem tornar a análise do fluxo de água em estruturas 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).

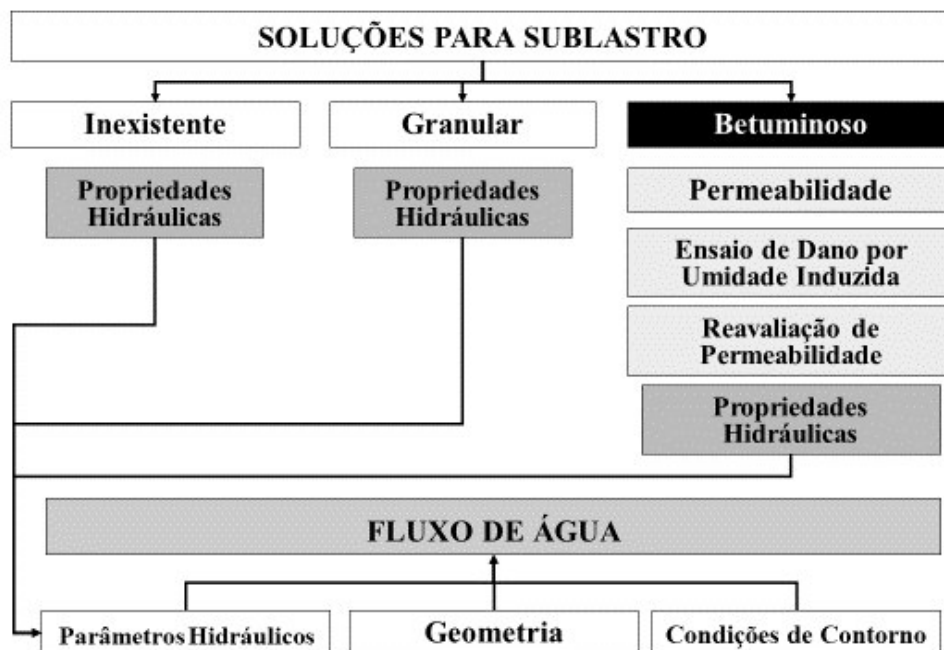
Há uma diferença marcante no que concerne ao fluxo de água em meios porosos não-saturados e saturados, uma vez que, nos primeiros, a carga hidráulica no meio é negativa (sucção), e nos segundos, é positiva. Além disso, existem materiais, tais como os solos compactados e as misturas asfálticas, que apresentam um comportamento diferente, no que se refere, especialmente, à permeabilidade do meio, quando em diferentes graus de saturação. 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). A proposição de Van Genuchten (1980) é seguida em estudos que baseiam este trabalho (FERREIRA, 2015; CHEN *et al.*, 2016). O modelo de Van Genuchten visava à formulação de uma equação para a caracterização da condutividade hidráulica (permeabilidade) e grau de saturação 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 (grau de saturação x sucção e permeabilidade x 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.*, 2002) 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

Este capítulo apresenta os materiais que serão utilizados e os métodos que serão aplicados para que se atinjam os objetivos previamente estabelecidos. Pode-se dividir esta seção entre uma primeira etapa, que compreende a apresentação dos materiais (agregados e ligante asfáltico) e dos ensaios laboratoriais realizados (que compreendem a dosagem para misturas asfálticas produzidas para a solução de ferrovias com sublastro betuminoso, passando por ensaios de permeabilidade vertical e processos de condicionamento para a indução de dano por umidade) e uma segunda etapa, que consiste na análise de fluxo de água entre camadas de infra e superestrutura ferroviária a partir do uso de um *software* de elementos finitos (*Slide6.0*). As duas etapas são complementares, uma vez que, para a entrada de dados na simulação de fluxo, é necessária a definição de valores que serão obtidos a partir da etapa laboratorial, em especial os valores de Coeficiente de Permeabilidade (k) referentes às misturas asfálticas produzidas. Em relação à avaliação de fluxo, no que concerne às propriedades das camadas granulares aplicadas em diferentes soluções, por serem as características desses materiais amplamente estudadas na literatura, os parâmetros hidráulicos que servem como *input* para as simulações de fluxo foram obtidos a partir da seleção de resultados previamente estabelecidos. Apresenta-se a seguir um fluxograma com um resumo da sequência metodológica a ser seguida neste trabalho Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma com a sequência metodológica a ser realizada neste trabalho



3.1 Materiais Utilizados

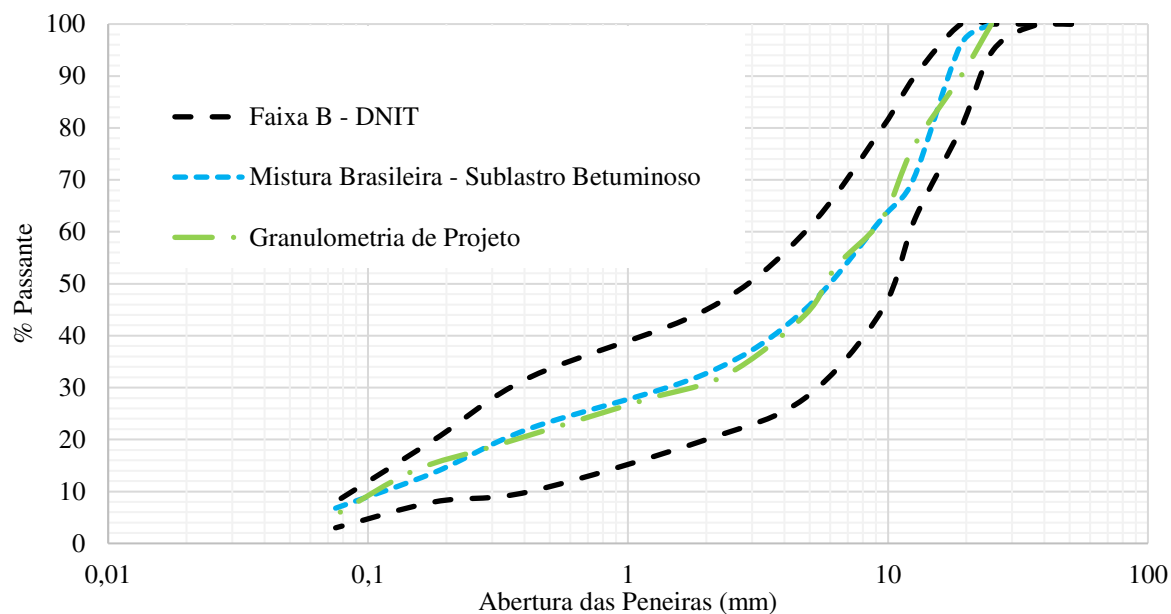
3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados para a produção das misturas asfálticas foram obtidos em duas origens distintas. O material graúdo, que engloba todo o material retido na peneira de abertura 4,75mm foi obtido a partir da coleta de agregados oriundos de uma obra ferroviária em execução (Ferrovia Transnordestina, Salgueiro/PE), cuja origem mineralógica é granítica, e as características mais relevantes do material são mostradas no estudo conduzido por Diógenes (2016). O material passante na peneira de 4,75 mm foi coletado na empresa Insttale Engenharia Ltda, obtido de uma pilha de material (pó de pedra) oriundo de pedreiras localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), cuja origem mineralógica é preponderantemente gnaisse e granito. Os materiais foram fracionados de acordo com as peneiras de abertura 19,00; 12,50; 9,50; 6,30; 4,75; 2,36; 1,15; 0,60; 0,30; 0,15; 0,075 e <0,075 mm, para a melhor adequação do material à curva granulométrica desejada.

3.1.2 Granulometria de Projeto

Para a dosagem da mistura asfáltica utilizada como sublastro betuminoso, foram observadas faixas granulométricas de referência com base em alguns experimentos internacionais. As referências escolhidas foram experimentos utilizados 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. Observou-se que os limites mostrados são compatíveis com a Faixa B do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), conforme mostrado na Figura 10. O Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados é de 19,0 mm.

Figura 10 – Granulometria de Projeto da mistura asfáltica utilizada como sublastro betuminoso



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.3 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado é do tipo CAP 50-70, produzido pela Lubnor/Petrobras. Trata-se do ligante asfáltico mais frequentemente utilizado nas obras rodoviárias da RMF. A Tabela 4 apresenta as especificações do ligante utilizado.

Tabela 4 – Características do CAP 50-70 utilizado nesta pesquisa

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50-70	61	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	Mín. 46	48,6	°C
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C	E 102	Mín. 141	192	s
Viscosidade Brookfield a 135°C - SP 21 - 20 RPM	D 4402	Mín. 274	378	cp
Viscosidade Brookfield a 150°C - SP 21	D 4402	Mín. 112	188	cp
Viscosidade Brookfield a 177°C - SP 21	D 4402	57 a 285	69	cp
RTFOT Penetração Retida	D 5	Mín. 55	72	%
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	Máx. 8	3,8	°C
RTFOT Ductilidade a 25 °C	D 113	Mín. 20	>150	cm
RTFOT Variação em % Massa	D 2872	De -0,5 a 0,5	0,028	%
Ductilidade a 25 °C	D 113	Mín. 60	>150	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D 2042	Mín. 99,5	100	% Massa
Ponto de Fulgor	D 92	Mín. 235	>300	°C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	De -1,5 a 0,7	-1,01	N/A

Fonte: Lubnor (Petrobras).

3.2 Dosagem das Misturas Asfálticas

A partir da observação de quais métodos foram utilizados internacionalmente para a dosagem das misturas asfálticas aplicadas em sublastros ferroviários, concluiu-se que os processos realizados são semelhantes aos relativos a dosagens de misturas asfálticas do tipo CA utilizadas em revestimentos de pavimentos rodoviários. Conforme mencionado, para Rose e Bryson (2009), a dosagem desse tipo de mistura deve partir de uma granulometria densa, cujo teor de ligante, variando de 4,5 a 7,0%, fornece, para um esforço de compactação determinado, um Volume de vazios (Vv) entre 1 e 3%. Entretanto, o estudo citado mostra que os valores de Vv observados em campo em obras norte-americanas chegaram a variar de 5 a 9%. Convém mencionar que a relação entre teor de ligante e Vv depende de fatores como o método de dosagem escolhido, a granulometria utilizada, o tipo de ligante utilizado, a origem mineralógica dos agregados, além de sua forma e textura, bem como a energia de compactação aplicada, dentre outros fatores.

Para o presente estudo foram dosadas misturas para uso em camadas de sublastro a partir das metodologias Marshall e Superpave. A primeira representa o estado da prática no contexto rodoviário brasileiro, sendo esta a metodologia de dosagem utilizada no fornecimento de massas asfálticas pelas empresas especializadas. Já a metodologia Superpave é considerada mais avançada, com o tipo de compactação (giratória) por amassamento considerado mais próximo do processo de compactação que ocorre em campo, tornando o esqueleto mineral dos CPs mais fiel à realidade. Além disso, a estrutura interna e a densidade máxima (Gmm), para este citado tipo de metodologia, é medida levando-se em conta a absorção de ligante pelos agregados.

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), esforço de compactação normalmente empregado na dosagem de misturas asfálticas rodoviárias. Foram anotados como teores de projeto os relativos às porcentagens de 4%, 3% e 1% de Vv. O primeiro valor é referente à prática corrente de dosagem para misturas asfálticas rodoviárias e os dois subsequentes são os valores limites de Vv orientados por Rose e Bryson (2009). A partir dos valores de teores de projeto para o Vv igual a 4%, foi reduzida a energia de compactação para a produção de CPs com Vv de 7% de ligante. CPs com Vv de 4% e 7% foram replicados para a realização de avaliações quanto ao dano por umidade induzida. A variação dos Vv das misturas buscou permitir a avaliação quanto

à permeabilidade em diferentes estágios do período de projeto da mistura, conforme será discutido a seguir.

3.3 Estágios de Avaliação de Permeabilidade das Misturas Asfálticas

3.3.1 Estágio Recém-aplicado ($V_v = 7\%$)

Esse estágio busca avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas logo após sua compactação em campo. Para isso, utilizaram-se as misturas com V_v de 7%, obtidas a partir das misturas dosadas com teor de ligante de projeto para um V_v de 4%, obtido para uma compactação de 75 golpes por face (Marshall) ou 100 giros (Superpave). Para que fossem simuladas as condições volumétricas da mistura numa condição recém-aplicada (7%), reduziu-se a energia de compactação (para a obtenção de uma mistura com um valor de V_v maior, pois os vazios na condição estudada são superiores aquele projetado em virtude de haver a pós-compactação gerada pelo tráfego) 28 golpes por face e a 20 giros (valores obtidos por meio de processos de tentativa e erro, considerando o volume da amostra e a Densidade Máxima Teórica (DMT) ou a Densidade Máxima Medida (G_{mm}) da mesma). Os CPs moldados serão avaliados quanto à permeabilidade e também quanto a resistência ao dano por umidade induzida. A avaliação de permeabilidade foi baseada no procedimento descrito por Ferreira (2013 e 2015) e Freitas (2015). O processo de dano por umidade induzida é baseado na norma NBR 15617 (2015).

3.3.2 Estágio Consolidado ($V_v = 1$ a 4%)

Esse estágio busca avaliar as misturas asfálticas quando, após determinado tempo de uso, apresentam o V_v de projeto. Um dos objetivos dessa análise é verificar a implicação da adoção de valores de V_v de 4% com relação à capacidade de impermeabilização, uma vez que essa é a prática nacional para o projeto de misturas asfálticas rodoviárias, comparando-se os valores para misturas com 3% e 1% de V_v , que são os limites de V_v propostos por Rose e Bryson (2009).

3.3.3 Estágio de Dano ($V_v = 7$ e 4%)

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,

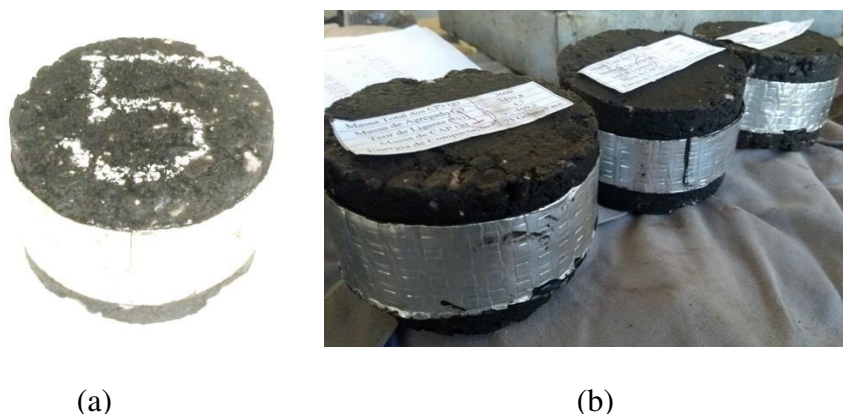
e o outro com dois dos referidos ciclos. A permeabilidade das amostras será avaliada nessas três condições e comparada com a média dos valores encontrados quando a amostra não sofre nenhum tipo de condicionamento. Os CPs com 7% de Vv, a fim de simular dano por umidade no estágio ainda inicial do uso da estrutura, serão avaliados antes e depois de um ciclo de condicionamento severo.

3.4 Ensaio de Permeabilidade para Misturas Asfálticas

Uma vez dosadas, as misturas foram avaliadas (com diferentes Vv e graus de dano por umidade induzida) quanto à permeabilidade, com o intuito de descobrir o coeficiente de permeabilidade (k) da camada de sublastro betuminoso em diferentes condições, gerando dados que foram utilizados nas simulações de fluxo. Ferreira (2015) detalha que o processo de análise de permeabilidade vertical para amostras de misturas asfálticas, realizado a partir de uma adaptação da norma NBR 14545 (2000) para análise de permeabilidade em solos argilosos de baixa permeabilidade, exige cuidados especiais na utilização de CPs de 6,5 cm de altura por 10,0 cm de diâmetro, especialmente no que se refere à vedação lateral da amostra, de forma a não comprometer a confiabilidade dos ensaios realizados. A lateral da amostra deve ser impermeabilizada para minimizar o fluxo no sentido horizontal no interior do CP e para evitar o vazamento da água pelas laterais das amostras, situações que podem alterar os resultados obtidos. Uma vez preparadas e lateralmente vedadas, as amostras são saturadas e, posteriormente, k é determinado utilizando-se o permeômetro, através de ensaio de carga variável. A sequência metodológica do ensaio de permeabilidade para misturas asfálticas (FERREIRA, 2013; FERREIRA, 2015; FREITAS, 2015) é descrita a seguir.

Inicialmente, realiza-se a compactação dos CPs (no caso desta pesquisa, foram utilizados CPs compactados por impacto – Marshall e por amassamento – Superpave), com a medição das dimensões de diâmetro e altura, e pesagens para a definição do Vv de cada amostra. Em sequência, aplica-se uma camada de manta asfáltica impermeabilizante na lateral do CP, deixando-se 1 cm descoberto acima e abaixo da manta, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Vedação lateral do CP com manta asfáltica impermeabilizante



Fonte: (a) Freitas (2015) e (b) elaborada pelo autor.

Depois, aplicam-se quantas demãos de tinta impermeabilizante Neutrol forem necessárias para o fechamento de poros visíveis e de espaços livres entre a manta asfáltica e o CP (Figura 12). Sugere-se aguardar um período de 8 horas para a secagem da amostra.

Figura 12 – Amostra após a aplicação de tinta impermeabilizante Neutrol na amostra



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência, aplica-se uma nova camada de manta asfáltica na parte superior do CP, deixando-se um espaço (como uma calha) entre a manta asfáltica e o CP para a aplicação de CAP para impermeabilização do 1,0 cm superior que estava descoberto com relação à manta asfáltica. Procede-se, então, à aplicação de CAP na parte superior do CP, e à aplicação de uma nova demão de tinta impermeabilizante Neutrol na superfície lateral do mesmo, conforme mostrado na Figura 13. Aguarda-se a secagem da amostra.

