

## CONSIDERAÇÕES SOBRE A INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA FORMAÇÃO DO ESQUELETO MINERAL, NA TEXTURA E NA PERMEABILIDADE DE MISTURA ASFÁLTICA AEROPORTUÁRIA

Renan Santos Maia

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

### RESUMO

Alcançar um equilíbrio entre parâmetros volumétricos e superficiais do Concreto Asfáltico (CA) em campo é um trabalho complexo. Por isso, este trabalho avaliou fatores de influência dos processos de compactação em estrutura interna, textura e permeabilidade de misturas asfálticas. Para isso, uma mistura aeroportuária de granulometria densa foi construída aplicando 8 protocolos de compactação, variando Grau de Compactação (GC) e sequência de rolos. A análise de esqueleto mineral e textura foi baseada no Processamento Digital de Imagens (PDI): *Image Processing and Analysis Software* (iPas2), *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS2) e Fotogrametria de Próximo Alcance (FPA). Análises estatísticas apontaram a significância do fator compactação na macrotextura. Além disso, GC maiores que 96% levaram a coeficientes de permeabilidade abaixo do limite máximo de  $1,25E-5$  m/s. Entretanto, acredita-se que o esqueleto mineral, a microtextura e os parâmetros de isotropia de textura dependem mais significativamente da granulometria e as propriedades de forma dos agregados.

### ABSTRACT

Achieving satisfactory balance between concrete asphalt (CA) volumetric and surface parameters in the field is a complex work. Thus, this paper aims to evaluate some factors of compaction processes' influence on asphalt mixtures' mineral skeleton, texture, and permeability. For this, airport dense-graded CA was constructed applying 8 different compaction protocols varying in terms of Degree of Compaction (GC) and sequence of rollers. The analysis of mineral skeleton and texture was based on Digital Image Processing (PDI) techniques: The Image Processing and Analysis Software (iPas2), the Aggregate Imaging Measurement System (AIMS2), and the Close-Range Photogrammetry (FPA). Statistical analysis pointed to the significance of the compaction process influence on macrotexture. Also, GC values greater than 96% led to permeability coefficients below the maximum limit of  $1.25E-5$  m/s. However, mineral skeleton, microtexture, and isotropy of texture parameters seem to depend more on particle size distribution and aggregates' shape properties.

### 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sabe-se que cumprir requisitos de textura e atrito em campo é uma atividade complexa, dada a incipiência dos meios de previsão de tais propriedades durante o projeto de misturas asfálticas em laboratório. As propriedades de textura da superfície são impactadas por fatores relacionados à seleção dos materiais - como distribuição granulométrica dos agregados minerais, além das suas propriedades de forma (forma 2D, esfericidade, angularidade e textura) (Hall *et al.*, 2009). Em campo, somam-se ainda fatores relacionados à construção, como o Grau de Compactação (GC), os métodos e os equipamentos utilizados para compactação (Araujo *et al.*, 2020). Cabe mencionar que, por parte do meio técnico, é intuitiva a suposição de que parâmetros volumétricos e condições de superfície (textura e atrito) variam em direções opostas.

Este trabalho surge da premissa de que a compactação impacta não apenas na definição dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, mas também na formação do esqueleto mineral desse compósito, na sua textura superficial, e na homogeneidade da distribuição dos vazios ao longo da espessura de uma camada de Concreto Asfáltico (CA). Dentre as características do esqueleto mineral, apontam-se o número, o comprimento e as orientações dos contatos entre os agregados. Ribas (2016) avaliou o impacto do método de compactação na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas. Para tanto, foram compactadas misturas

asfálticas com diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação do Compactador Giratório *Superpave* (CGS) (0,75°; 1°; 1,25; 1,5° e 1,75°). Também foram analisadas misturas produzidas no Compactador Marshall (CM). Além disso, foram extraídos Corpos-de-Prova (CPs) compactados em campo, por rolos pneumáticos e rolos tandem. A análise foi realizada por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI), com o *software* iPas2. O iPas2 permite avaliar, a partir de imagens da estrutura interna de misturas asfálticas, a quantidade de contatos entre agregados, os comprimentos desses contatos e a suas respectivas direções. Os resultados mostraram que os agregados estavam aleatoriamente orientados no sentido horizontal para os quatro métodos de compactação avaliados. Além disso, foi possível perceber que as misturas asfálticas compactadas com o CM e o CGS apresentaram valores de números de contato entre as partículas similares aos encontrados nas misturas compactadas em campo.

