

# AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O DANO POR UMIDADE E A PERMEABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONTENDO CINZA VOLANTE COMO FÍLER

Felipe Natan R. de Freitas (UFC) E-mail: fnrfreitas@gmail.com  
Wellington Lorrán Gaia Ferreira (UFERSA) E-mail: wlorran@hotmail.com  
Verônica T. F. Castelo Branco (UFC) E-mail: veronica@det.ufc.br

**Resumo:** No interior do revestimento asfáltico, a água pode interferir na adesão do filme de ligante com os agregados e na coesão do próprio filme de ligante, agravando mecanismos de dano, tais como o trincamento por fadiga. Entretanto, a falha adesiva e coesiva são as últimas etapas de um processo que inicia com a infiltração d'água nessa estrutura. Nesse contexto, um dos parâmetros que ajuda a compreender o transporte de umidade em meios porosos é a permeabilidade. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação entre o dano por umidade e a permeabilidade em misturas asfálticas compostas por diferentes fileres: natural e cinza volante. Para isso, foram avaliadas misturas asfálticas com 4% de filer natural e Volume de Vazios (Vv) de 4 e 7%, além de misturas com cinza volante (também 4%) como filer e os mesmos Vv (4 e 7%). Para a avaliação do dano por umidade, foram utilizados o ensaio *Lottman*, bem como o Processamento Digital de Imagens (PDI). Os resultados obtidos demonstraram que pode existir uma forte relação ( $R^2 = 0,98$  para amostras não condicionadas e  $R^2 = 0,75$  para amostras condicionadas) entre a resistência ao dano por umidade e a permeabilidade para as misturas asfálticas avaliadas. A cinza volante não se comportou como melhorador de adesividade, o que pode ser atribuído a composição química deste material, além da sua heterogeneidade.

**Palavras-chave:** Misturas Asfálticas, dano por umidade, permeabilidade, cinza volante.

## EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MOISTURE DAMAGE AND PERMEABILITY OF ASPHALT MIX-TURES CONTAINING FLY ASH AS A FILER

**Abstract:** Within the asphalt surface layer, the water can interfere in the binder/aggregate adhesion and in the cohesion of the binder itself, accelerating damage mechanisms such as fatigue damage. However, an adhesive and cohesive failure are the last stages of a process that begins with an infiltration of water in the structure. The coefficient of permeability (k) has been a parameter commonly used for characterizing the drainage capacity of asphalt mixtures. Thus, this work aims to evaluate the relationship between the moisture damage and the permeability in asphalt mixtures composed of different fillers: natural and fly ash. For this, it was analyzed asphalt mixtures with 4% of natural filler and Air Voids (AV) of 4% and 7%, besides asphalt mixtures with fly ash as a filler (also 4%) and the same AV (4 and 7%) were evaluated. In order to evaluate the moisture damage, the *Lottman*, as well as the Digital Image Processing (DIP) were used. The results were shown that it can exist a strong relationship ( $R^2 = 0.98$  for unconditioned samples and  $R^2 = 0.75$  for conditioned samples) between moisture damage and permeability for asphalt mixtures. The fly ash evaluated in this work did not act as a moisture damage additive, which can be explained by its chemical composition and or its used content.

**Keywords:** Asphalt Mixtures, Moisture Damage, Permeability, Fly Ash.

### 1. INTRODUÇÃO

A presença da água no interior de revestimentos asfálticos desencadeia mecanismos que contribuem para a perda de propriedades mecânicas, tais como o trincamento por fadiga, o que pode reduzir a vida útil da estrutura. É possível destacar dois desses mecanismos nocivos: a perda de coesão, que ocorre dentro do próprio filme de ligante asfáltico, e a perda de adesão que ocorre na interface entre os agregados e o ligante asfáltico. Esse fenômeno é conhecido como dano por umidade induzida. Diante dessa problemática, pesquisadores estão à constante procura de materiais que possam diminuir o efeito deletério da água em misturas asfálticas. Além dos ligantes asfálticos modificados por polímeros, surgiram os agentes melhoradores de adesividade, que, em geral,

proporcionam uma melhor compatibilidade química entre agregados e ligante asfáltico tornando as misturas asfálticas menos suscetível ao dano por umidade. Além disso, com a crescente preocupação ambiental, há uma tendência cada vez maior em procurar alternativas tecnológicas que possam reduzir os impactos ambientais e a quantidade de resíduos gerados nos mais diversos serviços. Nesse contexto, a cinza volante é um rejeito proveniente da queima do carvão durante o processo de produção de energia elétrica nas usinas termoelétricas. Existem diversos relatos na literatura de estudos que utilizaram a cinza em misturas asfálticas (Autor, 1996; Autor, 2009; Autor, 2012; Autor, 2013). Além da questão ambiental, o emprego da cinza volante em misturas asfálticas apresenta como uma possível vantagem técnica, a redução da suscetibilidade ao dano por umidade, pois a mesma pode influenciar na adesividade do agregado com o ligante asfáltico.

Quando a umidade penetra e se mantém no interior do revestimento asfáltico, esta exerce um efeito deletério no mesmo. É possível destacar dois desses mecanismos nocivos: a perda de coesão, que ocorre dentro do próprio filme de ligante asfáltico, e a perda de adesão que ocorre na interface entre os agregados e o ligante asfáltico. Esses mecanismos contribuem para a alteração de propriedades mecânicas, tais como a resistência ao trincamento por fadiga e a deformação permanente. Esse fenômeno é conhecido como dano por umidade. Segundo Autor (2009), o dano por umidade consiste em duas etapas: (i) processo de transporte de umidade e (ii) resposta do sistema. A etapa (i) refere-se aos processos nos quais a umidade no estado líquido ou vapor infiltra na mistura asfáltica. A etapa (ii) está relacionada com as alterações geradas no interior da mistura asfáltica que conduzem a redução da capacidade de suporte da mesma. Além disso, o citado autor afirma que o tipo de material, bem como os atributos (características físicas, químicas e geométricas) do sistema controlam o transporte de umidade e a resposta do mesmo.