Figura 13 – Aplicação de manta asfáltica formando uma calha na parte superior do CP (a) e aplicação de CAP e da última demão de tinta Neutrol (b)



Fonte: Freitas (2015)

Deve-se prosseguir à saturação do CP. Esse passo é necessário porque, durante a avaliação de tempo de infiltração de água na amostra com o permeâmetro, caso o grau de saturação da amostra seja reduzido a níveis abaixo de 50%, é necessário um período longo de ensaio até que o fluxo ocorra em um período de tempo constante, que é o momento no qual o ensaio é parado e o resultado final é calculado. Para isso, cobre-se o CP com plástico filme, deixando-se apenas a superfície superior descoberta. Pesa-se a massa seca do conjunto preparado, adicionado ao plástico, e o material é levado para a saturação com bomba de vácuo (760 mmHg) durante aproximadamente 15 minutos. Após o processo, deve-se pesar o material na condição de Superfície Seca Saturada (SSS), para que o grau de saturação da amostra (S) seja calculado. Estando o resultado entre 70 e 80%, pode-se dar sequência ao procedimento. S é calculado conforme a Equação 4:

$$S = \frac{100 \times J}{V_a} \quad (4)$$

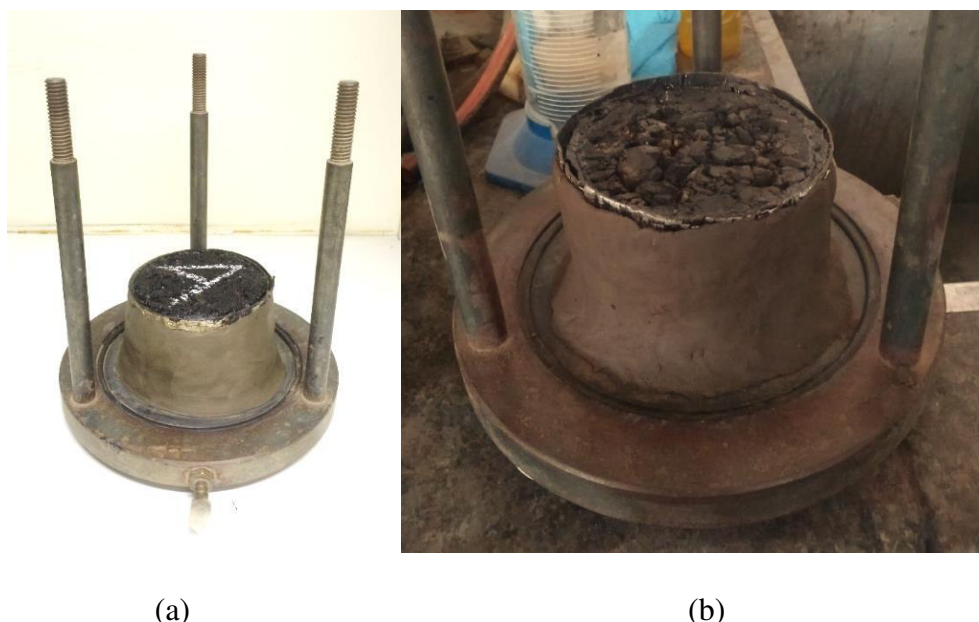
S = Grau de Saturação (%).

J (Volume de água absorvido na amostra) = B – A (Massa do conjunto na condição saturada superfície seca (B) – Massa do conjunto seco (A) (cm³)).

V_a = Volume de vazios da amostra (cm³).

Coloca-se, então, o CP sobre a pedra porosa presente no permeâmetro e cobre-se todo o espaço lateral (incluindo-se a base do permeâmetro) com argila plástica, para evitar a passagem de água no espaço entre o CP e a base do equipamento (Figura 14)

Figura 14 – Aplicação de argila plástica para vedação da base do permeâmetro



Fonte: Freitas (2015) (a) e elaborada pelo autor (b).

O permeâmetro é fechado e submete-se o sistema à entrada de água. Deve-se manter a saída de ar presente na tampa do permeâmetro aberta até o momento em que a água atingir esse ponto (quando a água começar a sair, a válvula é fechada). A coluna de água é completada até a marca final do tubo e o tempo que a coluna de água de 10 cm leva para percolar o CP é medido. Essas medidas devem ser realizadas periodicamente, até um ponto em que se perceba que esse valor é constante. Interrompe-se o ensaio quando ocorre a constância nas medidas de tempo. O valor de k é encontrado de acordo com a Equação 5.

$$k = 2,3 \times \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \times \log \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s).

a = área transversal do tubo (cm²).

L = altura da amostra (cm).

A = área transversal da amostra (cm²).

Δt = tempo decorrido entre a carga hidráulica inicial e final (s).

h_0 = carga hidráulica inicial (cm).

h_1 = carga hidráulica final (cm).

As imagens referentes ao passo metodológico final, anteriormente exposto, podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 – Etapa final do ensaio de permeabilidade de misturas asfálticas



(a) Permeâmetro fechado e bureta preenchida



(b) Dispositivo para a contagem do tempo de redução da coluna d'água

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Dano por Umidade Induzida em Misturas Asfálticas

No Brasil, a avaliação do dano por umidade induzida em misturas asfálticas é normatizada pela NBR 15617 (2015), baseada na AASHTO T283 (2014). O procedimento consiste em preparar 6 corpos-de-prova cilíndricos pelo método de compactação Marshall com dimensões de 5 a 7 cm de altura e 10 cm de diâmetro, com V_v de $7 \pm 1\%$. Deve-se controlar o V_v , por meio da verificação das densidades do CP e da G_{mm} , além do Grau de Saturação (S) da amostra, que deve permanecer ente 55 e 80%. Divide-se metade da amostra (3 CPs) para realização do condicionamento, que pode ser de elevada ou baixa severidade. Há registros de avaliação de dano por umidade a partir de CPs produzidos com V_v de 4%, em adaptações das normas mencionadas (RIBEIRO, 2011; FREITAS, 2015).

Considera-se o processo de condicionamento ao dano por umidade induzida como sendo uma forma de criar, na amostra, um estágio de fissuração que permita a entrada da umidade internamente, sendo o processo uma forma de simular o dano ocorrido em campo ocasionado por diversos fatores. No condicionamento de baixa severidade, os CPs são submetidos à imersão em água a 60°C durante um período de 24 horas. No condicionamento de elevada severidade, os CPs são envoltos em saco plástico impermeável com 10 mL de água destilada e submetidos ao congelamento a $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por um período mínimo de 16 horas. Quando decorrido o citado período, os CPs são submetidos ao banho em água a 60°C por 24 horas, e depois levados à estabilização de temperatura (25°C).

Para as misturas asfálticas produzidas para esta pesquisa, foram avaliados dois Vv quanto ao dano por umidade induzida (7% e 4%), tanto por estes serem os parâmetros dos quais se tem registros mais recorrentes quanto a esse tipo de condicionamento na literatura, quanto por representarem as misturas asfálticas durante dois estágios de sua vida de projeto: um inicial, anterior à pós-compactação oriunda do tráfego, no caso das misturas asfálticas aqui avaliadas, dos veículos ferroviários, com um Grau de Compactação que resulta em um Vv de 5 a 7% de vazios, inclusive há registros na literatura internacional de misturas para sublastro que, em campo, apresentavam um Vv de aproximadamente 9% (ROSE e BRYSON, 2009) e um consolidado, quando a pós-compactação já ocorreu e a mistura asfáltica atinge o Vv de projeto (aproximadamente 4%).

Para as misturas asfálticas com 7% de Vv, foram avaliados 6 CPs virgens e 6 CPs submetidos ao processo de condicionamento (metade dos quais compactados em cada um dos métodos avaliados, Marshall e Superpave) quanto à permeabilidade e quanto à Relação de Resistência à Tração (RRT), objetivando-se a avaliação simplificada da influência do dano mencionado em uma propriedade hidráulica (permeabilidade) da mistura, que é o foco principal deste trabalho, mas também em uma propriedade mecânica (Resistência à Tração, RT). Já para as misturas com 4% de Vv, foram avaliados 12 CPs compactados pelo método Marshall e 12 CPs compactados pelo método Superpave quanto à permeabilidade. O primeiro grupo de 3 dos 12 CPs foi moldado e não passou por processo de condicionamento. Já o segundo grupo passou por um processo de condicionamento de baixa severidade estabelecido pela NBR 15617 (2015), o terceiro por um ciclo de condicionamento severo e o quarto por dois ciclos consecutivos de condicionamento severo, para que fosse avaliada a existência ou não de uma tendência de aumento da permeabilidade de acordo com o aumento do grau de severidade do condicionamento realizado durante o ensaio de Lottman.

Figura 16 – Processo de condicionamento ao dano por umidade induzida (NBR 15617, 2015)



(a) aplicação de vácuo para saturação do material



(b) recobrimento dos CPs com plástico



(c) colocação dos CPs a -18°C



(d) colocação dos CPs em banho-maria a 60°C

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6 Avaliações Adicionais de Parâmetros Referentes à Permeabilidade e ao Dano por Umidade Induzida

3.6.1 Influência do Dano por Umidade Induzida no Comportamento Mecânico

O procedimento descrito na sequência foi realizado para CPs com 7% de Vv. Conforme preconiza a NBR 15617 (2015), os CPS foram submetidos à estabilização de temperatura (25°C) e, na sequência, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 17) foi realizado, para avaliar o parâmetro de resistência à tração retida (comumente chamado de RRT), para que se obtivessem indícios do potencial de o dano por umidade induzida recair sobre o desempenho mecânico das misturas asfálticas avaliadas. A partir de uma média de 3 resultados de ensaios para cada condição (não condicionada e condicionada) e para cada método de compactação (Marshall e Superpave), em um total de 12 CPs rompidos, verifica-se se há uma tendência de perda de resistência em virtude do processo de condicionamento. Nesta pesquisa, foi assumido que, caso a resistência retida fosse inferior à 80%, a mistura avaliada seria classificada como susceptível ao dano por umidade induzida (AASHTO T283, 2014).

Figura 17 – Prensa para rompimento de CPs à compressão diametral



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.6.2 Avaliação da influência da Condição de Superfície do CP na Permeabilidade das amostras de Misturas Asfálticas

Ao longo do processo metodológico em discussão, questionou-se quais fundamentos, além do Vv, poderiam explicar o fenômeno da permeabilidade caso os resultados fossem dispersos entre si. Uma das opções levantadas foi a macrotextura superficial das amostras. Avaliou-se a influência da textura superficial nos resultados de k das misturas asfálticas a partir de uma simplificação do ensaio de Mancha de Areia (DNIT, 2006). O intuito do método

proposto é verificar se há indícios de, para V_v , de o valor de k ser parcialmente explicado pela condição de superfície do CP. Para tanto, 2 mL de areia (passante na peneira de abertura 0,300 mm e retidas na de 0,150 mm) foram espalhados nas superfícies dos 51 CPs produzidos e previamente avaliados quanto à permeabilidade. O resultado do ensaio, a partir da média de 4 medidas de diâmetro da mancha é obtido pela Equação 6. Algumas imagens do procedimento proposto podem ser observadas na Figura 18.

$$PD = \frac{4 \times V}{\pi \times d^2} \quad (6)$$

No caso, PD (do inglês *Profile Depth*) representa uma média da profundidade dos microcanais formados pelas irregularidades da superfície do CP (unidade de espaço), V representa o volume conhecido de areia espalhada na superfície (unidade de volume) e d a média dos diâmetros (unidade de espaço). Os resultados da adaptação do ensaio são, para os mesmos métodos de compactação e V_v , comparados com os resultados dos ensaios de k e avaliados quanto à representatividade através do parâmetro estatístico R^2 , que é a correlação que foi obtida para cada intervalo de V_v (0 a 3%, 3 a 5% e > 5%).

Figura 18 – Ensaio de mancha de areia adaptado para CPs



(a) Medição de 2 mL



(b) Espalhamento da areia na superfície dos CPs



(c) Exemplo de CP com elevada macrotextura superficial

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7 Parâmetro de Avaliação de Correlações

Foram avaliadas correlações entre diferentes variáveis e os valores de permeabilidade obtidos pelo parâmetro R^2 . A classificação subjetiva da correlação seguida neste trabalho é definida pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (TRB, 2002) e mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação subjetiva do nível de correlação entre variáveis.

Classificação	R^2
Excelente	> 0,90
Boa	0,70 a 0,89
Razoável	0,40 a 0,69
Fraca	0,20 a 0,39
Muito fraca	< 0,19

Fonte: TRB, 2002.

3.8 Fluxo de Água

As simulações de fluxo foram realizadas a partir do uso do *software* de elementos finitos *Slide6.0*, desenvolvido pela empresa *Rocscience* para a avaliação de fluxo em estruturas de barragens, porém já aplicado em estudos prévios (FERREIRA, 2015) em infraestruturas de transporte. Definem-se três passos metodológicos para a análise de fluxo: dados de entrada, condições de contorno e geometria. O principal dado de entrada consiste nas propriedades hidráulicas (e também mecânicas quando se objetiva avaliar questões como a estabilidade de barragens), 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.

3.8.1 Dados de Entrada: 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 considerados como seguindo um modelo geral (que considera apenas a permeabilidade e a anisotropia do material). Isso se dá pelo fato de que, no caso do lastro granular, tem-se uma permeabilidade elevada e a disposição dos materiais na camada nos sentidos horizontal e vertical é semelhante. Já os materiais de sublastro (granular e betuminoso) e subleito serão simulados a partir do uso do modelo de Van Genuchten (1980), conforme o proposto no estudo conduzido por Ferreira (2015).

3.8.1.1 Propriedades Hidráulicas do Lastro Granular

Para a definição das propriedades hidráulicas do lastro granular, adotou-se a premissa de que a permeabilidade da camada possui $k = 0,3$ m/s quando 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) para a avaliação da permeabilidade e do fluxo de água em materiais de lastros coletados na RMF. Outro parâmetro utilizado pelo *Slide6.0* para a simulação de fluxo é a umidade da camada (do inglês *Water Content – WC*, sigla utilizada pelo programa). Merheb (2014) considera como seco o material que possui *WC* de até 5% (no caso, $0,05$ m³/m³) e material úmido o que possui *WC* de 5 a 15%, avaliados como sendo condições nas quais se verifica uma maior tendência de maiores deformações axiais. Além disso, assume-se que a camada possui isotropia quanto à permeabilidade nos sentidos vertical (k_v) e horizontal (k_H), simplificação utilizada também por Tennakoon *et al.* (2012).

3.8.1.2 Propriedades Hidráulicas do Sublastro Granular

A permeabilidade do sublastro granular foi definida com base no estudo conduzido por Von der Osten (2012), para solos lateríticos da região da Estrada de Ferro Carajás. Uma das argilas consideradas apropriadas, de acordo com as análises realizadas, apresentava $k = 1,36E-07$ 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 um solo classificado como argiloso (classificação semelhante ao solo avaliado) cuja permeabilidade fosse mais próxima da avaliada no estudo de Von der Osten (2012), de ordem de 10^{-7} m/s. 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.

3.8.1.3 *Propriedades Hidráulicas do Sublastro Betuminoso*

No caso dos valores de permeabilidade (k) e conteúdo de água (WC), os valores são obtidos diretamente dos ensaios realizados, conforme mostrado anteriormente, e variam conforme o tipo de compactação utilizada, a volumetria da amostra, dentre outros parâmetros, como o grau de severidade do dano por umidade induzida. 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 fornecidos ao programa se deu pela definição de $\alpha = 0,348$ e $n = 1,137$.

3.8.1.4 *Modelo proposto para Subleito*

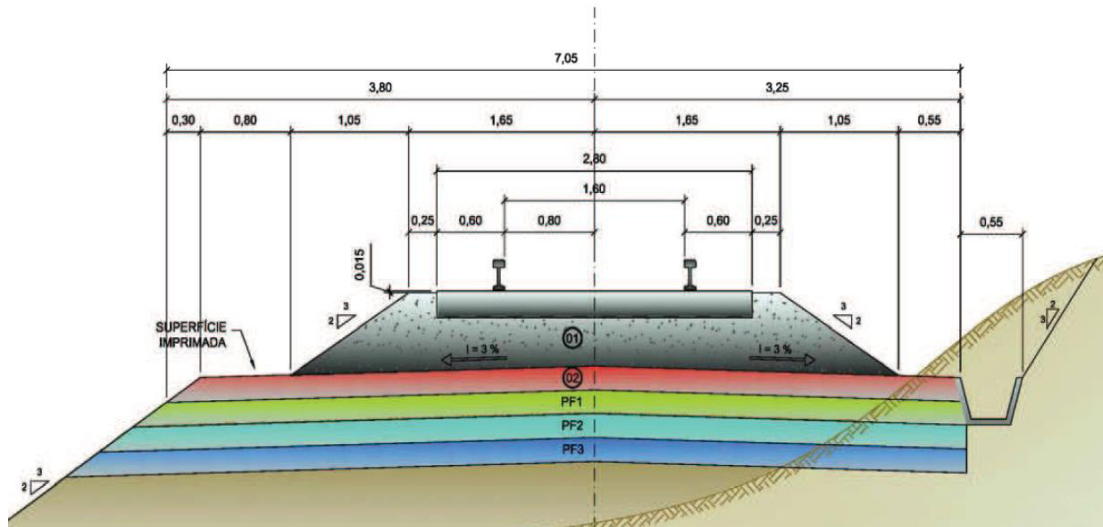
Nas simulações de fluxo conduzidas por Ferreira (2015), para contexto rodoviário, o modelo de subleito proposto foi baseado em curvas características de sucção *versus* conteúdo de água e valores de permeabilidade desenvolvidas por Peixoto (2011). O solo proposto era uma areia argilosa tipicamente encontrada no estado de São Paulo. As curvas características são baseadas em um valor de k no estado saturado de $1,6E-06$ m/s.