No que tange à textura superficial, sabe-se que o Volume de vazios ( $V_v$ ) está ligado à macrotextura, uma vez que misturas asfálticas com maior  $V_v$  tendem a ter maiores espaçamentos entre os agregados e, conseqüentemente, maior macrotextura. No entanto, a distribuição desses vazios ao longo da espessura de uma camada de CA não é homogênea. Para CPs extraídos em campo, o  $V_v$  na face superior do CP tende a ser maior do que na parte inferior, havendo uma diferença de aproximadamente 15% entre essas faces (Masad *et al.*, 1999). Relatos mais recentes também adotam a premissa de heterogeneidade na distribuição de vazios ao longo da espessura da camada de CA (Ferreira *et al.*, 2019).

Avaliar a questão do  $V_v$  de misturas asfálticas não é uma atividade trivial. Ao passo que, teoricamente, o aumento do  $V_v$  na face superior da camada sugere uma melhora nas condições de macrotextura, torna-se evidente que a mistura asfáltica, em tais condições, tende a não apresentar a mesma qualidade quanto à resistência mecânica e à resistência ao dano por umidade. A última afirmação surge do conhecimento de que o  $V_v$ , o tamanho e a conectividade entre os vazios definem a permeabilidade da mistura, que se reflete na susceptibilidade das misturas asfálticas à entrada e ao confinamento interno de água (Caro *et al.*, 2008). Além disso, a ideia de que as faces superiores podem apresentar um maior  $V_v$  em função de razões múltiplas, sugere que tal condição facilita a entrada de água na camada asfáltica, o que pode desencadear efeitos deletérios em seu desempenho em campo. O CA de granulometria densa tende a apresentar, durante parte de sua vida útil, uma faixa intermediária de valores de  $V_v$  (4 a 7%), o que contribui para um dano por umidade mais severo, uma vez que a água infiltrada tende a ficar confinada dentro da estrutura. Tal severidade pode não ser observada quando a mistura é altamente impermeável (misturas finas com alto teor de aglutinante) ou extremamente porosa (misturas abertas) (Masad *et al.*, 2006).

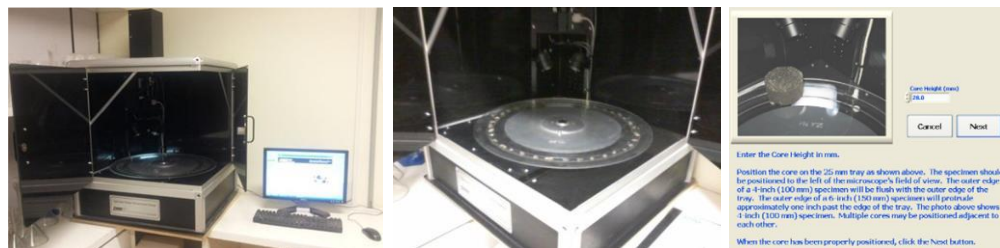
A literatura internacional apresenta um critério de Coeficiente de Permeabilidade ( $k$ ) máximo ( $k = 1,25E-05$  m/s) para CA de granulometria densa (Brown *et al.*, 2004). Análises de misturas asfálticas desse tipo, projetadas com índice de vazios de 4 e 7% e compactadas em laboratório no CGS levaram à observação de altos Coeficientes de Variação (CV) para misturas com  $V_v$  entre 3,5 e 4,5%, embora a permeabilidade média medida estivesse dentro do limite sugerido, reforçando a ideia de que fatores além do  $V_v$  podem impactar na definição de  $k$  (Ferreira, 2015; Ferreira *et al.*, 2019).