Existem diversos mecanismos de dano responsáveis pelo dano por umidade, dentre esses é possível citar: descolamento e deslocamento da película de ligante asfáltico (AUTOR e AUTOR, 1998). O descolamento é a separação do filme de ligante asfáltico do agregado, devido a existência de uma camada delgada de água, sem danificar o filme de ligante asfáltico. O mecanismo de deslocamento diferencia-se do descolamento porque o primeiro é causado pela quebra do filme de ligante asfáltico deslocando o mesmo da superfície do agregado. Isso pode acontecer quando os agregados não estão adequadamente envolvidos ou quando ocorre a perfuração do filme de ligante asfáltico por agregados muito angulares e/ou lamelares. Vale ressaltar que as características dos agregados utilizados em misturas asfálticas estão diretamente ligadas a resistência ao dano por umidade induzida das mesmas, pois esses componentes são um dos responsáveis pela falha adesiva que pode ocorrer na mistura asfáltica em presença da água. A acidez do agregado depende do teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente no mesmo. Quanto maior for a presença desse componente, maior tende a ser a acidez do agregado. De maneira geral, agregados ácidos são hidrofílicos e tendem a ter uma maior atração pela água ao invés do CAP, enquanto agregados básicos são hidrofóbicos e tendem a manter um bom envolvimento com o CAP. Isso ocorre porque os componentes ácidos do ligante asfáltico interagem com os componentes básicos dos agregados formando sais que são insolúveis na presença da água e que resistem à perda de adesão (AUTOR, 2011).

Apesar do que foi exposto anteriormente, as falhas adesiva e coesiva são as últimas etapas de um processo que começa com os diferentes modos de transporte de umidade no interior da mistura asfáltica (AUTOR, 2009). Portanto, é fundamental

caracterizar o processo de transporte de umidade, e assim poder correlacioná-lo ao mecanismo de dano associado. A permeabilidade de um material poroso é definida como a capacidade deste em transportar um fluido através dos seus vazios quando sujeito a pressão (AUTOR, 2004). A permeabilidade de qualquer material está diretamente relacionada com as características dos materiais que o constituem, bem como com as características do fluido percolante. O modo como os componentes da mistura asfáltica se organiza no interior da estrutura é fundamental para determinar a permeabilidade da mesma, pois aqueles definem o tamanho, a quantidade e a distribuição dos vazios presentes na mistura asfáltica. Segundo Autor (2004), além dos materiais constituintes, a permeabilidade de misturas asfálticas é influenciada pelo processo de compactação, e por propriedades geométricas do pavimento, como a espessura da camada de revestimento. Este mesmo autor afirma ainda que os fatores citados anteriormente afetam a permeabilidade porque alteram a distribuição de vazios em termos de tamanho, de conectividade e de distribuição dos mesmos.

Apesar da importância para o pavimento, a permeabilidade de misturas asfálticas não é usualmente avaliada a nível de projeto no Brasil, ainda não há sequer um procedimento normatizado para a obtenção do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) de misturas asfálticas em laboratório. Com relação aos valores de  $k$  para misturas asfálticas, o National Cooperative Highway Research Program - NCHRP (Autor, 2006) recomenda o valor de  $1,25 \times 10^{-5} \text{m/s}$  como a máxima permeabilidade para misturas asfálticas. O elevado valor de  $k$  (acima de  $1,25 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ) de misturas asfálticas pode acelerar o dano provocado pela água tanto na camada de revestimento quanto nas camadas subjacentes do pavimento. Autor (2006) relacionaram o  $k$  com o dano por umidade e verificaram que existe uma relação parabólica entre os mesmos. Esses autores observaram que misturas asfálticas com baixa permeabilidade (abaixo de  $8 \times 10^{-6} \text{m/s}$  para as amostras avaliadas) reduzem a infiltração de água, enquanto que em misturas asfálticas com permeabilidade elevada (acima de  $2,8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ), caso das misturas asfálticas drenantes, a água sai rapidamente do interior do material sem tempo para reagir. Entretanto, existe uma faixa de permeabilidade para a qual a água entra na mistura e tem dificuldade para sair. Tal fato aumenta a sensibilidade ao dano provocado pela umidade, pois a água fica retida dentro da estrutura. Entretanto, essa faixa de valores de permeabilidade que maximizam o dano deve ser observada para cada tipo de mistura asfáltica projetada, pois a distribuição de vazios e, conseqüentemente, os valores de permeabilidade vão modificar por diversos fatores, tais como granulometria, energia de compactação, teor de ligante e outros

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a relação entre o dano por umidade e a permeabilidade em misturas asfálticas compostas por diferentes fileres: natural e cinza volante, a fim de verificar a influência desse agregado artificial na suscetibilidade ao dano por umidade. Para avaliação do dano por umidade nas misturas asfálticas foram utilizados o ensaio *Lottman* modificado de acordo com a norma ASTHO T 283 (2014), bem como o Processamento Digital de Imagens (PDI). Já para a determinação da permeabilidade das amostras utilizou-se o método proposto por Autor (2013). Ademais, foram dosadas misturas asfálticas com 4% e 7% de Volume de Vazios ( $V_v$ ), bem como diferentes teores de Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP (5% e 4,4%) a fim de verificar a influência desses parâmetros no dano por umidade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Misturas Asfálticas