3.8.2 *Geometria da Estrutura*

As diferentes propostas de seções transversais de ferrovias avaliadas neste trabalho se basearam em um seção-tipo de uma obra ferroviária em execução, cujo projeto foi cedido para estudos na Universidade Federal do Ceará. A seção-base apresenta como características geométricas uma camada de lastro de espessura de 40,0 cm no espaço entre dormente e sublastro e largura (no topo) de 3,3 m, com um “ombro” de inclinação 3:2 (no sentido horizontal - vertical). A ferrovia apresenta um sublastro granular de espessura 20 cm, com inclinação de 3%, em direção aos dispositivos de drenagem, além de subleito reforçado em 3 camadas de 20,0 cm com CBR crescente (no sentido solo de fundação - sublastro) de 8, 10 e 25%, acima do terreno natural nivelado a partir de cortes e aterros. Além disso, foi projetada uma imprimação na camada de sublastro, para fins de impermeabilização. Observa-se, na Figura 19, que o sublastro possui largura sempre superior ao lastro, existindo uma parte da superfície que estará

diretamente sujeita ao fluxo de água oriundo de precipitações ou do volume de água drenado pela camada de lastro. Para uma maior praticidade das análises realizadas com o uso do *software*, e conforme o que também foi feito por Ferreira (2007), Tennakoon *et al.* (2012) e Ferreira *et al.* (2015), assume-se que a estrutura é totalmente simétrica. Assim, as geometrias foram desenhadas em CAD e reproduzidas no *software Slide6.0*.

Figura 19 – Seção-tipo da qual derivam as estruturas avaliadas quanto ao fluxo de água



Fonte: Transnordestina Logística (Memória de Cálculo).

3.8.2.1 Lastro diretamente apoiado sobre o Subleito

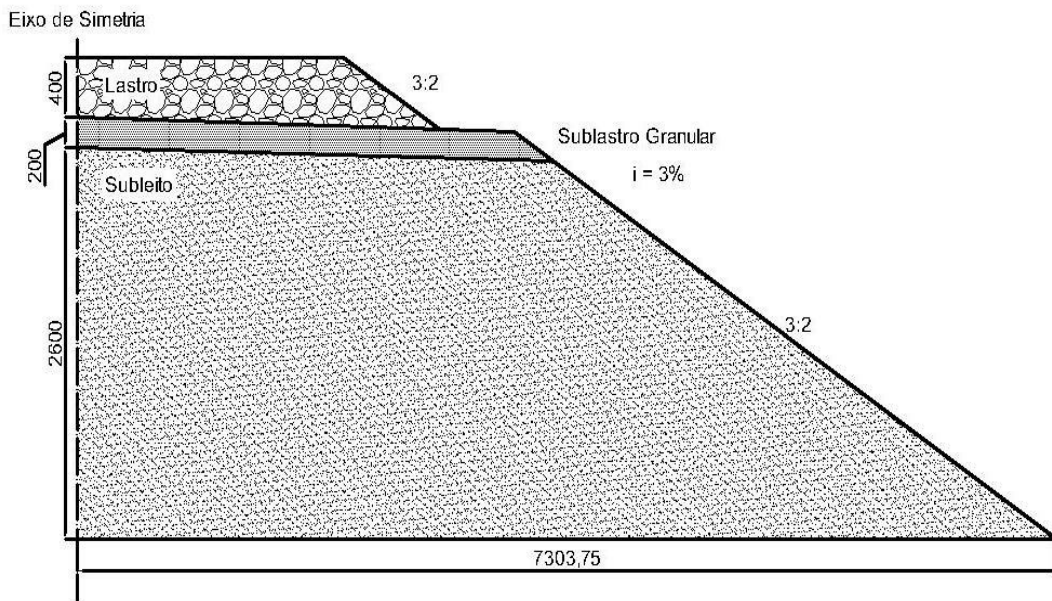
Simulou-se uma situação na qual não é projetada uma camada de sublastro para a ferrovia, sendo o lastro diretamente apoiado sobre o subleito. Essa solução, apesar de tecnicamente não recomendável, ainda persiste em trechos de ferrovias mais degradadas, por exemplo, no Nordeste do Brasil. Nesse caso, a estrutura será avaliada com 3 m de profundidade, sendo (no centro da seção) uma espessura de lastro relativo a 40,0 cm e 2,6 m referentes ao subleito.

3.8.2.2 Estrutura Tradicional (Lastro + Sublastro Granular (20 cm e $i = 3\%$) apoiados sobre o subleito)

O que foi padronizado como "Estrutura Tradicional" neste trabalho faz referência à proposição das duas camadas granulares (lastro e sublastro) apoiadas no subleito, tendo-se como base a seção da Ferrovia Transnordestina mostrada anteriormente. Em relação à estrutura real, algumas adaptações e simplificações foram adotadas, como a de definição de propriedades hidráulicas únicas para o subleito, não sendo consideradas as diferenças de permeabilidade, anisotropia ou tipo de solo que porventura possam existir quando se comparam solos com diferentes valores de CBR para um mesmo fim, que seria o de reforço do subleito. Assim sendo,

a estrutura avaliada possui espessuras de camadas de 40 cm e 20 cm, respectivamente, para as camadas de lastro e de sublastro, além da cobertura de até 2,6 m de profundidade para o subleito, tendo-se como referência o centro da seção simétrica. As inclinações de referência são de 3:2 no ombro do lastro e no talude, além da inclinação de 3% da camada de sublastro para o direcionamento da água drenada aos corpos coletores. Uma imagem simplificada do modelo geométrico pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Geometria avaliada para a Estrutura Tradicional



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.8.2.3 Estrutura Tradicional sem Inclinação no Sublastro ($i = 0\%$)

A proposição dessa geometria busca avaliar a consequência para o fluxo de água em uma estrutura ferroviária quando há erros de execução ou de projeto que tenham por consequência a redução ou a inexistência de uma inclinação transversal da camada de sublastro (camada a qual é vista como a solução, do ponto de vista geométrico, para que seja garantido o fluxo de água em direção às laterais da estrutura).

3.8.2.4 Lastro + Sublastro Betuminoso

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 (além das diferentes permeabilidades relacionadas à volumetria e ao grau de dano por umidade das amostras, conforme mencionado anteriormente), a redução da inclinação da camada de sublastro betuminoso, o aumento da

espessura da camada e também o efeito de uma menor cobertura do subleito pela camada asfáltica. Um resumo dos cenários avaliados é mostrado na Tabela 6.

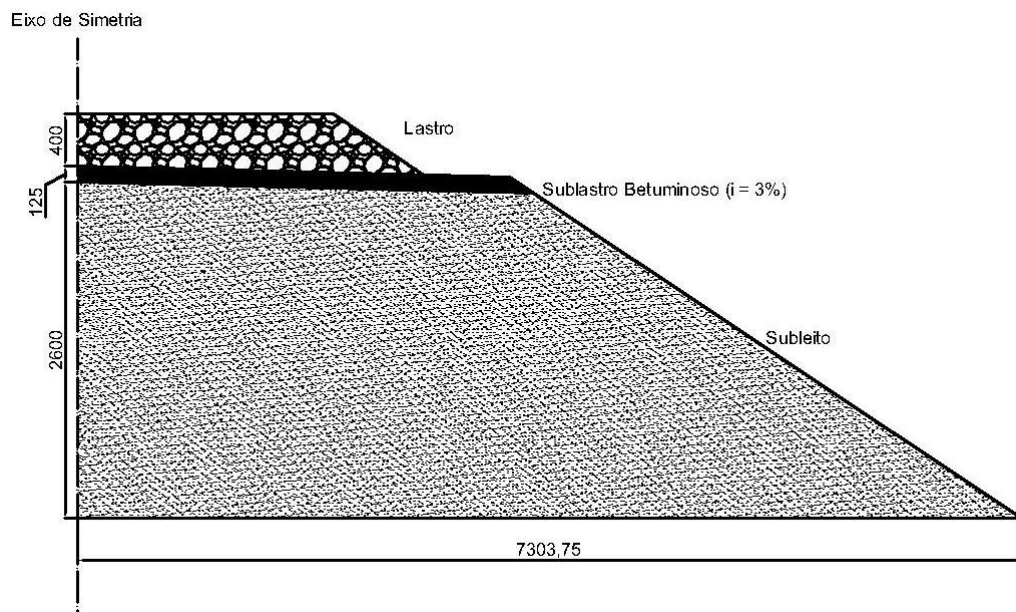
Tabela 6 – Resumo de cenários de geometria avaliados para estruturas com uso de camada de sublastro betuminoso

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%

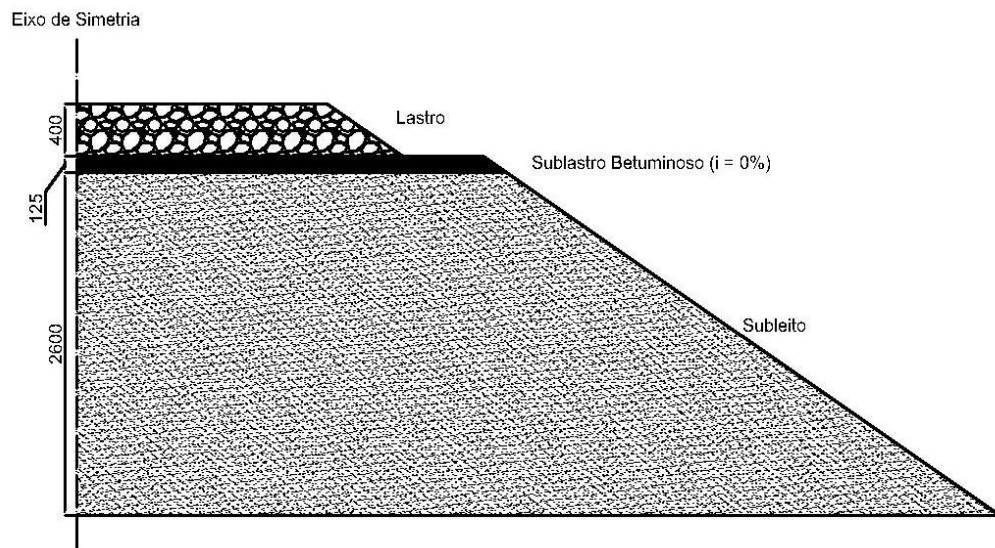
Fonte: Elaborada pelo autor.

As geometrias avaliadas podem ser observadas na Figura 21.

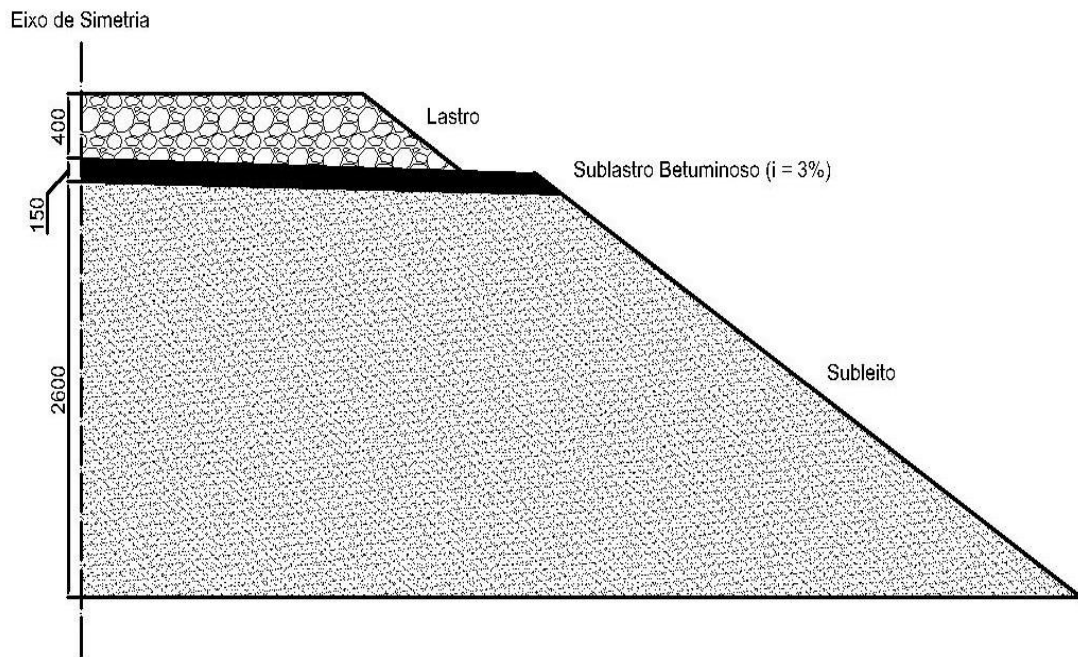
Figura 21 – Algumas geometrias avaliadas para a solução contendo sublastro betuminoso



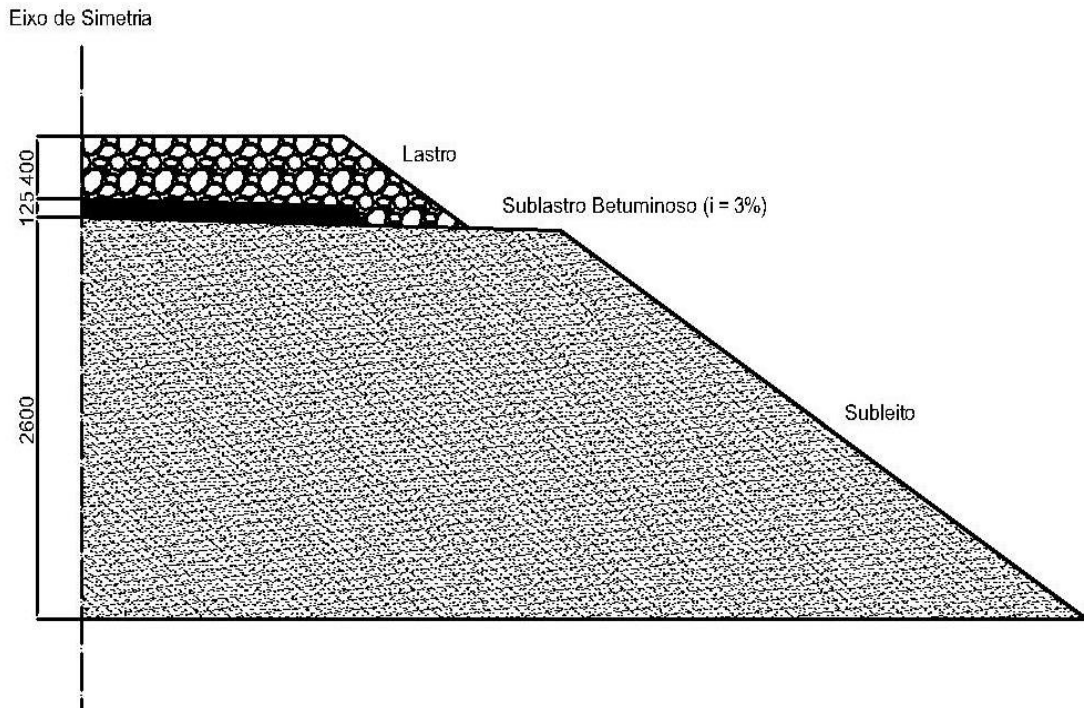
(a) – Sublastro betuminoso com 12,5 cm de espessura e inclinação transversal de 3%



(b) – Sublastro betuminoso de 12,5 cm de espessura sem inclinação transversal



(c) – Sublastro betuminoso com 15,0 cm de espessura e inclinação transversal de 3%



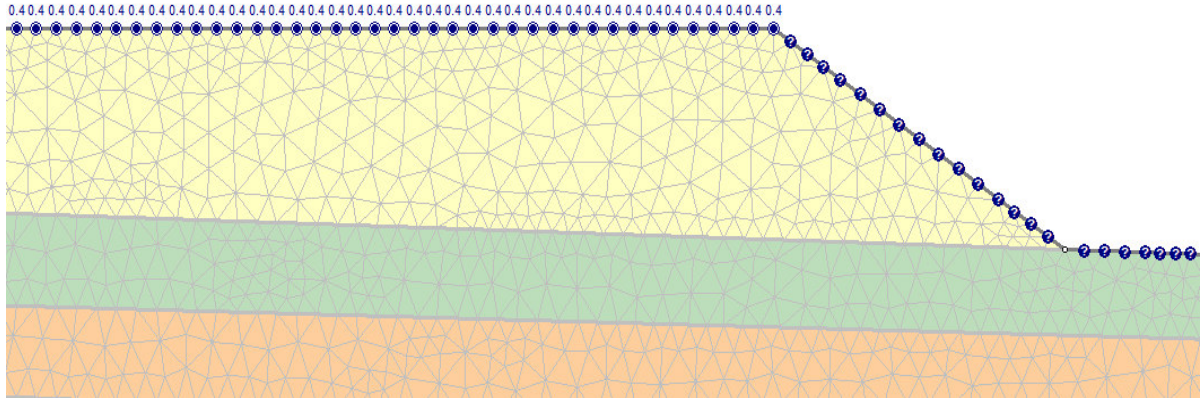
(d) – Sublastro betuminoso com 12,5 cm de espessura e recobrimento apenas parcial do subleito

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.8.3 Condições de Contorno: Lâmina d'água e Tempo de Fluxo

Conforme proposto nos estudos conduzidos por Tennakoon *et al.* (2012) e Ferreira *et al.* (2015), avalia-se uma lâmina d'água de espessura proporcional à do lastro, posicionada no topo da camada, conforme mostrado na Figura 22. No caso deste estudo, a espessura da camada de lastro no projeto que embasa as geometrias propostas é de 40 cm, medidos abaixo dos dormentes. Assim, estabeleceu-se uma lâmina d'água de 40 cm para as avaliações de fluxo. O tipo de análise a ser realizada é uma simulação de fluxo transiente, que é definido como sendo o tipo de fluxo que ocorre quando as poro-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, serão avaliados 6 estágios de tempo: 0,25, 0,50, 1,00, 2,00, 12,00 e 24,00 horas em estrutura submetida ao fluxo da lâmina d'água de 40 cm.