É fundamentalmente importante avaliar a influência dos processos de compactação em questões como drenagem superficial, permeabilidade, condições de superfície e estrutura interna dos revestimentos asfálticos. Além disso, é importante desenvolver procedimentos práticos, de

baixo custo e confiáveis para a obtenção dessas informações. Portanto, o objetivo deste trabalho consiste em fazer um apanhado de dados obtidos por este grupo de pesquisa ao longo dos últimos anos para complementar e concatenar uma análise da influência da compactação na estrutura interna, nas condições de superfície e no comportamento hidráulico de pavimentos asfálticos, por meio da aplicação de métodos de baixo custo. Tais métodos incluem o emprego de testes de permeabilidade adaptados e o Processamento Digital de Imagens (PDI), por meio do *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS2) e da modelagem tridimensional de superfícies.

## 2. BREVE RESUMO DO USO DO PDI PARA A ANÁLISE DE TEXTURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Além de propriedades de forma dos agregados, o *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS2) incorpora análises de textura de misturas asfálticas (Rezaei *et al.*, 2011; Araujo *et al.*, 2015) (Figura 1). Nelas, o equipamento realiza 5 varreduras de imagens de CPs em diferentes magnitudes de *zoom*. A primeira varredura ocorre na magnitude máxima. As lentes do microscópio se movem verticalmente até detectar uma imagem de alta resolução em tons de cinza. Esse processo resulta na reconstrução 2D do perfil da macrotextura (Rezaei *et al.*, 2011). A análise da microtextura ocorre nas 3 últimas varreduras. O equipamento trabalha nas mesmas magnitudes de avaliação da textura superficial de agregados (tamanhos 4,75 mm, 9,5 mm e 19 mm). A técnica de processamento para avaliação de microtextura emprega o método das *wavelets*, que é uma função da média e do desvio padrão dos valores de *pixel* das imagens processadas (Masad, 2005).



**Figura 1:** *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS2)

Uma das técnicas PDI que buscam simplificar a aplicação e reduzir o empirismo dos métodos de avaliação de textura é a visão computacional em 3D (estereofotogrametria), que consiste na incorporação de múltiplas imagens de diferentes ângulos para estimar as coordenadas 3D de pontos de uma superfície alvo usando métodos de triangulação (Hartley e Sturn, 1997). A Fotogrametria de Próximo Alcance (FPA) representa o uso de câmeras comuns para reconstrução tridimensional de superfícies (Medeiros *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2019). Esse processo depende da calibração dos parâmetros da câmera e dos processos de sobreposição, que definem as posições relativas entre as tomadas de imagem subsequentes, aplicando fatores de escala e corrigindo distorções de lentes. Embora complexo, o uso de ferramentas computacionais simplifica esse processo, a partir da incorporação de algoritmos de autocalibração (Tiggs *et al.*, 2000, McQuaid *et al.*, 2015). Os parâmetros obtidos no processamento de modelos 3D (ASTM e ISO) se correlacionam satisfatoriamente com os resultados dos testes de Mancha de Areia (MA) ( $R^2 = 0,90$ ), dependendo de fatores como a precisão do equipamento e calibração do software (Kogbara *et al.*, 2016). A literatura indica o uso adequado do método da FPA como procedimento de medição estática de macrotextura (Medeiros *et al.*, 2016; Casey *et al.*, 2018), bem como acurácia e eficiência satisfatórias quando comparados a métodos de varredura a laser (Chen *et al.*, 2019). A literatura mundial avança