No presente trabalho foram dosadas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA) compostas por diferentes fíleres: natural e cinza volante. A cinza volante utilizada foi coletada na termoelétrica Energia Pecém I, nas margens da rodovia CE-085, Km 37. O CAP utilizado foi classificado por penetração como 50/70 produzido pela Petrobras na Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – Lubnor. As misturas asfálticas apresentam Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0mm e foram dosadas a partir da metodologia Superpave com a seguinte proporção de agregados: 17% de brita  $\frac{3}{4}$ ", 39% de brita  $\frac{1}{2}$ " e 44% de pó de pedra. Os agregados naturais utilizados são de origem granítica, procedentes da pedreira MTF, localizada a cerca de 30km da cidade de Fortaleza/CE. A Tabela 1 apresenta os parâmetros obtidos com a dosagem. As misturas asfálticas 1 (contendo 5,0% de CAP, fíler natural e Vv = 4%) e 3 (contendo 4% de cinza volante, 4,4% de CAP e Vv = 4%), foram compactadas com número de giros igual a 100. As misturas asfálticas 2 (contendo 5,0% de CAP, fíler natural e Vv = 7%) e 4 (contendo 4% de cinza, 4,4% de CAP e Vv = 4%) foram compactadas com 30 giros, enquanto a mistura asfáltica 5 (contendo 4% de cinza, 5,0% de CAP e Vv = 4%) foi compactada com 45 giros. Foram avaliados Vv de 4% e 7% com o objetivo de verificar a influência desse parâmetro no dano por umidade.

Tabela 1 - Parâmetros de dosagem das misturas asfálticas avaliadas no estudo

Mistura Asfáltica	Tipo de Fíler	Teor de Fíler (%)	Gmm	Nº Giros	CAP (%)	Vv (0,4 ± %)
1	Natural	4,0	2,447	100	5,0	4,0
2				30		7,0
3	Cinza	4,0	2,451	100	4,4	4,0
4				30		7,0
5				45		4,0

Para a mistura asfáltica contendo cinza volante (4% em massa) como fíler, para manter a mesma curva granulométrica, fracionaram-se os agregados graúdo e miúdo e removeu-se a fração passante na peneira #200 dos três materiais (britas  $\frac{3}{4}$ " e  $\frac{1}{2}$ " e pó de pedra) substituindo pela fração passante na peneira #200 da cinza volante. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica das misturas asfálticas estudadas.

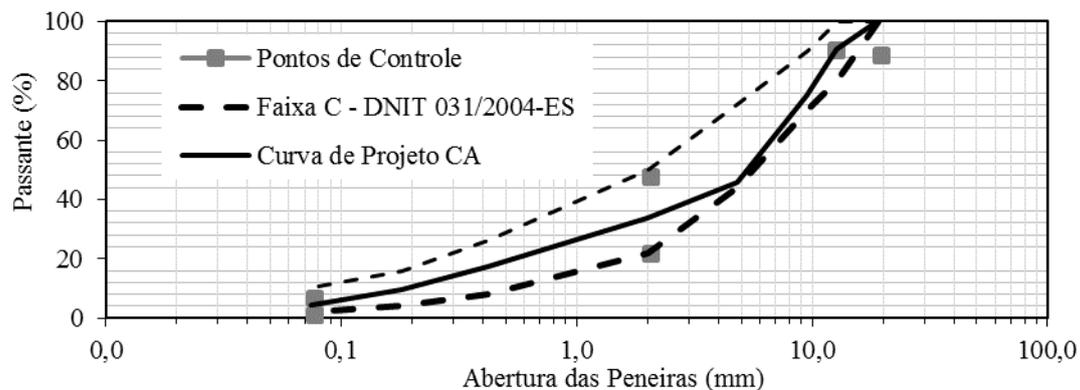


Figura 1 - Curva granulométrica das misturas asfálticas estudadas nessa pesquisa

## 2.2 Ensaio de Permeabilidade

Como no Brasil não há um padrão para determinar o  $k$  de misturas asfálticas, o procedimento apresentado na norma ABNT NBR 14545 (2000) para solos argilosos foi adaptado para este fim. A Figura 2 mostra alguns detalhes das etapas executadas para determinar o valor do  $k$ . No geral, o teste de permeabilidade avalia o tempo necessário para que uma coluna de água percole através da amostra saturada. Uma membrana de impermeabilização juntamente com argila plástica foram aplicadas na circunferência do Corpo de Prova (CP) para reduzir ou eliminar o fluxo lateral. O  $k$  é obtido quando há uma constância no tempo de percolação. Nesse instante, considera-se que a amostra se encontra saturada. No estudo realizado por Autor (2013) mais detalhes do teste podem ser encontrados.



Figura 2 - Ilustração das etapas para realização do ensaio de permeabilidade: a) impermeabilização lateral, b) vista interna do permeômetro, c) permeômetro e d) ilustração do permeômetro

### 2.3 Ensaio Lottman Modificado

O ensaio de Lottman modificado (Figura 3) foi realizado de acordo com a norma ASTHO T 283 (2014). A norma sugere que as amostras moldadas tenham  $V_v$  de 7% ( $\pm 0,5$ ), simulando o que pode ocorrer no início da vida útil da estrutura. Porém, a fim de avaliar o dano por umidade, também, em amostras com 4% de  $V_v$ , optou-se por adaptar a norma nesse sentido, mantendo, entretanto, o critério referente ao grau de saturação (entre 70% e 80%). O processo de congelamento foi realizado na temperatura de  $-18^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  por 16 horas.