Figura 22 – Espessura de lâmina d’água proposto para a simulação de fluxo



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.8.4 Metodologia de Análise

A análise do fluxo de água entre camadas se dará levando-se em consideração 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, além de menor descarga vertical na base do sublastro. Além disso, a avaliação da carga hidráulica em pontos como a base do sublastro e o interior do subleito pode ser um parâmetro de comparação entre a qualidade da impermeabilização gerada pelas diferentes soluções de sublastro. O detalhamento dessas análises pode ser observado no Capítulo 4.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos nesta pesquisa, com o intuito de atingir os objetivos específicos descritos previamente. Inicialmente, serão apresentados e analisados os resultados referentes às dosagens das misturas asfálticas para composição de camada de sublastro. Procede-se aos resultados referentes à permeabilidade para todas as misturas asfálticas avaliadas, além de avaliações a respeito do dano por umidade e de outros fatores que podem estar associados aos valores de permeabilidade encontrados. Em seguida, os resultados obtidos a partir de simulações de fluxo serão apresentados para diferentes cenários, dentre os quais se avalia o comportamento das estruturas completamente granulares, das estruturas que incorporam misturas asfálticas e das diferenças quanto ao fluxo observadas entre elas.

4.1 Dosagens das Misturas Asfálticas

As dosagens das misturas asfálticas foram realizadas conforme exposto no Capítulo 3, seguindo-se os métodos Marshall e Superpave. A principal diferença entre os métodos é a forma de compactação utilizada. Enquanto no primeiro aplicam-se golpes, compactando-se os CPs por impacto, no segundo, utiliza-se um compactador giratório, que compacta os CPs por amassamento. O resultado da dosagem das misturas asfálticas é o teor de ligante de projeto, relacionado ao Vv utilizado. Para esta pesquisa, foram realizadas dosagens com os Vv de 4%, 3% e 1%. Já o Vv de 7%, com a intenção de avaliar o estágio inicial de adensamento da mistura, foi obtido a partir do teor de projeto encontrado para 4% de Vv, com a redução da energia de compactação de 75 para 28 golpes/face – Marshall e de 100 para 20 giros – Superpave, conforme prática corrente para realização do ensaio de dano por umidade induzida). Um resumo dos resultados encontrados para as dosagens realizadas neste trabalho é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos resultados de dosagens realizadas a partir dos métodos Marshall e Superpave para misturas asfálticas utilizadas em sublastro betuminoso

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

Tipo de Dosagem	Energia de Compactação	Vv (%)	(%) CAP	Gmm
Superpave	100 Giros	3	4,6	2,450
Superpave	100 Giros	1	5,3	2,416
Superpave*	20 Giros	7	4,3	2,464

* Os resultados mostrados foram obtidos a partir da dosagem para Vv = 4%, com menor esforço de compactação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos de teor de ligante de projeto para as misturas avaliadas neste estudo, no caso de Vv de 1% e de 3%, enquadram-se nos limites propostos por Rose e Bryson (2009), que citam variações de 4,5 a 7,0% no teor de ligante de projeto para misturas asfálticas produzidas para aplicação em sublastro para atingir Vv de 1 a 3%. Convém mencionar que a relação entre teor de ligante e Vv depende de fatores como o método de dosagem utilizado, a granulometria escolhida, o tipo de ligante utilizado, a origem mineralógica dos agregados, além de suas propriedades de forma, bem como a energia de compactação aplicada, dentre outros fatores.

As particularidades das misturas produzidas para uso em camadas de sublastro foram colocadas em perspectiva em relação às misturas asfálticas produzidas para uso em pavimentos rodoviários. A diferença mais marcante com relação à prática para o meio rodoviário é relacionada à faixa granulométrica, que, nacionalmente, tende a seguir a Faixa C (DNIT, 2006), enquanto que para misturas asfálticas para uso em camadas de sublastro, a partir da experiência internacional, possuem intervalos de granulometria que se assemelham à Faixa B (DNIT, 2006). Segundo a norma brasileira, a Faixa B pode ser aplicada como camada de rolamento ou como camada de ligação em rodovias, e uma das características da granulometria escolhida (enquadrada dentro da Faixa B) é que a curva granulométrica permite a visualização de uma linha próxima à de densidade máxima, o que pode levar à dificuldade de incorporação do ligante asfáltico nos vazios da mistura. Essa dificuldade foi observada para a mistura e compactação de alguns CPs no presente trabalho, corroborando com a proposição de, para sublastros betuminosos, evitar-se o enquadramento da granulometria em uma linha próxima à de densidade máxima.

4.2 Permeabilidade das Misturas Asfálticas

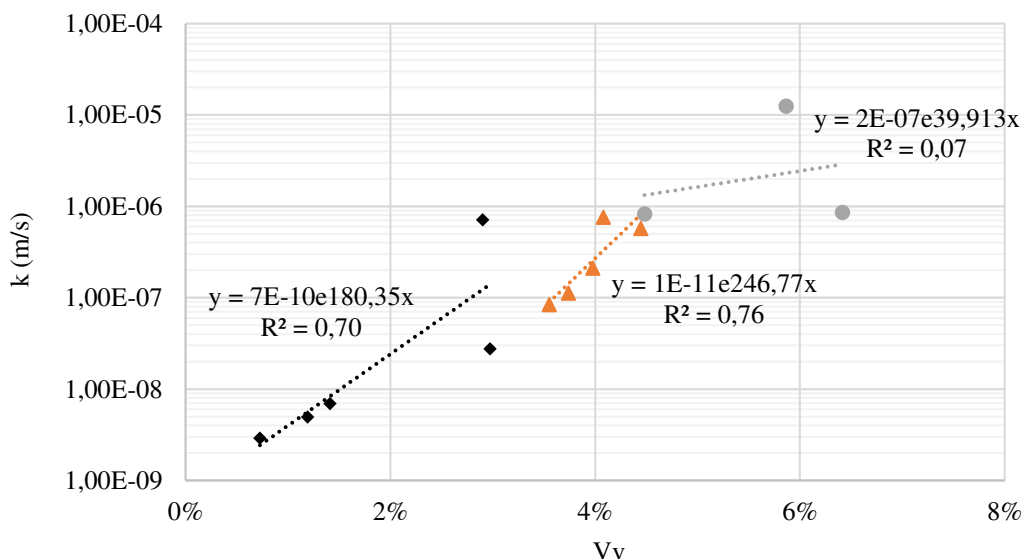
A permeabilidade das misturas asfálticas foi avaliada a partir de uma adaptação da norma NBR 14545 (2000), objetivando-se a determinação dos coeficientes de permeabilidade (k) para misturas asfálticas utilizadas em camadas de sublastro ferroviário em diferentes estágios de sua

vida útil: o estágio inicial (quando o Vv da mistura é mais elevado, no caso desta pesquisa, assumido como próximo de 7%), o estágio consolidado (assumindo-se as misturas asfálticas com parâmetros volumétricos de acordo com o projetado), que, em termos de Vv, no caso desta pesquisa, adotaram-se os valores de Vv de 4%, utilizado tradicionalmente para rodovias, 3% e 1%, que são os limites propostos por Hensley e Rose (2000).

4.2.1 Estágios Inicial e Consolidado

Os resultados de k para diferentes Vv, para CPs moldados segundo o método Marshall, são mostrados na Figura 23 a seguir. Optou-se por apresentar os resultados em função de faixas de Vv. A primeira faixa, para Vv de 0 a 3%, a segunda faixa de 3 a 5% (sendo esses dois primeiros casos em que, assume-se, a mistura atingiu o Vv de projeto, depois da pós-compactação oriunda do tráfego) e a terceira faixa com Vv superiores a 5% (representando o que seria um estágio recém-aplicado da mistura em campo, com maiores Vv). Essa avaliação fragmentada, inicialmente, visa à verificação da variação da relação Vv *versus* k, em função do parâmetro R². Foram avaliados CPs com teores de ligante referentes aos resultados de dosagem para os diferentes Vv, sendo os CPs de Vv próximo de 7% obtidos a partir da redução da energia de compactação a partir de uma mistura com teor de projeto para 4% de Vv.

Figura 23 – Resultados de k para CPs com Vv num intervalo de 0 a 8%, compactados a partir do método Marshall, com parâmetros de R² referentes a faixas crescentes de Vv

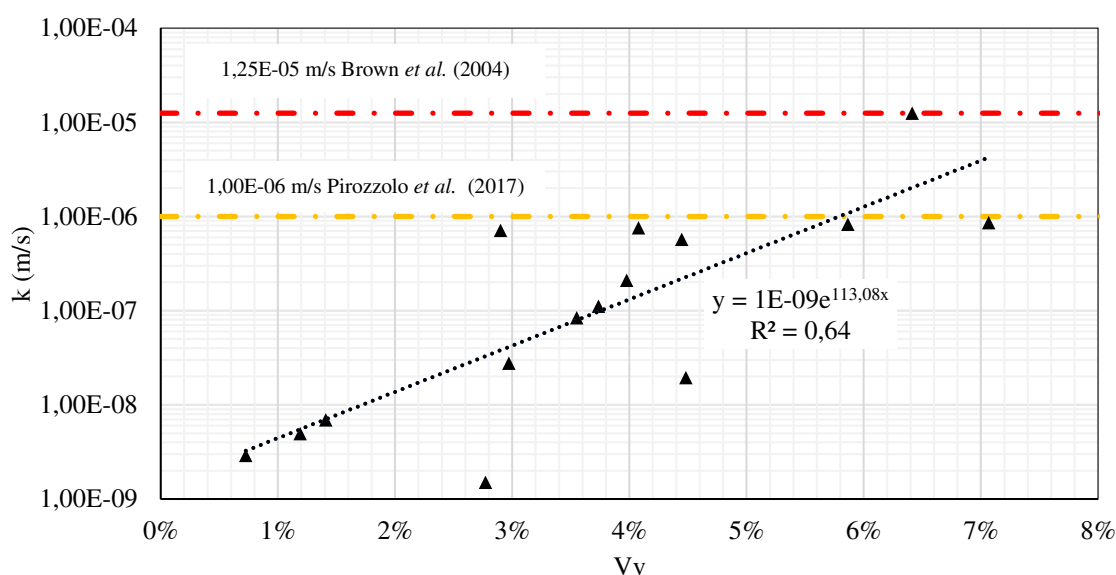


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que, para Vv obtidos até 5%, há uma boa correlação deste parâmetro (R² superior a 0,7) com os resultados de k. Para as amostras com Vv superiores a 5%, a influência

direta do V_v na permeabilidade das misturas asfálticas não foi observada ($R^2 = 0$). A amostragem reduzida (3 CPs com aproximadamente 7% de V_v) é um fator que reduz a confiabilidade dos resultados, entretanto, há um consenso na literatura, conforme mostrado no Capítulo 2, de que fatores aleatórios, como a distribuição dos vazios após o processo de compactação, que é reduzido a 28 golpes por face para a produção de CPs com V_v próximo de 7%, são preponderantes na definição da permeabilidade das misturas à medida em que o V_v é mais elevado ou o processo de compactação é menos eficiente. Quando se analisam as amostras sem separá-las em intervalos de V_v , obtém-se uma correlação satisfatória, na qual a elevada correlação entre os valores de k e V_v iniciais compensa a correlação insatisfatória das amostras com $V_v > 5\%$, conforme pode ser visto na Figura 24. Uma das limitações da avaliação de correlação entre V_v e k apresentada a seguir encontra-se no fato de que, para diferentes V_v , há um teor de ligante diferente, crescente com a redução do V_v (com exceção do V_v de 7%, obtido com teor de ligante igual ao V_v de 4% com menor esforço de compactação). Essa condição pode influenciar o comportamento dos materiais, pela alteração de características como a conexão entre vazios e o tamanho dos mesmos.

Figura 24 – Resumo dos resultados de permeabilidade para todas as faixas de V_v para misturas produzidas a partir do método Marshall



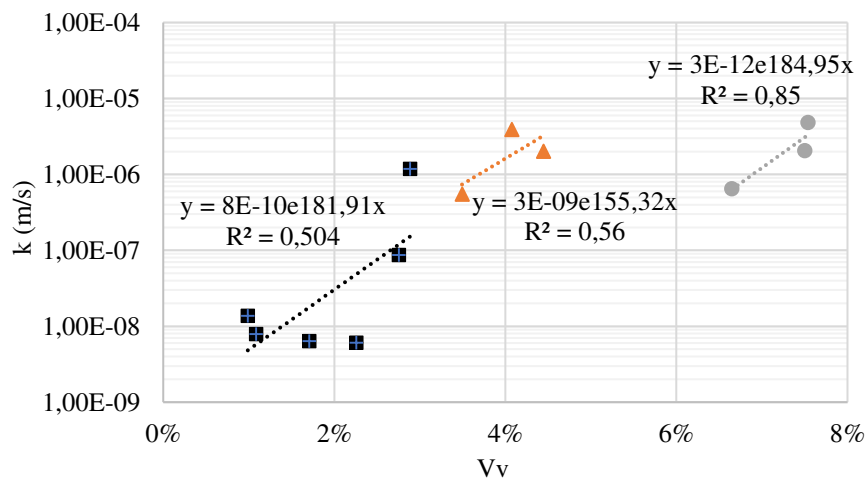
Fonte: Elaborada pelo autor.

Todas as misturas avaliadas no intervalo de V_v 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. A mesma avaliação pode ser feita quando as misturas asfálticas produzidas são

comparadas com o critério proposto por Pirozzolo *et al.* (2017), de k máximo de $1,0E-06$ m/s para materiais utilizados em sublastros ferroviários. O máximo k medido dentre as misturas asfálticas em estágio consolidado (V_v próximos de 1%, 3% e 4%) avaliadas neste trabalho e dosadas pelo método Marshall foi de $7,57E-07$ m/s, para um CP de V_v equivalente a 4,1%. Com relação a critérios de impermeabilidade, os CPs avaliados com V_v superiores a aproximadamente 6% não cumprem o requisito sugerido por Pirozzolo *et al.* (2017), possuindo um k médio de $4,72E-06$ m/s, mais de 4 vezes superior ao limite proposto de $1,00E-06$ m/s de k para sublastros ferroviários.

A avaliação de permeabilidade em CPs compactados no CGS, ao contrário do que foi observado nos resultados anteriormente mostrados (método Marshall) apresentou R^2 melhor para CPs com $V_v > 5\%$ ($R^2 = 0,85$), sendo menor (R^2 de aproximadamente 0,5) CPs com V_v de 0 a 5% (Figura 25)

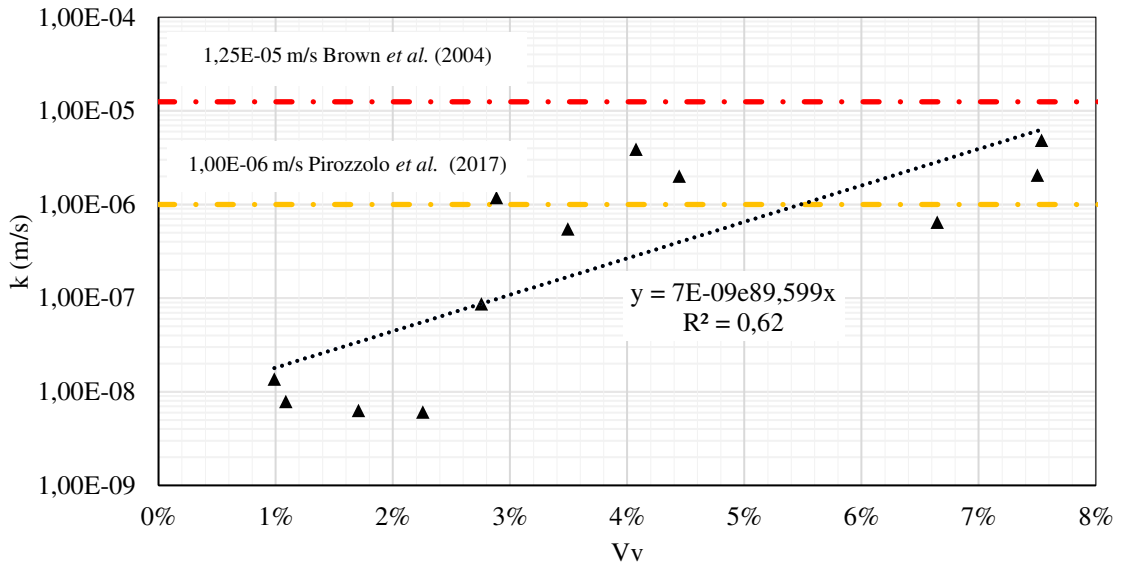
Figura 25 – Resultados de k para CPs com V_v num intervalo de 0 a 8%, produzidas a partir do método Superpave, com parâmetros de R^2 referentes a faixas crescentes de V_v



Fonte: Elaborada pelo autor.