agora na proposição de modelos de previsão do atrito pneu-pavimento a partir de parâmetros de textura ( $R^2 = 0,75$ ) (Kogbara *et al.*, 2018). Segundo Kogbara *et al.* (2018), o processamento básico dos modelos tridimensionais deve incluir o nivelamento da superfície (usando o método dos mínimos quadrados) e a remoção da forma (usando uma função polinomial de segunda ordem). Em seguida, um operador de Filtro Gaussiano Robusto (FGR) pode permitir a "separação" de rugosidade e ondulação, de acordo com as magnitudes dos comprimentos de onda (comprimento de corte em 0,08 mm).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como parte de um esforço deste grupo de pesquisa para investigar questões como a relação entre compactação e textura, uma mistura asfáltica para composição de pavimento aeroportuário foi executada em campo em 8 pistas experimentais em escala real, na Região Metropolitana de Fortaleza-CE. No processo construtivo, foram aplicados 8 diferentes métodos de compactação, avaliados originalmente apenas segundo alguns de seus impactos na formação da textura e de parâmetros do esqueleto mineral (Araujo, 2017). Para o projeto da mistura asfáltica, foram selecionados Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) de penetração 50/70 (1/100 mm) e agregados graníticos, nas frações de Tamanho Máximo Nominal (TMN) 1", 3/4", 1/2", além de pó de pedra. Ensaios normatizados foram realizados para caracterizar os agregados (granulometria; abrasão de Los Angeles; densidade de agregados graúdos e miúdos; adesividade, equivalente de areia), além da caracterização de suas propriedades de forma a partir do uso do AIMS2. O CA executado nos trechos foi dosado a partir do método Marshall, com granulometria enquadrada na Faixa 2 (Figura 2) e demais parâmetros dentro dos limites propostos na Especificação Geral DIRENG 04.05.610/02 (4,7% de CAP e 3,6% de Vv) de projeto de revestimentos aeroportuários. A Tabela 1 apresenta os diferentes procedimentos de compactação adotados na construção (Figura 3) e os resultados de textura obtidos após a execução. Para macrotextura, aplicou-se o ensaio de Mancha de Areia (MA) (ASTM E965, 2015), e para avaliação indireta de microtextura aplicou-se o ensaio de Pêndulo Britânico (PB) (ASTM E303, 2018).

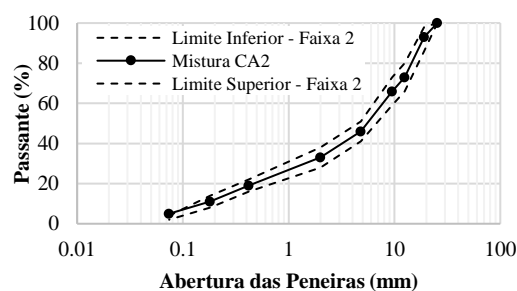


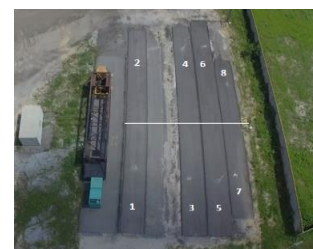
Figura 2: Granulometria da mistura em estudo



(a) Vibroacabadora e rolo de pneus



(b) Rolo duplo tandem



(c) Vista superior

Figura 3: Execução em campo dos trechos em estudo

**Tabela 1:** Resumo de compactação e resultados de textura (Araujo *et al.*, 2020)

Trecho	Número de Passadas		GC (%)	Altura de MA (mm)	Classificação – Macrotextura (Aps, 2006)	PB (BPN)	Classificação – Microtextura (Aps, 2006)
	Rolo de Pneus	Rolo Tandem					
1	8	4	97,3	0,35	Fina	68	Rugosa
2	8	-	96,1	0,84	Medianamente Grossa	73	Rugosa
3	4	2	95,1	0,38	Fina	76	Muito Rugosa
4	4	-	96,0	0,90	Medianamente Grossa	79	Muito Rugosa
5	-	4	95,0	0,35	Fina	85	Muito Rugosa
6	-	2	92,4	0,48	Medianamente Fina	76	Muito Rugosa
7	-	2*	90,0	0,45	Medianamente Fina	84	Muito Rugosa
8	-	1*	87,7	0,47	Medianamente Fina	77	Muito Rugosa

\*Sem vibração do rolo tandem.

De cada trecho, foi extraído um CP para a avaliação da estrutura interna das misturas asfálticas na direção vertical. Essa avaliação foi realizada a partir do uso do *software* iPas2 (Coenen, Kutay e Bahia, 2011; Sefidmazgi, 2011). Nele, imagens escaneadas da região interna de um CP serrado são capturadas para, a partir dos valores de *pixels* da estrutura interna do CP, identificar: (i) número de pontos de contato entre agregados, (ii) comprimento dos contatos e (iii) orientação dos agregados em misturas asfálticas. Além disso, obtém-se a segregação (radial e vertical), que se refere à quantidade de agregados por tamanho de partículas em regiões diferentes. Os resultados referentes à análise do esqueleto mineral de 4 seções transversais cortadas no sentido vertical foram expostos inicialmente no estudo conduzido por Araujo (2017) e aprofundados em Araujo *et al.* (2020). Cabe mencionar que os CPs extraídos do trecho 8, em função do seu baixo GC não suportaram o processo de serragem, sendo a análise de estrutura interna aqui apresentada limitada aos trechos 1 a 7.