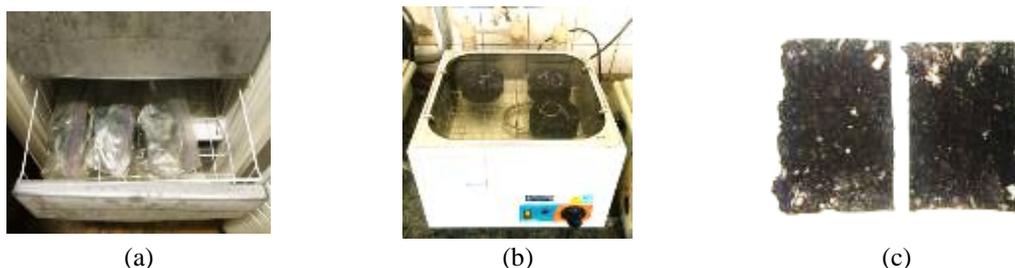


Figura 3 - Procedimento para realização do ensaio de Lottman modificado: a) ciclo de congelamento, b) ciclo de aquecimento e c) amostra rompida

É importante mencionar que, inicialmente, a proposta metodológica consistia em determinar o  $k$  para a amostra não condicionada, e, após o condicionamento, determinar o  $k$  novamente para a mesma amostra. Entretanto, observou-se que após a realização do ensaio de permeabilidade antes do condicionamento, parte da argila utilizada para impermeabilizar a lateral da amostra infiltrava no CP, colmatando e alterando a distribuição de vazios, pois o  $k$  reduziu cerca de 50% após o condicionamento. Frente a isso, optou-se por utilizar amostras diferentes para determinação do  $k$  antes e depois do

condicionamento das mesmas, mesmo entendendo que isso pode influenciar nos resultados obtidos.

#### 2.4 Processamento Digital de Imagens (PDI)

Com o intuito de avaliar o deslocamento e o descolamento da película de ligante asfáltico nas amostras após a realização do ensaio de Lottman foi utilizada a técnica de Processamento Digital de Imagens (PDI), que consiste na obtenção de imagens para caracterização de misturas asfálticas e agregados. Para isso, foi utilizada uma câmera digital e o software *ImageJ*. Esse programa é capaz de detectar, a partir de uma imagem obtida, cada um dos 256 tons de cinzas e gerar um binário monocromático em preto e branco. É possível determinar a quantidade de pixels na cor branca e preta de cada imagem. Para a mistura asfáltica, a área preta é formada por agregados recobertos por CAP, enquanto a área branca representa mal recobertos por CAP e que, portanto, sofreram mecanismos de dano por umidade devido à realização do ensaio de Lottman modificado. Dessa forma, pode-se criar um indicador quantitativo de dano por umidade a partir da relação obtida entre área branca e área preta. Fixou-se o valor de detecção de brilho do *ImageJ* em 50, pois percebeu-se que esse era um valor adequado para detectar o tom dos agregados que apresentaram remoção da película de ligante asfáltico. A Figura 4 apresenta exemplos de imagens das amostras antes do tratamento (a), o processo de detecção dos pixels, a partir dos tons de brilho da imagem (b) e a imagem monocromática gerada após o tratamento com o uso do *software ImageJ* (c).

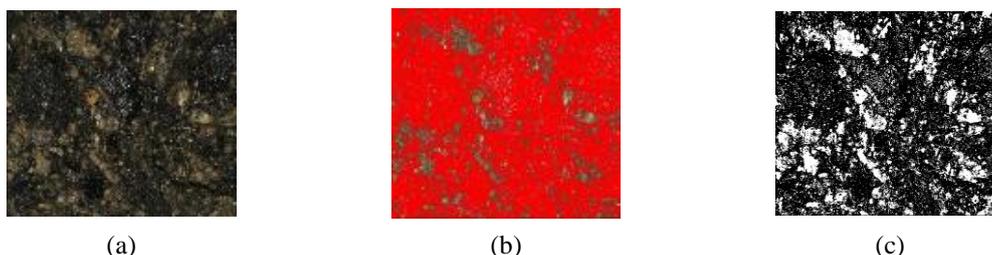


Figura 4 - Imagens obtidas através do PDI com o uso do software *ImageJ*: a) antes do tratamento, b) detecção dos pixels e c) imagem tratada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Permeabilidade

A Figura 5 apresenta os resultados de permeabilidade para as misturas asfálticas condicionadas (COND.) e não condicionadas (NC) contendo fíler natural.

A partir da observação da Figura 5, para amostras com 7% de  $V_v$ , verificou-se que, em média, os valores de  $k$  para as amostras não condicionadas (NC) e condicionadas (COND) são superiores (30 vezes e 2,4 vezes, respectivamente) àqueles obtidos para as amostras com 4% de  $V_v$ . Esse comportamento era esperado, uma vez que amostras com  $V_v$  de 7% apresentam maior probabilidade de apresentar vazios interconectados na sua estrutura interna. Observa-se também que, para as amostras com 4% de  $V_v$ , ocorre um aumento expressivo (cerca de 10 vezes) no valor de  $k$  após o condicionamento. Já para a mistura asfáltica com 7% de  $V_v$ , esse aumento não foi observado, as duas condições apresentaram valores médios próximos (15% de diferença) para o valor de  $k$ . Dessa forma, acredita-se que para as amostras com 4% de  $V_v$ , a estrutura interna de vazios encontra-se bem consolidada e com pequena quantidade de vazios interconectados, ao contrário do que acontece nas amostras com 7% de  $V_v$ . À medida que o dano por umidade é induzido nas amostras com 4% de  $V_v$ ,

esses vazios aumentam de tamanho a ponto de se unir formando ligações que facilitam a infiltração da água, consequentemente, o valor de k aumenta.