Levando-se em conta a totalidade das amostras, o R^2 obtido é o mesmo para o obtido para os CPs dosados e compactados de acordo com o método Marshall ($R^2 = 0,62$). Entretanto, no que se refere à permeabilidade em si das misturas asfálticas, pode-se observar que, para as amostras obtidas de acordo com o método Superpave, amostras com V_v de 4% de V_v já começaram a apresentar valores de k superiores ao limite de $1,0E-06$ m/s (PIROZZOLO *et al.*, 2017), entretanto todos os CPs avaliados apresentaram k menor que $1,25E-05$ m/s proposto por Brown *et al.* (2004). Os resultados podem ser observados na Figura 26.

Figura 26 – Resumo dos resultados de permeabilidade para todas as faixas de V_v para misturas produzidas a partir do método Superpave



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2 Considerações sobre a Permeabilidade das Misturas Asfálticas com V_v de 1%, 3% e 4%

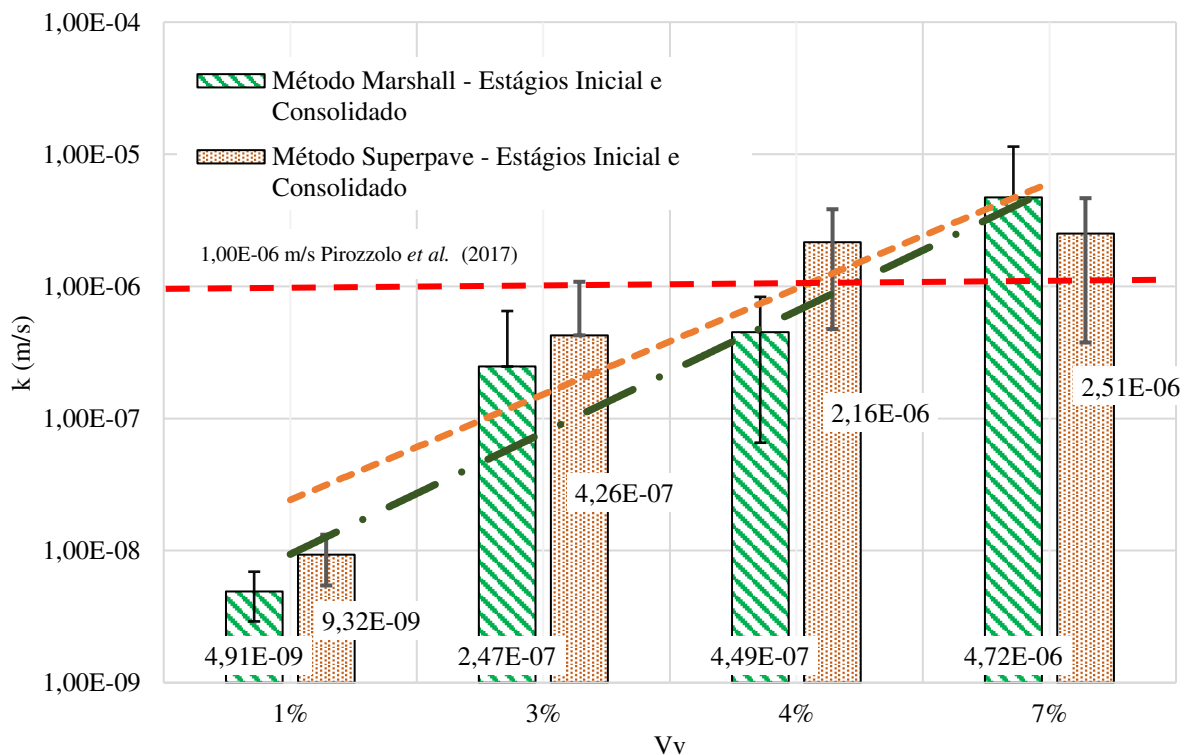
Os resultados obtidos foram comparados com aqueles apresentados por Ferreira (2015) e Freitas (2015), que avaliaram a permeabilidade de misturas asfálticas para uso em revestimentos rodoviários a partir de CPs dosados através do método Superpave, com a adição de compostos minerais, no caso do último estudo. Misturas não condicionadas ao dano por umidade avaliadas por Freitas apresentaram CV de 172% para um mesmo V_v (4%), variando da ordem de 10⁻⁹ m/s a 10⁻⁷ m/s. Para CPs condicionados ao dano por umidade e também para CPs com maior V_v (7%), Freitas (2015) obteve valores de k que excederam o valor de 10⁻⁶ m/s.

No caso deste trabalho, todas as misturas asfálticas avaliadas (dentre as quais aquelas com V_v máximo de aproximadamente 7%) apresentaram permeabilidade menor que o critério proposto por Brown *et al.* (2004) de k máximo de 1,25E-05 m/s. Entretanto, se comparadas com o critério mostrado por Pirozzolo *et al.* (2017), de k máximo de 1,0E-06 m/s para materiais utilizados em sublastros ferroviários, as misturas asfálticas avaliadas apresentaram valores de próximos ou superiores a 1,0E-06 m/s para as amostras com V_v de 4% ou superior, para misturas asfálticas compactadas a partir da dosagem Superpave, e a partir de V_v de 6%, para misturas compactadas a partir da dosagem Marshall. Em relação aos parâmetros estatísticos, como desvio padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV), foi observada uma tendência de menor

erro quando a permeabilidade das misturas é menor, principalmente para o caso de amostras com $V_v = 1\%$, que apresentaram CV de 41% para as misturas compactadas por impacto (Marshall) e 42% para aquelas compactadas por amassamento (Superpave), em comparação aos, por exemplo, 142% de CV para misturas com V_v em torno de 7% (Marshall). Tal valor de CV é considerado elevado, e pode ser resultado de uma amostragem reduzida ou mesmo do comportamento heterogêneo das misturas asfálticas com V_v mais elevado. Essa constatação tem estreita relação com o fato de, conforme mostrado anteriormente, a correlação V_v versus k para essas misturas ter sido $R^2 < 0,01$.

Uma média dos resultados dos ensaios de permeabilidade agrupados pode ser observada na Figura 27. Pela análise do gráfico, pode-se concluir que os métodos de dosagem e compactação, para um mesmo V_v , apresentam valores de k muito próximos, não sendo possível a afirmação de que um deles possui tendência de maior permeabilidade em razão de os limites a partir do valor médio mais um erro padrão se sobreporem em todas as situações.

Figura 27 – Média e Desvio Padrão para os resultados dos ensaios de permeabilidade (amostras dosadas pelos métodos Marshall e Superpave)



Fonte: Elaborada pelo autor.

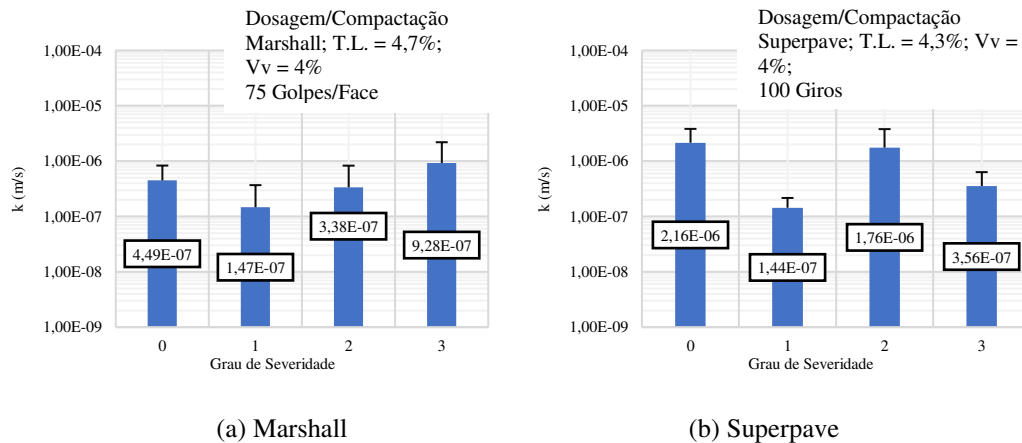
Quanto à avaliação da influência do parâmetro V_v na permeabilidade (k) das misturas asfálticas a partir dos valores de R^2 obtidos (0,6 para as misturas moldadas pelo método

Marshall e Superpave), observa-se que se confirma o defendido nos estudos conduzidos por Caro *et al.* (2008), que cita que o tamanho dos vazios na estrutura interna da mistura avaliada e a conexão entre os mesmos também influenciam na permeabilidade das misturas asfálticas, não sendo o V_v suficiente para a determinação do valor de k . Observou-se, também, que, no caso de 1%, 3% e 4% de V_v , as misturas asfálticas dosadas pelo método Superpave apresentaram k levemente superior às misturas asfálticas com mesmo V_v dosadas pelo método Marshall. Uma das hipóteses para essa constatação pode ser o fato de que o teor de ligante utilizado, que é, em geral, menor nas misturas dosadas pelo método Superpave, para um mesmo V_v , influencia diretamente na estrutura interna de tamanho e conexão entre vazios. Assim, de acordo com os resultados obtidos (Figura 24 e Figura 26), para que se obedeça ao limite de $1,0E-6$ m/s para k proposto por Pirozzolo *et al.* (2017), recomenda-se que a dosagem das misturas asfálticas para uso em camada de sublastro apresente um V_v máximo de 3%.

4.2.3 Estágio de Dano por Umidade Induzida em Misturas Asfálticas

O processo de dano por umidade induzida, que envolve a saturação das misturas asfálticas e a submissão das mesmas a ciclos de congelamento e descongelamento, a partir do método proposto na NBR 15617, 2015, baseado na norma americana AASHTO T283 (2014), altera a estrutura interna do CP, sendo mais crítico quanto mais fraca é a adesão agregado-ligante ou quanto maior for o grau de severidade do processo de condicionamento. Nesta pesquisa, misturas asfálticas com V_v igual a 7% foram submetidas a 1 ciclo de condicionamento severo. Já as misturas asfálticas com V_v igual a 4% foram avaliadas em 4 níveis de severidade de dano por umidade. O grau de severidade 0 representa as misturas asfálticas em estado inalterado, o grau 1 se refere à mistura asfáltica após a indução de um ciclo de condicionamento não severo, o grau 2 se refere à indução de 1 ciclo de condicionamento severo e o grau 3 se refere à indução de 2 ciclos consecutivos de condicionamento severo, baseados no processo descrito na NBR 15617 (2015). A indução de ciclos de condicionamento às amostras avaliadas neste trabalho não reforçou a hipótese de que a permeabilidade das misturas asfálticas apresenta uma tendência de aumento pelo surgimento de microfissuras na estrutura interna do CP, como se pode observar na Figura 28 (referente a CPs com 4% de V_v).

Figura 28 – Relação entre Grau de Severidade do Condicionamento ao DPU *versus* Permeabilidade para Misturas Asfálticas para composição de Sublastro Ferroviário ($V_v = 4\%$)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as misturas asfálticas moldadas segundo o método Marshall, com 7% de V_v , foi observada uma redução de 34% na permeabilidade para as amostras que passaram por um processo de condicionamento severo, passando de um k de aproximadamente $5,0E-6$ para $3,0E-6$ m/s, ambos considerados superiores ao limite exposto por Pirozzolo (2017). Para misturas asfálticas moldadas seguindo-se a mesma metodologia, com V_v de 4%, foi observada uma redução de 67% do valor de permeabilidade entre as amostras não condicionadas e as amostras condicionadas com apenas um ciclo não severo (grau 1). No caso, acredita-se que o fato de as amostras nesse grau de severidade de condicionamento serem submetidas apenas à saturação e ao banho em água a 60°C tenha contribuído para um fechamento das conexões entre vazios em virtude da temperatura. Quando as misturas com $V_v = 4\%$ são submetidas a ciclos mais severos de condicionamento (grau 2 e grau 3), há um aumento da permeabilidade em relação às amostras com grau 1 de severidade de condicionamento. No caso referido, o aumento de grau 1 para grau 2 de severidade de dano representou um aumento de aproximadamente 130% na permeabilidade e, no caso da aplicação de danos severos consecutivos, o aumento de k para CPs Marshall chegou a ser de 8 vezes. Pode-se verificar, portanto, que há uma tendência de aumento da permeabilidade, para as amostras, com o aumento da severidade dos ciclos de condicionamento ao dano por umidade. As misturas com V_v de 4% cumpriram k máximo indicado de $1,0E-6$ m/s tanto na condição sã quanto nas condições danificadas. No caso das amostras moldadas com $V_v = 4\%$ a partir do método Superpave, a inexistência de uma relação

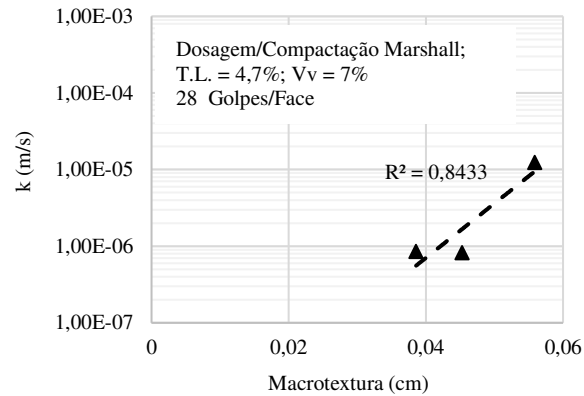
clara entre dano por umidade e aumento da permeabilidade persiste, inclusive quando se avaliam estágios crescentes de dano.

A redução observada na permeabilidade das misturas asfálticas após o condicionamento de dano por umidade foi um resultado também obtido por Freitas (2015), que aplicou o mesmo método proposto neste trabalho para a avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas para uso em pavimentos rodoviários. A média dos valores de k para as amostras não condicionadas foi de $3,6E-06$ m/s, enquanto que, para as amostras condicionadas, esse valor foi de $1,84E-06$ m/s, para um V_v de 7%. No caso, justificou-se o resultado de redução da permeabilidade como sendo uma limitação do próprio ensaio de permeabilidade adaptado do ensaio de carga variável para solos, citando-se, por exemplo, que a argila utilizada para a impermeabilização da lateral dos CPs pode colmatar os poros e influenciar (reduzir) o resultado de k .

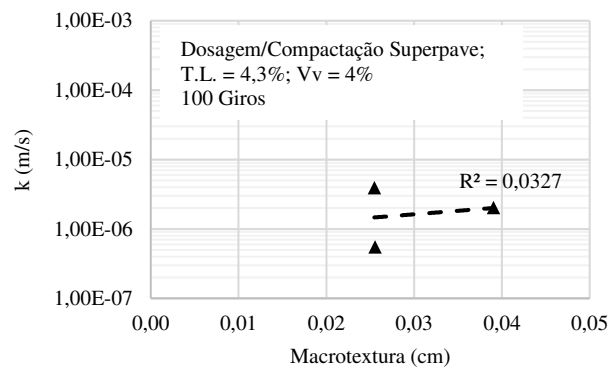
4.2.4 Avaliação de fatores que podem interferir na determinação da Permeabilidade das Misturas Asfálticas

Uma das avaliações feitas neste trabalho foi uma observação simplificada da interferência do parâmetro de macrotextura (baseado numa adaptação do ensaio de mancha de areia) das amostras na permeabilidade medida por meio do ensaio de carga variável. Observou-se que, para alguns casos, a macrotextura apresenta uma correlação com a permeabilidade mais elevada que o próprio parâmetro de V_v , por exemplo, para as misturas com 7% de vazios (dosagens Marshall e Superpave), nas quais a relação entre macrotextura e permeabilidade apresentou $R^2 = 0,84$ para os dois casos, enquanto que esta relação entre k e V_v apresentou R^2 superior a 0,8 apenas para o caso das misturas moldadas com 7% de V_v no CGS. Sendo assim, há um indício de que esse parâmetro pode influenciar a obtenção do k das misturas asfálticas, mas a relação direta não é clara, uma vez que a correlação não é satisfatória em todos os casos e também não se observa um padrão bem definido de influência, uma vez que, em algumas situações, o aumento da macrotextura representou também um aumento da permeabilidade, em outras não foi observada correlação alguma e, em alguns poucos casos, observou-se uma elevada correlação com uma redução da permeabilidade, o que não era esperado, uma vez que, segundo a definição de macrotextura, maiores valores devem conduzir à formação de pequenos canais que concentram água nas amostras. Algumas avaliações da relação entre macrotextura e permeabilidade são apresentadas na Figura 29.

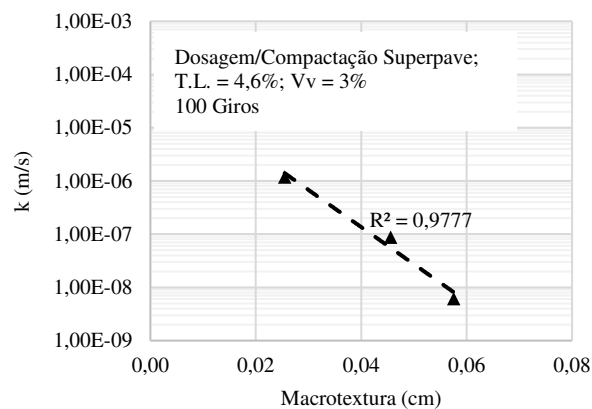
Figura 29 – Relação macrotextura *versus* permeabilidade para CPs de misturas asfálticas para composição de camada de sublastro ferroviário



(a) Elevada correlação com um aumento da permeabilidade (CP com Vv = 7%, dosagem Marshall)



(b) Correlação inexistente (CP com Vv = 4%, dosagem Superpave)



(c) Elevada correlação com uma redução de permeabilidade (CP com Vv = 3%, dosagem Superpave)

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.5 Observação da Influência do Dano por Umidade Induzida no Comportamento Mecânico das Misturas Asfálticas

Uma vez que não foi observada uma relação clara entre os processos de condicionamento realizados para avaliar o dano por umidade induzida e o valor de k , desejou-se saber se, ao contrário do que foi observado para a permeabilidade, há indícios de alteração no desempenho mecânico das misturas asfálticas a partir da realização do processo de condicionamento. Assim, procedeu-se à avaliação da influência desse processo no comportamento mecânico das misturas asfálticas para uso em camadas de sublastro, por meio do ensaio de Resistência à Tração (RT) por compressão diametral. Desse processo, reporta-se o valor de RRT, que representa a capacidade de o material apresentar ou não RT semelhante àquela apresentada quando não há dano por umidade induzida na amostra. As misturas com 7% de V_v , volumetria indicada pela NBR 15617 (2015), apresentaram uma RRT de 80% para as misturas moldadas a partir do método Superpave (RT cai de 0,65 MPa, quando os CPs não estão condicionados, para 0,52 MPa, quando são rompidos após o condicionamento ao dano por umidade induzida), e de 100% para as amostras moldadas a partir do método Marshall (RT = 0,7 MPa para ambas as amostras de CPs condicionados e as de CPs não-condicionados). As misturas asfálticas avaliadas apresentaram um grau satisfatório de resistência ao dano por umidade (uma vez que a norma AASHTO T283 indica uma RRT mínima de 80%), portanto, pode-se encontrar nesse aspecto uma das explicações para que a permeabilidade das misturas também não tenha apresentado variação considerável entre as duas condições de avaliação (condicionada e não condicionada).

4.3 Fluxo de Água em Ferrovias com Camadas Granulares

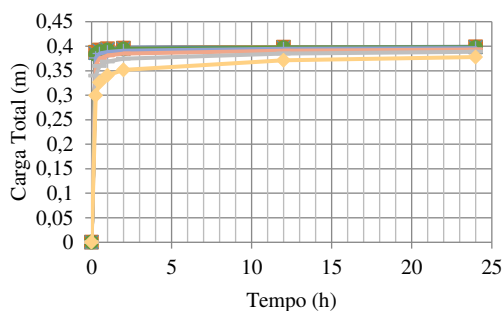
As simulações de fluxo foram realizadas a partir do uso do *software* de elementos finitos *Slide 6.0*. O principal dado de entrada para a realização desta análise consiste nos valores de permeabilidade dos materiais que compõem as camadas, obtidos por meio da realização dos ensaios de permeabilidade anteriormente mencionados, ou de valores reportados na literatura, que foi o caso dos materiais granulares. Já as condições de contorno passam pela definição da espessura da lâmina d'água sobre a estrutura e o tempo de fluxo a ser avaliado. A geometria engloba a espessura e o posicionamento de cada uma das camadas. O tipo de análise a ser realizada é uma simulação de fluxo transiente, que é definido como sendo o tipo de fluxo que ocorre quando as poro-pressões no solo são variáveis ao longo do tempo, em função de condições de contorno variáveis ou mesmo por materiais cujas permeabilidades são baixas. Inicialmente, são mostrados resultados de fluxo para estruturas de ferrovias com camadas granulares e, em sequência, resultados de fluxo para estruturas de ferrovias que incorporam

camadas de sublastro betuminoso com diferentes características e comparam-se os comportamentos das citadas estruturas quanto à permeabilidade e ao fluxo interno de água nas mesmas.

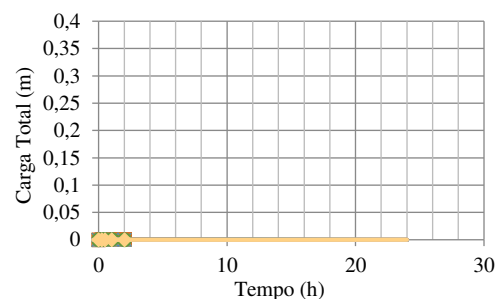
4.3.1 Avaliação da Influência da Ausência de Sublastro no Fluxo de Água

A ausência de uma camada de sublastro (granular ou betuminoso) é comprovadamente prejudicial no que se refere ao fluxo de água nas camadas de fundação da estrutura ferroviária. Pode-se observar que a infiltração de água na camada de subleito ocorre mais rapidamente quando não há camada de sublastro na estrutura e a drenagem é deficiente, comparando-se com o caso da existência de sublastro granular com 20 cm de espessura e inclinação transversal de 3%. Para as geometrias analisadas, na condição com o sublastro granular com espessura de 20 cm, não houve alteração da carga hidráulica no topo do subleito nas 24 horas avaliadas (Figura 30a). Entretanto, quando se retira a camada de sublastro, em apenas 30 minutos, a carga hidráulica chega aos 0,40 m máximo, indicando que o solo poderia atingir maiores graus de saturação. Além disso, ao se observar as velocidades de fluxo no interior do subleito, pode-se verificar que o fluxo quando há uma camada de sublastro é nulo se colocado em perspectiva em relação ao caso da ausência da referida camada (Figura 30b). Pode-se verificar, ao observar os vetores de fluxo presentes na Figura 31, que, quando se utiliza a camada de sublastro na estrutura, o fluxo é melhor direcionado às estruturas coletoras para drenagem, na lateral, uma vez que os vetores de fluxo ficam mais concentrados na camada de lastro (menor infiltração nas camadas de fundação) para um mesmo período de tempo avaliado.

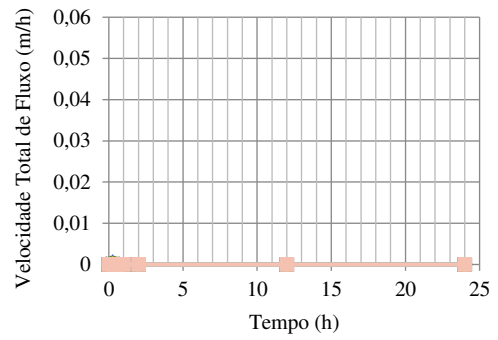
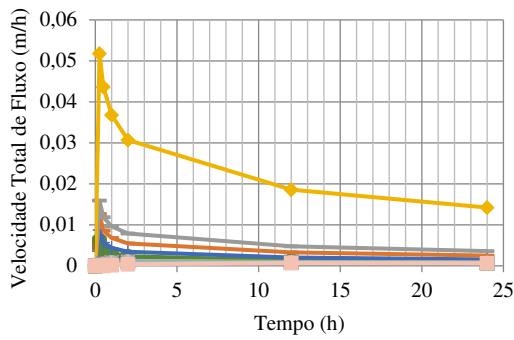
Figura 30 – Avaliações de fluxo nas condições de inexistência de camada de sublastro e de adoção da adoção de camada de sublastro granular



(a) Carga hidráulica no topo do subleito quando não há camada de sublastro



(b) Carga hidráulica no topo do subleito ao ser adotada a solução de sublastro granular

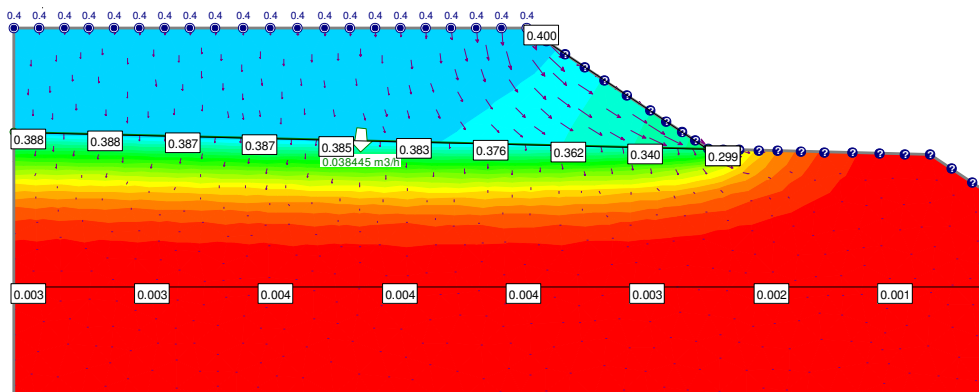


(c) Velocidade de fluxo no interior do subleito, 2 metros acima da origem, na inexistência de camada de sublastro

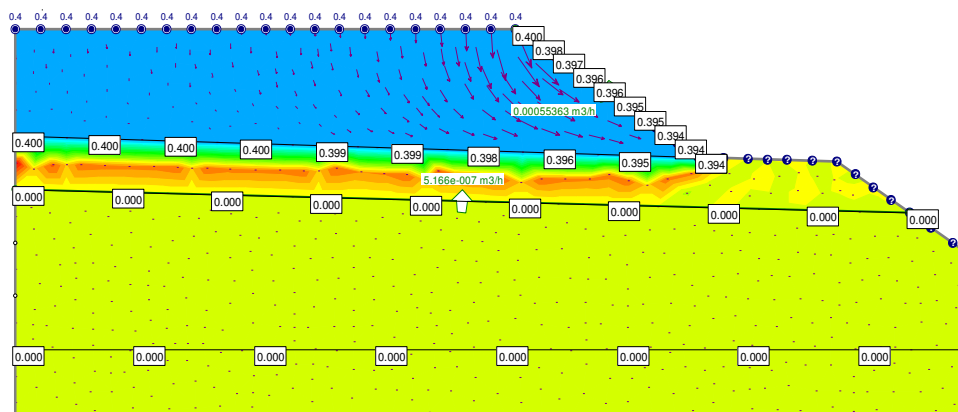
(d) Velocidade de fluxo no interior do subleito, 2 metros acima da origem, quando se adota camada de sublastro granular

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 – Orientação dos vetores de fluxo nas condições sem camada de sublastro (a) e com camada de sublastro granular (b)



(a)



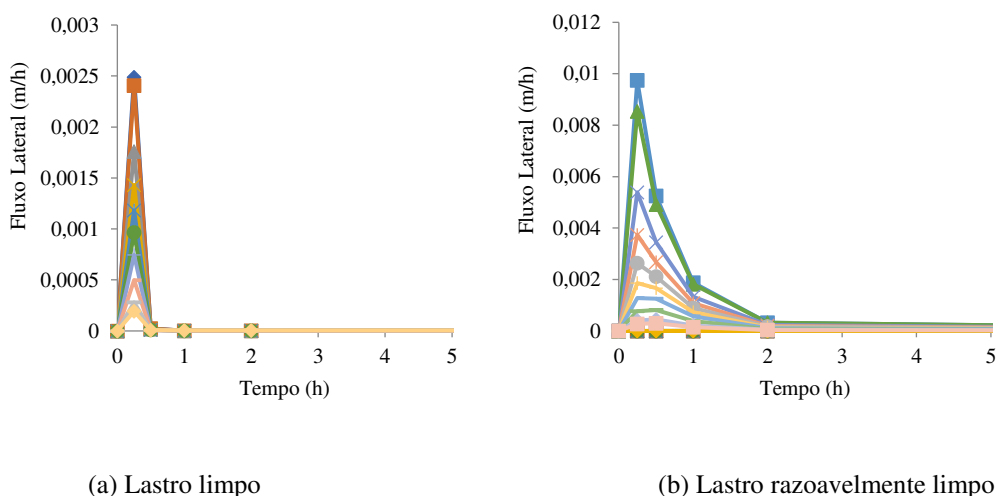
(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 Avaliação da Influência das Condições de Limpeza e Umidade do Lastro no Fluxo de Água

Considerando a mesma estrutura anteriormente analisada, diferentes condições de limpeza (k_s limpo = 0,3 m/s e k_s razoavelmente limpo = 0,00005 m/s) e umidade do lastro (WC_{seco} = 3,5% e $WC_{úmido}$ = 15%) foram avaliadas, conforme mostrado no Capítulo 3, em valores baseados nos mostrados nos estudos conduzidos por Tennakoon *et al.* (2012), Merheb (2014) e Ferreira *et al.* (2015). Inicialmente, avaliaram-se essas condições para sublastro granular (k_s = 1,36E-07 m/s) e subleito com os modelos previamente mencionados. Observou-se que, em ambas as condições seca e úmida, o lastro com maior grau de colmatção (classificado como razoavelmente limpo), apresenta descarga lateral 23% maior no ombro do lastro após uma avaliação de 24 horas de fluxo, se comparado com o resultado obtido para o lastro limpo. Tal resultado não era esperado, uma vez que é comprovada a maior eficiência da drenagem para o caso de lastro limpo, porém, o volume drenado pela camada só é maior quando se consideram as camadas inferiores como impermeáveis, consideração feita no caso do estudo conduzido por Ferreira *et al.* (2015). Quando a simulação incorpora como *inputs* as permeabilidades de solos utilizados como sublastro e subleito na ordem de 10^{-6} e 10^{-7} m/s, pode-se observar que, no caso de lastros limpos, há uma maior absorção de água (26%) pelas camadas inferiores, e no caso de lastros com maior colmatção, a água fica mais retida na camada de lastro, daí a maior descarga observada na lateral. O comportamento explicado possui direta relação com o aspecto volumétrico, uma vez que o volume de água que fluirá na camada de lastro é maior na condição mais colmatada, entretanto, como pode ser visto na Figura 32, o tempo que é necessário para a drenagem da coluna d'água de 0,40 m na condição de maior colmatção é aproximadamente 4 vezes maior do que aquele observado na condição limpa, tomando-se como referência o tempo necessário para que o fluxo nos pontos observados na lateral do lastro seja nulo, confirmando a proposição de eficiência de drenagem do lastro não colmatado, apesar de tal situação representar uma maior tendência de fluxo para as camadas inferiores.

Figura 32 – Tempo necessário para a drenagem de uma coluna d'água de 0,40 m para diferentes graus de colmatção do lastro



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3 Avaliação da Influência da Inclinação do Sublastro no Fluxo de Água

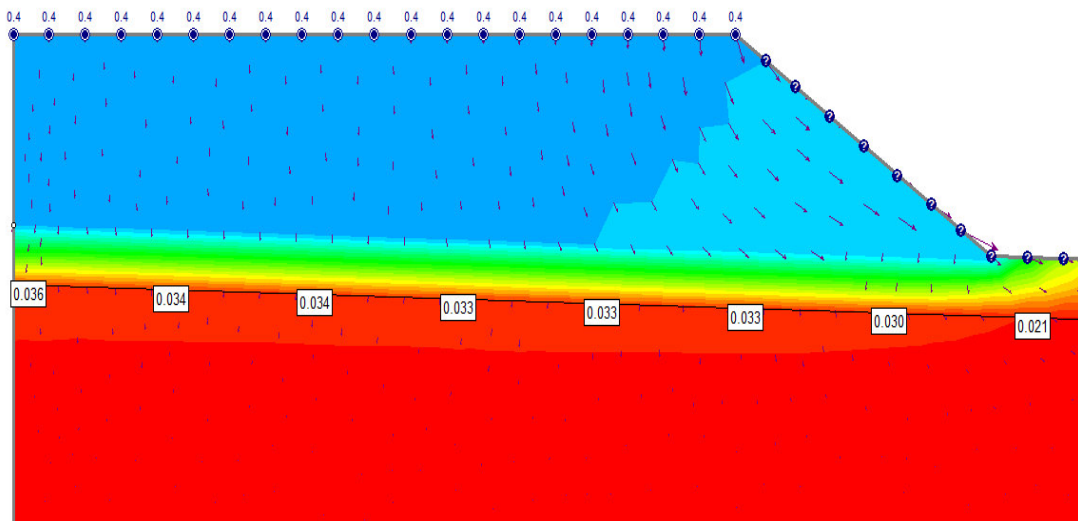
Diferentes inclinações transversais do sublastro granular foram avaliadas a partir do uso da simulação de fluxo ($i = 0\%$ e 3%). Observou-se que a descarga hidráulica na lateral do lastro, para período de avaliação de 12 horas, em direção aos corpos coletores é $12,7\%$ maior quando a inclinação do sublastro estiver de acordo com a inclinação de projeto de 3% , dando indícios de que, no caso de inclinação nula, mais água tende a infiltrar nas camadas inferiores, fato comprovado com a observação, a partir da simulação realizada, de que a carga hidráulica máxima observada no topo do subleito foi aproximadamente 2% maior quando a inclinação é nula. Entretanto, não foram observadas alterações quanto ao tempo necessário para a drenagem da coluna d'água simulada nas duas situações, dando indícios de que a permeabilidade do lastro (conforme mostrado anteriormente) é mais importante para a capacidade drenante da estrutura do que a inclinação do sublastro. Também não foram observadas diferenças quanto à alteração do conteúdo de água (WC) do subleito nas duas situações, tomando-se como base uma linha horizontal traçada no subleito a 2 m da origem. No caso, em todo o período de fluxo observado (24 horas), o WC final foi o mesmo para sublastros granulares com ou sem inclinação de 3% . O comportamento com relação à inclinação foi semelhante ao exposto também para a solução de sublastro betuminoso, cujas análises de fluxo serão expostas a seguir.

4.4 Avaliação de Fluxo de Água em Ferrovias com Sublastro Betuminoso

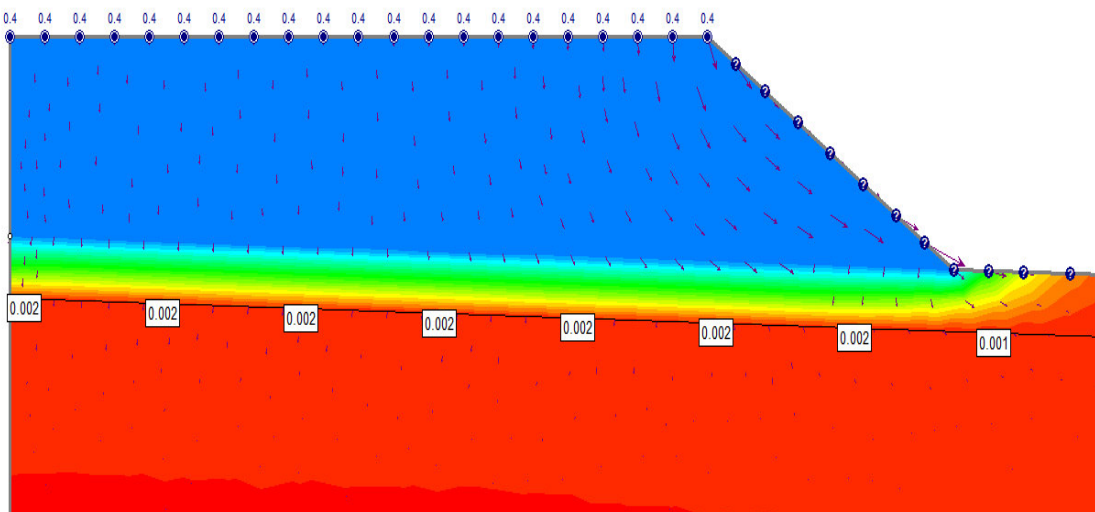
4.4.1 Fluxo de Água no Topo do Subleito

Na Figura 33, são apresentados os vetores de fluxo e os valores de carga total (m) no tempo do subleito para estruturas com camada de sublastro betuminoso com permeabilidades referentes, respectivamente, a V_v de 7% e 4%.