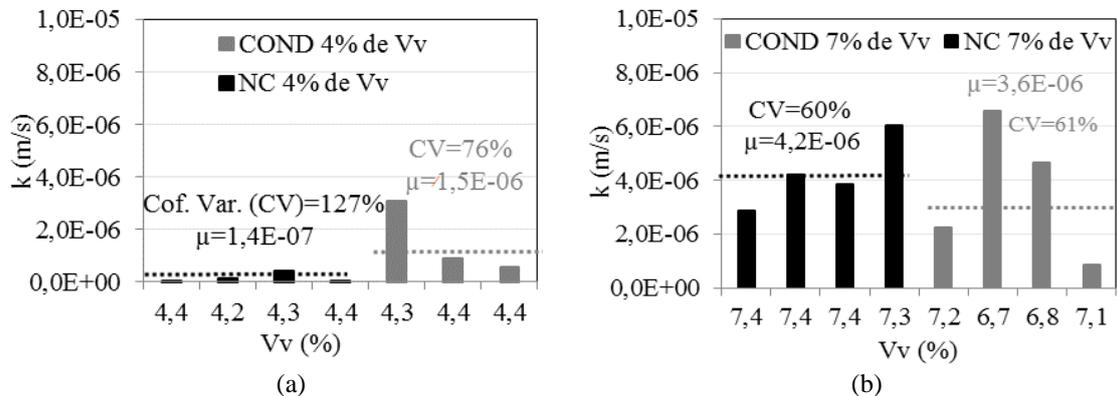


Figura 5 - Resultados de permeabilidade para misturas asfálticas condicionadas e não condicionadas contendo fíler natural: a) Vv de 4% e b) Vv de 7%.

Os resultados de permeabilidade para as amostras da mistura asfáltica com fíler composto por cinza volante compactadas com 4 e 7% de Vv são apresentados na Figura 6. Observando os valores encontrados, verifica-se o mesmo comportamento encontrado para a mistura asfáltica composta por fíler natural. Nota-se que os valores médios de k para as amostras com 4% de Vv são inferiores (85% para as amostras não condicionadas e 46% para as amostras condicionadas) àqueles obtidos para as amostras com 7% de Vv. Ocorre um aumento (224%) significativo no valor de k para as amostras condicionadas se comparado ao valor encontrado para as amostras não condicionadas com 4% de Vv. O mesmo não ocorre para as amostras com 7% de Vv, pois o valor de k variou apenas 11%. Pode-se concluir que, assim como percebido para as misturas asfálticas compostas por fíler natural, o processo de condicionamento não influenciou, significativamente, nos valores de k para amostras com 7% de Vv.

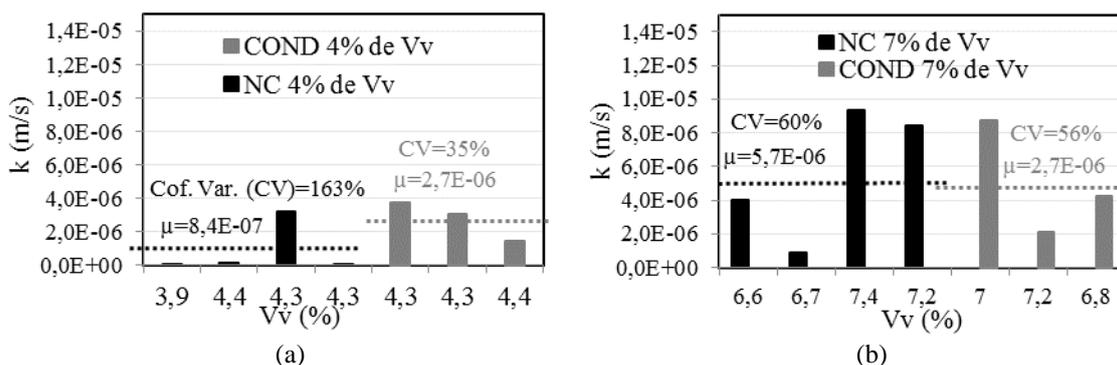


Figura 6 - Resultados de permeabilidade para misturas asfálticas condicionadas e não condicionadas contendo cinza volante como fíler: a) Vv de 4% e b) Vv de 7%.

### 3.2 Dano por Umidade

A Tabela 2 apresenta os valores de RRT obtidos para as cinco misturas asfálticas analisadas nesse estudo. O critério adotado para determinar a suscetibilidade da mistura asfáltica com relação ao dano por umidade foi de RRT inferior a 80%.

Observando os valores de RRT obtidos, verifica-se que nenhuma mistura asfáltica avaliada no presente estudo gerou valor acima do considerado aceitável pela AASHTO T 283 (2014) (mínimo de RRT equivalente a 80%). Este resultado pode ser atribuído ao

fato dos agregados utilizados nas amostras serem do tipo granítico (ácidos, com elevado percentual de silício), que é, reconhecidamente, um tipo de agregado com fraca interação com o ligante asfáltico e que, dessa forma, apresenta baixa adesividade. De acordo com o ensaio de Fluorescência de Raio X, as amostras de cinza volante avaliadas são compostas por cerca de 51% de silício. Ademais, apesar das misturas asfálticas com fíler composto por cinza volante terem apresentados valores de RRT inferiores (30% para  $V_v = 4\%$  e 36% para  $V_v = 7\%$ ) àqueles encontrados para as misturas asfálticas compostas por fíler natural, não é possível dizer que o uso desse resíduo foi prejudicial com relação à resistência ao dano por umidade, uma vez que o teor de CAP usado para a mistura asfáltica com cinzas foi 12% inferior se comparado a mistura asfáltica com fíler natural. Esse fator, teor de CAP, impacta diretamente na suscetibilidade ao dano por umidade induzida. Autor (2011) analisou misturas asfálticas com relação ao dano por umidade por meio do ensaio de Lottman modificado. Os agregados coletados foram provenientes da mesma pedreira utilizada no presente estudo. O autor obteve para as misturas asfálticas os valores de RRT de 97 e 76% para as amostras com 4 e 7% de  $V_v$ , respectivamente. Esses valores são superiores aos obtidos nesse estudo, que foram de 73 e 47%, respectivamente. Esse fato pode ser atribuído ao teor de CAP de 6% utilizado pelo citado autor, enquanto no presente estudo o teor de CAP utilizado foi de 5%.