Figura 33 – Fluxo de água na estrutura após um período de 30 minutos para diferentes permeabilidades relativas à camada de sublastro betuminoso



(a) Camada de Sublastro Betuminoso com $V_v = 7\%$ ($k = 4,7E-06$ m/s)



(b) Camada de Sublastro Betuminoso com $V_v = 4\%$ ($k = 4,5E-07$ m/s)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Avaliando-se o fluxo de água (m^3/h) no topo do subleito, observou-se que o comportamento das misturas asfálticas foi melhor (representação de um menor fluxo) quanto

menor foi o valor relativo à sua permeabilidade, indicando a preponderância desse parâmetro em relação à capacidade de impermeabilização do subleito. Avaliando-se um período de 30 minutos, estimado como sendo o período necessário, nas condições avaliadas, para a coluna d'água atingir o topo da primeira camada de fundação, observou-se que, no estágio inicial, representado pelas misturas asfálticas com Vv de 7%, o fluxo de água é de aproximadamente $2,0E-03 \text{ m}^3/\text{h}$ (sendo $2,3E-06 \text{ m}^3/\text{h}$ na condição sem dano por umidade e $1,6E-06 \text{ m}^3/\text{h}$ na condição com dano por umidade, concluindo-se que o fluxo também é menor com a redução da permeabilidade nas misturas asfálticas consideradas danificadas pelo processo de condicionamento a partir da umidade induzida).

Avaliando-se o estágio consolidado, com misturas asfálticas com 4%, 3% e 1% de Vv, pode-se observar uma tendência de redução do fluxo como a redução do Vv e, por consequência, do k das misturas asfálticas. As misturas com 4 e 3% de Vv não apresentaram variação quanto à ordem de grandeza de seus valores de k (ambos na ordem de 10^{-7} m/s) e o fluxo de água no topo do subleito, para esses casos, apresentou valor de aproximadamente $10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$, ordem de grandeza 10 vezes menor que a relacionada aos valores de fluxo relativos a um estágio recém-aplicado da mistura asfáltica (Vv de aproximadamente 7%). Quando o Vv é ainda menor (1%), o fluxo em questão é de $2,33E-06 \text{ m}^3/\text{h}$, seguindo-se o padrão observado de redução da ordem de grandeza do fluxo no topo da camada de subleito de acordo com a redução da ordem de grandeza do valor de permeabilidade. Esse comportamento é explicado pelo fato de os parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten, para as misturas asfálticas, terem sido mantido ao longo das simulações, quando, na verdade, acredita-se que o comportamento hidráulico (e, por consequência, os parâmetros de ajuste das curvas características) dos materiais deve mudar.

No caso da comparação entre as estruturas com camada betuminosa e as estruturas com camada granular executada com o solo selecionado de $k = 1,36E-07 \text{ m/s}$, em todos os casos, tanto no estágio inicial, quanto no estágio consolidado (com e sem dano induzido pela umidade), o fluxo de água descendente no topo do subleito foi maior no caso de ferrovias com camada de sublastro betuminoso, sendo em tais casos, um fluxo da ordem de 10^{-3} , 10^{-4} e $10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$ nos casos, respectivamente de misturas asfálticas com Vv de 7%, 3% e 1% e da ordem de $10^{-7} \text{ m}^3/\text{h}$ (o que representa uma sucção da água presente no subleito pela camada de sublastro) no caso das estruturas com camada de sublastro granular. Em virtude do fato de a estrutura granular ter um comportamento em estado não-saturado muito diferente das estruturas asfálticas, o comportamento do fluxo também é diferente. 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 para a solução de adoção de camada de sublastro granular é oposta à apresentada por estruturas com camada de sublastro betuminoso, havendo uma tendência de um fluxo muito reduzido (da ordem de 10^{-8} a 10^{-7} m³/h) na direção do subleito para o sublastro (fluxo ascendente).

4.4.2 Eficiência da Drenagem Lateral

A avaliação da eficiência da drenagem pode ocorrer pela observação do tempo necessário, na lateral do lastro, para que as velocidades de descarga atinjam um valor constante e aproximadamente nulo. No caso das estruturas avaliadas, observou-se que, para uma mesma condição de lastro, tanto as soluções com o sublastro granular avaliado, quanto as soluções com misturas asfálticas apresentaram uma drenagem que acontece em menos de 30 minutos (para a espessura de lâmina d'água de 0,40 m). No caso das misturas asfálticas, o tempo máximo necessário para a estabilização das velocidades de fluxo nas laterais do lastro foi de aproximadamente 20 minutos para misturas com $V_v = 7\%$. Como mostrado anteriormente, esse tempo, para estruturas com sublastro granular, é de aproximadamente 30 minutos. Quando se compara esse tempo com o observado para as estruturas nas mesmas condições de sublastro, porém com o lastro com maior colmatação, observa-se que a eficiência da drenagem é mais sensível (com diferenças de tempo maiores que 300%) às condições de limpeza do lastro do que a parâmetros de características do sublastro (como as diferenças de permeabilidade entre diferentes soluções).

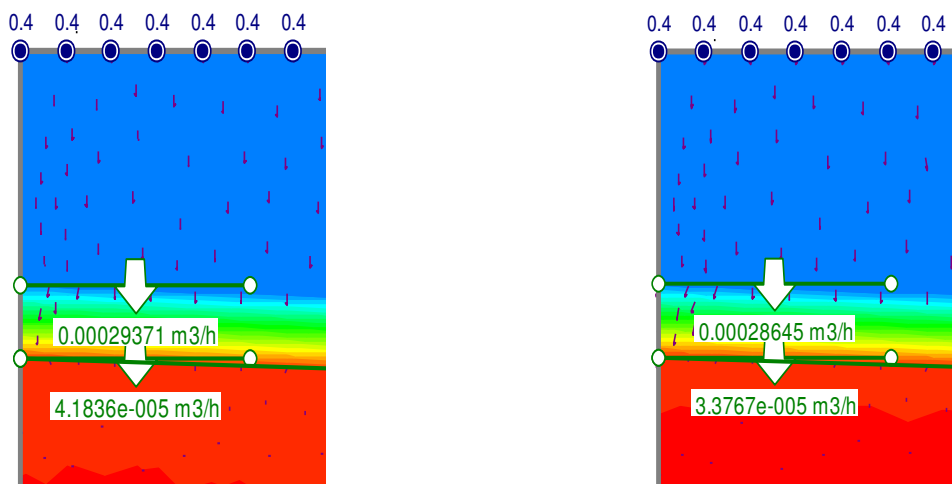
Entretanto, entende-se que, conforme especificado por diversos autores, o sublastro betuminoso é, dentre as soluções apresentadas, a mais eficiente para a prevenção do bombeamento de finos para o lastro. Isso ocorre uma vez que, em geral, sublastro granular apresenta uma granulometria com elevados teores de material fino (em geral são classificados como argilas), que, ao longo do tempo, tendem a ser incorporados ao material de lastro. Assim, acredita-se que estruturas que incorporam misturas asfálticas como camada de sublastro podem manter uma maior qualidade da drenagem da estrutura por um maior período de tempo.

4.4.3 Considerações sobre os Estágios Inicial, Consolidado e de Dano por Umidade

No caso das misturas asfálticas avaliadas com V_v de 7%, nas condições com e sem indução de dano por umidade, foi observada uma dispersão relevante nos resultados de k (CVs de 50 a 150% nas condições com e sem o condicionamento ao dano por umidade induzida, respectivamente). Devido à elevada dispersão de resultados de k para um mesmo V_v ,

corroborado por esta pesquisa e pelo estudo conduzido por Ferreira (2015), o comportamento do fluxo segue a mesma tendência (para simulações com sublastro betuminoso com espessura de 12,5 cm e inclinação de 3%, mantendo-se os mesmos parâmetros de análise para lastro e subleito, além da geometria e das condições de contorno – lâmina d'água), com uma menor descarga vertical na base do sublastro betuminoso na condição danificada pela umidade induzida, resultado também comentado como inesperado no estudo conduzido por Freitas (2015), demonstrando-se uma correlação entre fluxo de água e permeabilidade para as misturas asfálticas. Nesse caso, a permeabilidade das misturas antes da indução do dano por umidade apresentou média 51% maior em relação às misturas que passaram por processo de condicionamento, e essa condição representou um fluxo de água 24% maior no sentido vertical sublastro-subleito, para uma linha de 1 m centralizada no eixo de simetria da estrutura, posicionada a partir do ponto de contato entre as duas camadas, conforme observado na Figura 34.

Figura 34 – Fluxo entre camadas para misturas com Vv de 7% (Marshall) antes (a) e após (b) o condicionamento ao dano por umidade



(a) Antes do condicionamento ao dano por umidade

(b) Após o condicionamento ao dano por umidade

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores apresentados de fluxo foram obtidos a partir de uma simulação que utilizou os dados de k para misturas asfálticas compactadas por impacto (Marshall), entretanto, pode-se afirmar que o comportamento de k antes e após o condicionamento foi similar para as misturas asfálticas compactadas por amassamento (Superpave), indicando que o comportamento do fluxo é similar para os valores obtidos a partir das duas metodologias, quando se avaliam as

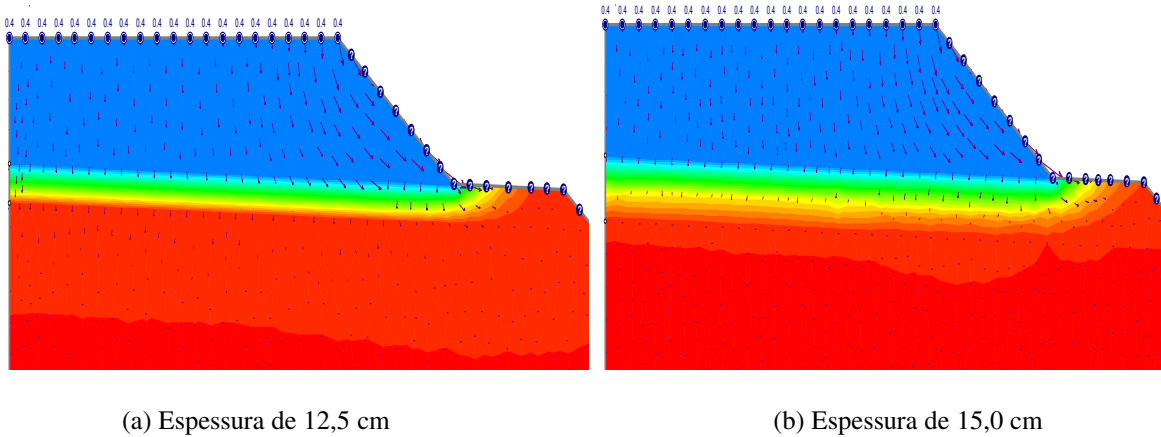
misturas de sublastro betuminoso com V_v em torno de 7%, mantendo-se os parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980).

Dentre as misturas avaliadas, as de menor k , na ordem de 10^{-9} m/s, fazem referência à média das misturas com 1% de V_v (Marshall e Superpave). Os maiores valores de k são referentes às misturas com $V_v > 4\%$ compactadas no CGS e $V_v > 6\%$ compactadas pelo soquete Marshall ($k > 10^{-6}$ m/s). A adequação do parâmetro de $k = 1,0E-06$ m/s como sendo a máxima permeabilidade permitida para sublastros betuminosos foi avaliada. Observou-se que, durante os 30 minutos iniciais de fluxo, as misturas que possuem k superior a 10^{-6} (por exemplo, Superpave, V_v de 4% e $k = 2,15E-06$ m/s) apresentaram uma carga hidráulica na base do sublastro 2 vezes superior à encontrada para as misturas com aproximadamente o mesmo V_v e com k mais próximo de, mas ainda inferior a 10^{-6} m/s (por exemplo, Marshall, V_v de 4% e $k = 4,45E-07$ m/s). O critério mostrado por Pirozzolo *et al.* (2017) confirma-se, portanto, como um bom indicador para limitar a permeabilidade e o fluxo de água para a proteção do subleito. Já o parâmetro defendido por Rose e Bryson (2009), de limitar o V_v a 3%, não pode ser encarado como suficiente para a escolha e a dosagem das misturas asfálticas, considerando a permeabilidade e o fluxo de água nas camadas da infraestrutura ferroviária, uma vez que, especialmente para as misturas asfálticas moldadas utilizando-se o CGS, foi observada uma maior variação de valores de permeabilidade para um mesmo V_v .

4.4.4 Influência da Espessura da Camada de Sublastro Betuminoso no Fluxo de Água

Avaliou-se o aumento da espessura da camada de sublastro betuminoso de 12,5 para 15,0 cm, nas mesmas condições de lastro e subleito e com o mesmo valor de inclinação ($i = 3\%$). Nos primeiros 30 minutos de avaliação de fluxo, observou-se que a descarga (m^3/h) na zona de contato sublastro-subleito é 266% maior (para misturas asfálticas com $V_v = 4\%$) quando a espessura da camada é de 12,5cm. Entretanto, o reduzido volume percolado não representaria nenhuma alteração significativa da umidade no subleito, após a avaliação de 24 horas de fluxo transiente. Quanto ao fluxo (drenagem) lateral, a partir dos vetores de fluxo na Figura 35, observa-se também que o aumento da espessura da camada de sublastro betuminoso, para as condições simuladas, não resultaria em uma 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 espessura de 15 cm (ou superior a esse valor) implicaria em um aumento relevante do custo inicial de implementação.

Figura 35 – Vetores de Fluxo em estruturas com soluções de sublastro betuminoso com diferentes espessuras

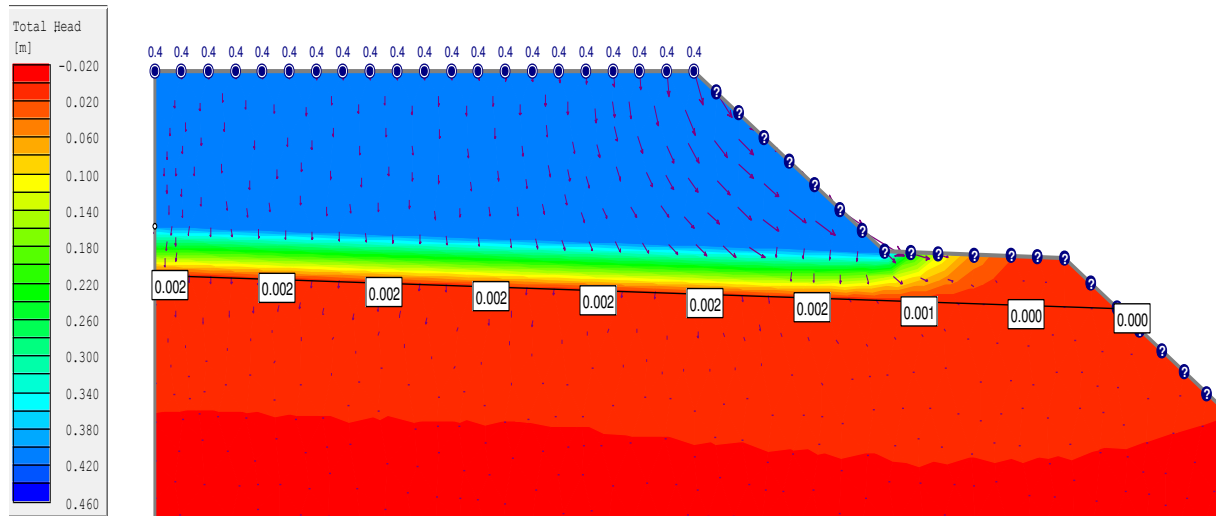


Fonte: Elaborada pelo autor.