Tabela 2 - Valores de RRT para as misturas asfálticas estudadas

Mistura Asfáltica	Tipo de Fíler	CAP (%)	Vv (%)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPA)						RRT (%)
				Cond	NC	Média (COND)	Média (NC)	Desvio Padrão (Cond)	Desvio Padrão (NC)	
1	Natural	5,0	4,0	1,73	1,98	1,40	1,91	0,27	0,05	73
				1,39	1,85					
				1,08	1,91					
2	Natural	5,0	7,0	0,85	1,32	0,64	1,38	0,15	0,08	47
				0,57	1,34					
				0,51	1,49					
3	Cinza	4,4	4,0	0,70	1,99	1,01	1,99	0,28	0,01	51
				0,95	2,00					
				1,38	1,97					
4	Cinza	4,4	7,0	0,49	1,45	0,51	1,43	0,02	0,02	35
				0,49	1,45					
				0,54	1,40					
5	Cinza	5,0	4,0	1,13	1,75	0,99	1,51	0,13	0,17	66
				1,02	1,36					
				0,82	1,42					

A partir dos resultados apresentados e das variações percebidas nos valores de RT para as amostras analisadas, determinou-se uma faixa de variação de RRT para cada mistura asfáltica. Foi feita uma combinação com o valor de RT de cada amostra condicionada com os valores de RT obtidos para as amostras não condicionadas. Dessa forma, foram obtidos  $3 \times 3 = 9$  valores de RRT para cada mistura asfáltica. A Tabela 3 apresenta as faixas de variação de RRT para as misturas asfálticas estudadas.

Tabela 3: Faixa de variação de RRT para as misturas asfálticas analisadas

Mistura Asfáltica	Tipo de Fíler	CAP (%)	Vv (%)	Faixa de Variação de RRT
1	Natural	5,0	4,0	55 a 93%
2			7,0	38 a 64%
3	Cinza	4,4	4,0	35 a 70%
4			7,0	33 a 39%
5			5,0	57 a 83%

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3 é possível perceber que a mistura asfáltica com 7% de Vv contendo cinza volante como filler e 4,4% de CAP apresentou a menor variação de RRT (5%), ao passo que a mistura asfáltica contendo filler natural com 4% de Vv apresentou a maior variação para esse valor (38%). Os valores apresentados acima mostram a elevada variação dos resultados obtidos nesse tipo de ensaio. Somado a isso, a estrutura interna de vazios da mistura asfáltica é um fator que não pode ser controlado durante a compactação Das amostras, o que inclui outra variável nos resultados. Uma análise mais precisa dessa estrutura só pode ser feita por meio do uso de tecnologias mais sofisticadas, como através do uso de tomografia computadorizada, por exemplo.

O motivo pelo qual a cinza volante avaliada no presente estudo não se comportou eficientemente como agente melhorador de adesividade pode ser atribuído a alguns fatores. No que se refere a cinzas, o teor desse material utilizado pode não ter sido o teor ideal, assim como a sua composição química pode ser inadequada. Além da própria heterogeneidade do próprio material. Autor (2013) usaram cinzas com valores de CaO iguais a 28,9 e 26,9%, respectivamente. Esses valores são significativamente superiores ao valor de 4,8% de CaO encontrado para cinza utilizada no presente estudo. Outro fator que pode ter relação com o comportamento apresentado pela cinza volante é o tipo de agregado utilizado, que pode não ter apresentado uma boa interação química com a cinza em questão.

### 3.3 Processamento Digital de Imagens (PDI)

A Figura 7 apresenta as relações entre área preta e área total ( $A_p/A_t$ ) para as amostras não condicionadas e para as amostras condicionadas. Um fato observando após o rompimento dos CPs pelo ensaio de RT foi que, para todas as misturas asfálticas analisadas, as amostras condicionadas apresentaram um maior número de agregados fraturados se comparado ao número encontrado para as amostras condicionadas. Isso ocorreu, possivelmente, devido ao nível de esforço que as amostras são submetidas durante o ensaio de RT. Possivelmente, para as amostras condicionadas, devido a maior ocorrência de falha adesiva, os CPs romperam a tensões mais baixas, fazendo com que houvesse uma menor quantidade de agregados fraturados.

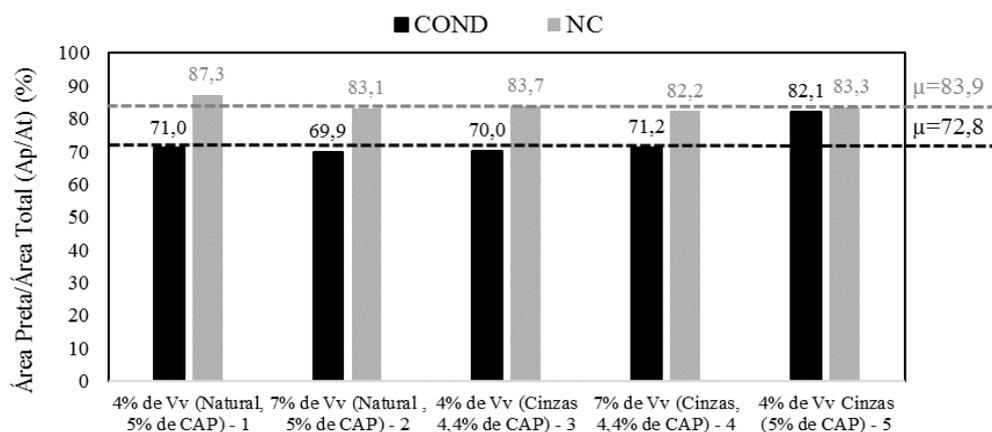


Figura 7: Relação entre área preta ( $A_p$ ) e área total ( $A_t$ ) para as amostras submetidas ao ensaio Lottman modificado

Analisando a Figura 7, verifica-se que houve uma redução de cerca de 13%, em média, dos valores de  $A_p/A_t$  das amostras condicionadas com relação às amostras não

condicionadas. Esse fato ocorre devido aos mecanismos de deslocamento e de descolamento que ocorrem na amostra submetida ao condicionamento realizado durante o ensaio Lottman modificado. O dano por umidade imposto nesse ensaio remove parte da camada de ligante da superfície dos agregados, deixando os mesmos total ou parcialmente descobertos. Como o agregado é mais claro que o CAP, ocorre uma redução no valor de  $A_p/A_t$ . As misturas asfálticas 1, 2 e 4 apresentaram valores similares de  $A_p/A_t$  para as amostras referentes aos dois estados de condicionamento. A mistura asfáltica 3 (4% de Vv e fíler natural) apresentou o maior valor de  $A_p/A_t$  para as amostras não condicionadas, cerca de 4,8% superior à média das outras misturas asfálticas. No que se refere às misturas asfálticas condicionadas, a mistura asfáltica 5, que contém cinza volante como fíler, apresentou a maior relação  $A_p/A_t$  (82,1%), representando uma maior quantidade de CAP. Valor que foi notoriamente superior à média das outras misturas asfálticas estudadas, superando em cerca de 14%.

Comparando os resultados obtidos através do uso do PDI com aqueles obtidos pelo ensaio de Lottman modificado, verifica-se que os valores de  $A_p/A_t$  reduziram após o condicionamento para todas as misturas asfálticas, como era esperado devido aos mecanismos de dano por umidade induzida. Entretanto, alguns valores de  $A_p/A_t$  foram de encontro aos valores obtidos de RRT, como aquele obtido para a mistura asfáltica 1, por exemplo, que apresentou maior valor de RRT (73%), porém esta mistura gerou valor de  $A_p/A_t$  cerca de 13,5% inferior se comparado ao valor obtido para a mistura asfáltica 5, que foi a que gerou maior valor de  $A_p/A_t$  entre as misturas asfálticas avaliadas. Dessa forma, o uso do PDI para avaliar o grau de dano por umidade em misturas asfálticas apresentou algumas deficiências. Na falta de técnicas mais precisas, porém, essa metodologia é recomendada, pois apresenta critérios quantitativos ao invés de critérios qualitativos como apenas a análise visual.

### 3.4 Permeabilidade Versus Dano por Umidade

A Figura 8 apresenta os resultados de RRT e de permeabilidade para cada uma das misturas asfálticas avaliadas antes (a) e depois (b) do ensaio Lottman. Os valores representam a razão entre a média dos valores de RT para três CPs condicionados e a média dos valores de RT para três CPs não condicionados.

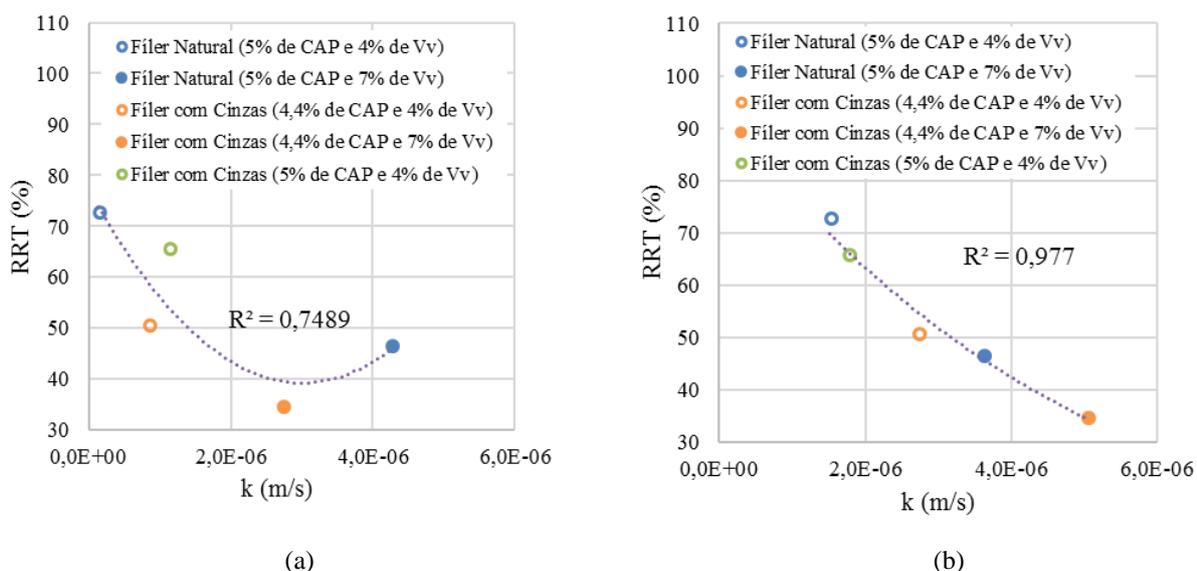


Figura 8 - Valores de RRT versus k antes e depois do ensaio Lottman: a) amostras não condicionadas e b) amostras condicionadas