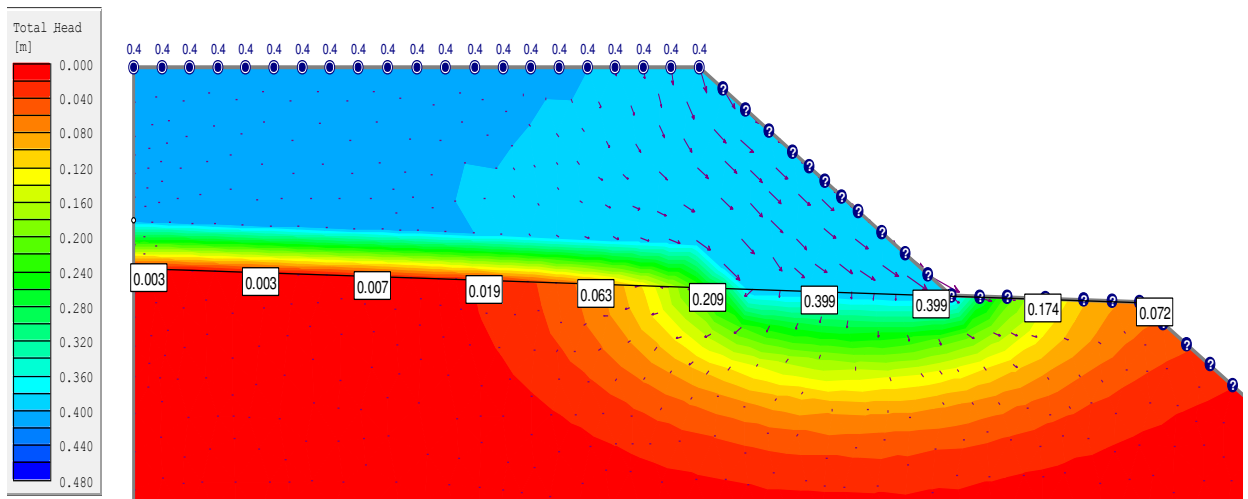
4.4.5 Influência da Extensão Transversal da Camada de Sublastro Betuminoso no Fluxo de Água

Avaliou-se o fluxo de água a partir de uma redução da extensão transversal do sublastro betuminoso, de modo a expor uma similaridade com a solução *Asphalt Underlayment*, exposta por Rose e Souleyrette (2014), mostrada no Capítulo 2, sendo o sublastro betuminoso de extensão transversal igual à do topo da camada de lastro. Quando a camada de sublastro betuminoso não cobre totalmente a superfície superior do subleito, observa-se um fluxo 49 vezes maior e também maior da carga hidráulica no solo da fundação da ferrovia no trecho não recoberto pela camada de sublastro. Entretanto, observando-se os valores de carga total ao longo do topo do subleito, conclui-se que a discrepância entre tais valores (carga total em um ponto específico com recobrimento total e com recobrimento parcial) no centro da estrutura (zona mais próxima dos pontos de aplicação de cargas) é menor, conforme observado na Figura 36. Essa solução, portanto, pode representar uma possibilidade de economia de investimento inicial, sem alterações significativas quanto ao desempenho frente à ação da água da estrutura na zona diretamente abaixo dos dormentes.

Figura 36 – Vetores de Fluxo e Carga Total no topo o subleito para diferentes recobrimentos do solo de fundação pela camada de sublastro



(a) Recobrimento total do subleito pelo sublastro betuminoso



(b) Recobrimento parcial do subleito pelo sublastro betuminoso

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A adoção de soluções como o sublastro betuminoso para estruturas de ferrovias tem se tornado mais comum internacionalmente, 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 muitas vezes leva à subestimação da capacidade de solicitações do tráfego em conjunto com as questões ambientais, como umidade e temperatura, potencializarem os processos que levam à deterioração das estruturas. Dessa forma, buscou-se, em um primeiro momento, avaliar como a permeabilidade das misturas asfálticas utilizadas em camadas de sublastros betuminosos pode ser caracterizada. Inicialmente, foi necessária uma vasta investigação das práticas aplicadas internacionalmente no projeto dessas misturas, para a definição de características como a granulometria de projeto, para que, após a consolidação dessas informações, fosse possível a avaliação de permeabilidade, por métodos já aplicados no contexto do transporte rodoviário. 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, numa situação comumente definida na literatura como Vv péssimo.

Além disso, pode-se verificar que 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 (CVs superiores a 100%) entre os valores de permeabilidade para um mesmo valor de Vv. Entretanto, quando o Vv é reduzido a valores próximos de 1%, há uma tendência clara de que a aleatoriedade dos contatos provocada na estrutura interna do compósito seja menos sensível à forma de compactação. Foi observado que, para misturas asfálticas dosadas a partir do método Marshall, são obtidos valores de coeficiente de permeabilidade (k) maiores que o limite sugerido de 10^{-6} m/s a partir de um Vv de 6% e, no caso de misturas dosadas a partir do método Superpave, esse valor de k já é atingido em valores de Vv próximos de 3%. Assim sendo, as variações observadas para diferentes Vv não permitem a definição de um valor de Vv máximo para o bom desempenho da estrutura no que se refere à permeabilidade e ao fluxo de água.

Ainda com relação à permeabilidade das misturas asfálticas, observou-se que não há um indício claro que a macrotextura do CP avaliado tenha um impacto direto no valor de k das misturas. Além disso, verificou-se que o dano por umidade induzida não provocou, em nenhum dos cenários avaliados, alterações significativas na permeabilidade das misturas asfálticas, que, a partir de valores de RRT foram consideradas com desempenho satisfatório com relação ao dano por umidade induzida.

Avaliando-se as diferentes soluções para sublastros a partir do fluxo de água, alguns dos resultados podem ser destacados. Inicialmente, ficou demonstrada a importância da camada de sublastro para a qualidade da drenagem e da proteção do subleito (que, no caso da ausência de sublastro, passa a sofrer maiores influências das alterações hidráulicas provocadas pelo fluxo com uma antecedência de aproximadamente 24 horas), além de que a qualidade da drenagem de uma estrutura ferroviária é mais sensível à variação do índice de colmatção do lastro do que aos aspectos relacionados à geometria e à volumetria de sublastros considerados apropriados para tal uso. A colmatção 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 da camada para a impermeabilização do subleito. Entretanto, verificou-se que o fluxo de água para o subleito pode ser 400% maior quando há uma redução no recobrimento do solo pela camada asfáltica, apesar de que, à medida que a avaliação se aproxima do centro da seção, essa diferença tende a ser menor.

Assim, como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

(a) Avaliar a permeabilidade de misturas asfálticas compactadas em processos mais condizentes com o realizado em campo a partir da observação dos tamanhos e da conectividade entre os vazios;

(b) Avaliar diferentes distribuições granulométricas e o impacto da variação desse parâmetro no desempenho (em especial, na permeabilidade) das misturas asfálticas para uso em camadas de sublastro;

(c) Utilizar CPs com dimensões maiores para a redução da influência do TMN dos agregados nos resultados de permeabilidade.

(d) Avaliar alterações na permeabilidade a partir de diferentes níveis de danos mecânicos, como a fadiga.

(e) Utilizar o Processamento Digital de Imagens para avaliar a influência das características do esqueleto mineral, como número de pontos de contato entre agregados, orientação e segregação dos mesmos, por exemplo, na permeabilidade de misturas asfálticas.

(f) Utilizar um método menos empírico, como o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), para melhor avaliar a correlação entre parâmetros de textura superficial e a permeabilidade das misturas asfálticas.

(g) Realizar simulações de fluxo com uma maior variação de valores de referência, por exemplo, adotando-se um maior volume de dados referentes a diferentes solos utilizados como camada de sublastro granular.

(h) Realizar simulações de fluxo que avaliem a influência da adoção da técnica de imprimação da camada de sublastro como uma forma de elevar a capacidade impermeabilizante da mesma.

(i) Realizar simulações de fluxo que incorporem as diferenças em relação aos parâmetros de Van Genuchten para diferentes características de misturas asfálticas, como o método de compactação e o V_v .

(j) Avaliar o dimensionamento e as tensões/deformações em estruturas ferroviárias com diferentes soluções para a camada de sublastro.

(k) Incorporar *Softwares* específicos para infraestruturas de transportes nas análises de fluxo em ferrovias.

REFERÊNCIAS

ALBALAT, S. A.; DOMNGO, L. M.; SANCHIS, I. V.; SEGARRA, A.V. Crumb Rubber Modified Bitumen for Sub-Ballast Layer. *In: 9th World Congress on Railway Research*, Lille, 2011.

ALVES, T. F.; MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. L. B.; MOURA, E. Estudo da utilização de Camada Asfáltica como Sublastro de Via Permanente Ferroviária. *In: XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, 2016

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **T283**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, 2014.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION (AREMA). **Manual for Railway Engineering**. Lanham, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solos – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15617**: Misturas asfálticas — Determinação do Dano por Umidade Induzida. Rio de Janeiro, 2015.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2010.

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 1 - Via Permanente**. 2ª Edição. Belo Horizonte, 1988.

BROWN, E. R.; HAININ, M. R.; COOLEY, A.; HURLEY, G. NCHRP. National Cooperative Highway Research Program (TRB): Relationship of Air Voids, Lift Thickness, and Permeability in Hot Mix Asphalt Pavements. Report 531, 2004.

CARDONA, D. R. **Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures**. Tese de Doutorado - L'Université de Lyon, Lyon, 2016.

CARO, S.; MASAD, E.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N. Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures - Part 1: Mechanisms. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 9, n. 2, p. 81–98, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430701792128>

CARO, S. **A Coupled Micromechanical Model of Moisture-Induced Damage an Asphalt Mixtures: Formulation and Applications**. Tese de Doutorado - Texas A&M University, College Station, 2009.

CHEN, R.; QI, S.; CHENG, W.; WANG, H. Effect of Compactness Degree on the Hydraulic Properties for Coarse Soils of High-Speed Railway Embankment. **Advances in Transportation Geotechnics 3**, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Volume 143, 2016, Pages 237–243, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.030

CHOUBANE, B.; PAGE, G. C.; MUSSELMAN, J. A. **Investigation of Water Permeability of Coarse Graded Superpave Pavements**: Research Report FL/DOT/SMO/97-416. Florida Department of Transportation (Florida DOT). Flórida, 1997.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte e Economia - O Sistema Ferroviário Brasileiro**. Brasília, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Ferrovias**. Brasília, 2015

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ISF 212**: Projeto de Superestrutura da Via Permanente Conjunto Lastro, Sublastro e Camada Final de Terraplanagem. Rio de Janeiro, 2015.

DI MINO, G.; DI LIBERTO, M.; NOTO, S.; SOTO, F. M. The Resistance to Fatigue of Dry Asphalt Rubber Concrete for Sub-Ballast Layer, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.11104.89606

DIÓGENES, D. F. **Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados utilizados em Lastro Ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). **Asphalt in Railway Tracks**. Bruxelas, 2014.

FERREIRA, T. M. Influence of Incorporating a Bituminous Sub-Ballast Layer on the Deformations of Railway Trackbed. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2007.

FERREIRA, T. M.; TEIXIERA, P. F.; CARDOSO, R. Impact of Bituminous Subballast on Railroad Track Deformation Considering Atmospheric Actions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000435

FERREIRA, W. L. G. **Avaliação da Permeabilidade de Misturas Asfálticas com Diferentes Granulometrias**. Projeto de Graduação – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

FERREIRA, W. L. G. **Análise do Fluxo D'água em Revestimentos Asfálticos com Diferentes Permeabilidades**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FERREIRA, W. L. G.; COSTA, S. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MOTTA, R. S. Análise Experimental e Numérica da Capacidade Drenante de Diferentes Lastros Ferroviários. *In*: XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Ouro Preto, MG. 2015.

FREITAS, F. N. R. **Avaliação da Relação entre a Resistência ao Dano Por Umidade Induzida e a Permeabilidade de Misturas Asfálticas contendo Cinza Volante como Fíler.** Projeto de Graduação – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

HENSLEY, M.; ROSE, J. G. Design, Construction and Performance of Hot Mix Asphalt for Railway Trackbeds. *In: 1st World Conference of Asphalt Pavements*, p. 11, 2000.

INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S.; TENNAKOON, N. C. The Behaviour of Ballasted Track Foundations: Track Drainage and Geosynthetic Reinforcement. *In: ASCE Annual Geotechnical Engineering Conference*, p. 2378–2387, 2010.

KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. **Stripping in hma mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods.** Auburn: 1988.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo de Propriedades, de Tensões e do Comportamento Mecânico de Lastros Ferroviários.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KRINGOS, N.; SCARPAS, T.; KASBERGEN, C.; SELVADURAI, P. Modelling of Combined Physical–Mechanical Moisture-Induced Damage in Asphaltic Mixes - Part 1: Governing Processes and Formulations. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 9, n. 2, p. 115–128, 2008. DOI: 10.1080/10298430701792185.

JING, G.; WANG, Z.; HUANG, H.; WANG, Y. Permeability and Direct Shear Tests Characteristics of Railway Subballast. **The Open Civil Engineering Journal**, Vol. 9, p. 388–393, 2015. DOI: 10.2174/1874149501509010388

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). **Optimization of High-Speed Railway Track Using Bituminous Sub-Ballast** - Progress Report of Project PDTC / ECM / 70571 / 2006-2009. Lisboa, 2010.

LEE, S.; PARK, D.; VO, H. V.; DESSOUKY, S. Asphalt Mixture for the First Asphalt Concrete Directly Fastened Track in Korea. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2015, 2015. DOI: 10.1155/2015/701940

LIU, S.; YANG, J.; CHEN, X.; WANG, M.; ZHOU, WE. Design of Asphalt Waterproofing Layer for High-Speed Railway Subgrade: A Case Study in Heilongjiang Province, China. *In: 2017 TRB 96th Annual Meeting Compendium of Papers*, Transportation Research Board Washington, 2017.

MASAD, E.; AL OMARI, A.; CHEN, H. Computations of Permeability and Anisotropy of asphalt Concrete Based on Microstructure Simulation of Fluid Flow. **Computational Materials Science**, No. 40, p. 449-459, 2007, Washington. DOI: 10.1016/j.commatsci.2007.01.015

MENDES, S. F. **Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infra-estruturas de Transportes.** Monografia – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.

MERHEB, A. H. M. **Análise Mecânica do Lastro Ferroviário Por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São

Paulo, São Paulo, 2014.

NAVIKAS, D.; BULEVIČIUS, M.; SIVILEVIČIUS, H. Determination and Evaluation of Railway Aggregate Sub-Ballast Gradation and Other Properties Variation. **Journal of Civil Engineering and Management**. Taylor and Francis Group, 2016. DOI: 10.3846/13923730.2016.1177586

PAIVA, C.; FERREIRA, M.; FERREIRA, A. Ballast Drainage in Brazilian Railway Infrastructures. **Construction and Building Materials**. Vol. 92, p. 58–63, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.006>

PEIXOTO, V. C. **Análise Paramétrica e Dimensionamento de Poços de Infiltração para Fins de Drenagem Urbana**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PIROZZOLO, L.; SOL-SÁNCHEZ, F.; MORENO-NAVARRO, G.; MARTÍNEZ-MONTES, M.; RUBIO-GÁMES, C. 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, 2017. DOI: 10.3989/mc.2017.04816

PITA, A. L.; TEIXEIRA, P. F.; CASAS, C.; BACHILLER, A. Nuevas Tendencias en el Proyecto de Infraestructuras Ferroviarias: la Utilización de Materiales Bituminosos como Subbalasto. *In: X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Valência, 2006.

RANGEL, G. W. A.; ARAGÃO, F. T. S.; MOTTA, L. M. G. Modelagem Computacional do Pavimento Ferroviário usando Concreto Asfáltico como Alternativa para a Construção da Camada de Sublastro. *In: 44ª Reunião Anual de Pavimentação e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Foz do Iguaçu, 2015.

REIS, M. DE A. E S.; MIGUEL, P. L. DE S. Panorama do Transporte Ferroviário no Brasil - Desafios e Oportunidades. **Revista Mundo Logística**, v.47, 2015. Disponível em: <http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/artigo_panorama_do_transporte_ferrovirio_no_brasil_-_desafios_e_oportunidades5.pdf> Acessado em Fevereiro de 2017.

RIBEIRO, E. A. **O Efeito da Modificação de Ligante Asfáltico com o Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Resistência ao Dano por Umidade em Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ROSE, J. G.; BRYSON, L. S. Hot Mix Asphalt Railway Trackbeds: Trackbed Materials, Performance Evaluations, and Significant Implications. *In: International Conference on Perpetual Pavements 2009*, Columbus, 2009.

ROSE, J. G.; TEIXEIRA, P. F.; RIDGWAY, N. E. Utilization of Asphalt/Bituminous Layers and Coatings in Railway Trackbeds – A Compendium of International Applications. *In: 2010 Joint Rail Conference*, p. 1–17, 2010.

ROSE, J. G.; TEIXEIRA, P. F.; VEIT, P. International Design Practices, Applications, and Performances of Asphalt/Bituminous Railway Trackbeds. *In: Railway Geotechnical*

Engineering International Symposium, IFSTTAR, Paris, 2011.

ROSE, J. G.; SOULEYRETTE, R. R. 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, 2014.

SANTOS, R. A. **Comportamento Anisotrópico de um Solo Laterítico Compactado**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. Londres: Thomas Telford Services, 1994.

SOL-SÁNCHEZ, M.; PIROZZOLO, L.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Advanced Characterisation of Bituminous Sub-Ballast for its Application in Railway Tracks : the Influence of Temperature. **Construction and Building Materials**. Vol. 101, p. 338–346, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.102

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: Conceitos e Dimensionamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TEIXEIRA, P. F.; FERREIRA, P. A.; PITA, A. L.; CASAS, C.; BACHILLER, A. 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, 2009.

TENNAKOON, N.; INDRARATNA, B.; RUJIKIATKAMJORN, C.; NIMBALKAR, S.; NEVLLE, T. The Role of Ballast-Fouling Characteristics on The Drainage Capacity of Rail Substructure. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 35, n. 4, p. 1–4, 2012. DOI: 10.1520/GTJ104107

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, N°44, p. 892-898, 1980.

VARVERI, A.; ZHU, J.; KRINGOS, N. Moisture Damage in Asphaltic Mixtures. **Advances in Asphalt Materials**, Elsevier, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100269-8.00010-6>

VASCONCELOS, K. L.; BHASIN, A.; LITTLE, D.; SOARES, J. B. Avaliação do Dano por Umidade Induzida e da Recuperação de Trincas em Mástique. *In: 18° Encontro de Asfalto*, Rio de Janeiro, 2006.

VON DER OSTEN, F. B. **Avaliação de quatro Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás**. Dissertação de Mestrado – Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.