Os resultados apresentados na Figura 8 apontam que existe uma boa relação entre os valores de  $k$  e de RRT. As amostras condicionadas apresentaram o maior coeficiente de correlação ( $R^2 = 0,98$ ) com tendência em função exponencial, enquanto as amostras não condicionadas apresentaram uma tendência em função polinomial quadrática com  $R^2 = 0,75$ . Percebe-se, também, que a segunda curva (para as amostras condicionadas) sofreu um deslocamento para a direita em relação a curva das amostras não condicionadas, o que indica um aumento, em geral, dos valores de permeabilidade após o condicionamento.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesse estudo, avaliou-se a permeabilidade e a relação da mesma com o dano por umidade em misturas asfálticas compostas por agregados naturais e em misturas asfálticas com adição de cinza volante como fíler. Observou-se que o processo de condicionamento teve relevante impacto nos valores de  $k$  das amostras com 4% de Vv, para as misturas asfálticas 1 (fíler natural, 4% de Vv e 5% de CAP) e 3 (fíler contendo cinza, 4% de Vv e 4,4% de CAP). Os valores médios de  $k$  para as amostras com 4% de Vv ficaram na mesma ordem de grandeza ( $10^{-7}$  m/s), com exceção dos valores encontrados para a mistura asfáltica 5 (fíler contendo cinza, 4% de Vv e 5% de CAP) que apresentou valor de  $k$  na ordem de grandeza de  $10^{-6}$  m/s. As amostras com 7% de Vv apresentaram valores médios na ordem de grandeza de  $10^{-6}$  m/s. Esse fato pode ser atribuído a distribuição de vazios nas amostras com 4% de Vv, onde os CPs não condicionados apresentam estrutura de vazios mais consolidada se comparados aos CPs com 7% de Vv.

Com relação ao dano por umidade, as amostras compactadas com 4% de Vv apresentaram os maiores valores de RRT, mostrando-se menos suscetíveis ao efeito deletério da água em relação às amostras com 7% de Vv. A adição da cinza volante não se mostrou eficaz como melhorador de adesividade. Isso pode estar ligado ao teor de cinza utilizado, assim como as propriedades químicas desse material, como a baixa concentração de cálcio observada. Do ponto de vista econômico, a cinza volante analisada apresentou uma vantagem, com redução de 12% do teor de CAP necessário para atingir a volumetria requerida. Além disso, a análise por meio do uso do PDI indicou que a mistura asfáltica composta por fíler de cinza volante e 5% de CAP apresentou menor redução da área coberta pela película de ligante asfáltico após o condicionamento em comparação às outras misturas asfálticas avaliadas. Os resultados obtidos indicaram que o PDI não foi condizente com os valores de RRT obtidos. Porém, ele pode ser um indicador de avaliação do dano por umidade mais interessante que somente a análise visual, já que apresenta dados quantitativos. Por fim, quanto a relação entre o dano por umidade induzida e a permeabilidade, foram obtidos bons coeficientes de correlação entre essas propriedades, tanto para as amostras condicionadas ( $R^2 = 0,75$ ), quanto para as amostras não condicionadas ( $R^2 = 0,98$ ).

Diante disso, para trabalhos futuros, sugere-se avaliar a relação do dano por umidade e a permeabilidade para uma variedade maior de Vv, bem como avaliar o dano por umidade em misturas asfálticas por meio de ensaios menos empíricos. Além disso, sugere-se utilizar diferentes tipos (e teores) de cinzas volantes em misturas asfálticas e avaliar seu comportamento com relação ao dano por umidade induzida. Por fim, sugere-se verificar a influência da estrutura interna de misturas asfálticas compactadas na resistência ao dano por umidade induzida desses materiais por meio de tomografia computacional.

**REFERÊNCIAS**

**Autores**, Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 8, n. 1, pp. 19-25, February 1996.

**Autores**, Analysis of HMA permeability through microstructure characterization and simulation of fluid flow in X-ray CT images, *Tese de Doutorado*, Texas A&M University, Texas, USA, December 2004.

**AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASH-TO T 283**, Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage, Washington, D.C., EUA, 2014.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545**, Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

**Autores.**, Relationship of air voids, lift thickness, and permeability in hot mix asphalt pavements, In: Report 531, NCHRP, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, TRB, Washington, D.C., July 2004.

**Autor**, A coupled micromechanical model of moisture-induced damage in asphalt mixtures: formulation and applications, *Tese de Doutorado*, Texas A&M University, Texas, USA, December 2009.

**Autor**, Avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas com diferentes granulometrias, *Monografia (Graduação em Engenharia Civil)*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, dezembro 2013.

**Autores**, Moisture sensitivity of hot mix asphalt (HMA) mixtures in Nebraska - Phase II, In: Report MPM-04, Mid-America Transportation Center, Nebraska, Lincoln, USA, 2009.

**Autores**, "Effects of air void size distribution, pore pressure, and bond energy on moisture damage", *Journal of Testing and Evaluation*, v. 34, n. 1, pp. 1-9, January 2006.

**Autor e Autor**, The success/failure of methods used to predict the stripping propensity in the performance of bituminous pavement mixtures, In: Report 88-03, Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C, January 1998.

**Autor**, 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 (Engenharia de Transportes)*, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, julho 2011.

**Autores**, Application of fly ash in asphalt concrete: from challenges to opportunities, In: World of Coal Ash Conference, Session: Cement & Concrete VI, Lexington, KY, USA, 22-25 April 2013.

**Autores**, Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage", *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 340-346, May 2012.