Na sequência, de cada trecho, mais 3 CPs foram extraídos para a análise de textura no AIMS2. Para essa análise, regularizou-se a base dos CPs extraídos em uma espessura de 20 mm. Além dos CPs extraídos, 8 modelos tridimensionais da superfície de cada trecho foram produzidos a partir da técnica de FPA. Resultados referentes à análise de textura dos trechos experimentais em escala real foram mostrados numa série de estudos deste grupo de pesquisa: Araujo (2017), Maia e Castelo Branco (2019) e Araujo *et al.* (2020). Dos mesmos CPs regularizados para a análise no AIMS2, foram realizados adaptados de permeabilidade (Ferreira, 2015; Ferreira *et al.*, 2019). O método de ensaio em questão é uma adaptação de normas para a determinação do  $k$  (m/s) de solos argilosos a carga variável (NBR 14545, 2000; ASTM 5084 – 03, 2003).

Para cada CP analisado com o uso do AIMS2, calculou-se a profundidade média de macrotextura (MTD, do inglês, *Mean Texture Depth*) de 2 perfis perpendiculares de resolução 0,30 mm. O valor de MTD foi calculado a partir da relação  $MTD = 0,2 + 0,8 \times MPD$  (*Mean Profile Depth*, média dos dois picos de cada meio-perfil bidimensional). Os modelos tridimensionais foram gerados com a utilização de uma câmera semiprofissional em condições de luminosidade natural. Garantiu-se o mínimo de 20 fotos subsequentes da superfície-alvo para a geração do modelo tridimensional a partir do *software Recap Photo* (Autodesk). A nuvem de pontos gerada na malha tridimensional foi analisada quanto à média de MTD de perfis capturados a cada 10 mm a partir de um código próprio (MATLAB). Dentre outras análises que compuseram um extenso banco de dados, optou-se por expor neste artigo também uma análise da isotropia da textura da superfície obtida a partir do pacote computacional *MountainsMap*. Nele, realiza-se uma análise de isotropia a partir dos operadores de uma transformada de Fourier. Como resultado, as direções de textura dominantes em um plano cartesiano são mostradas. Quanto mais próximo de 100% o resultado, maior a isotropia. Neste

trabalho, as diferentes soluções de compactação empregadas foram avaliadas quanto à isotropia a partir da análise de modelos tridimensionais em 3 grupos: (i) modelo nivelado (e removido de forma natural); (ii) modelo de ondulação a partir da aplicação de filtro Gaussiano robusto; (iii) modelo de rugosidade a partir da aplicação de filtro Gaussiano robusto.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1. Considerações sobre a influência da compactação na formação da estrutura interna (esqueleto mineral)

A partir dos dados analisados originalmente por Araujo *et al.* (2020), uma avaliação estatística robusta, a partir da análise de variância (ANOVA), permite a afirmação de que os métodos de compactação aplicados, em termos da variação de GC (%) e dos tipos e do número de passadas de rolos compactadores, não promovem uma mudança estatisticamente significativa dos parâmetros “número de contatos (1/100cm<sup>2</sup>)”, “comprimento dos contatos (mm/100cm<sup>2</sup>)”, além de “orientação de contatos e agregados”. Na Tabela 2, pode-se verificar que, para todos os parâmetros, o *p*-valor da ANOVA relativa ao fator *Trecho* apresenta valor superior a 0,05; indício de que não se pode rejeitar a hipótese de igualdade entre os parâmetros de esqueleto mineral dos diferentes trechos compactados. A análise par-a-par por meio do teste de Tukey (matriz de *p*-valores da Tabela 2) também leva à conclusão de que os parâmetros de esqueleto mineral são iguais entre todos os trechos experimentais. Entretanto, convém mencionar que, segundo Araujo *et al.* (2020), quando apenas as misturas finalizadas com a passagem do rolo tandem são avaliadas, as correlações obtidas entre GC e o número de contatos ( $R^2 = 0,75$ ) e entre GC e o comprimento dos contatos ( $R^2 = 0,58$ ) são de razoáveis a boas (Witczak *et al.*, 2002).

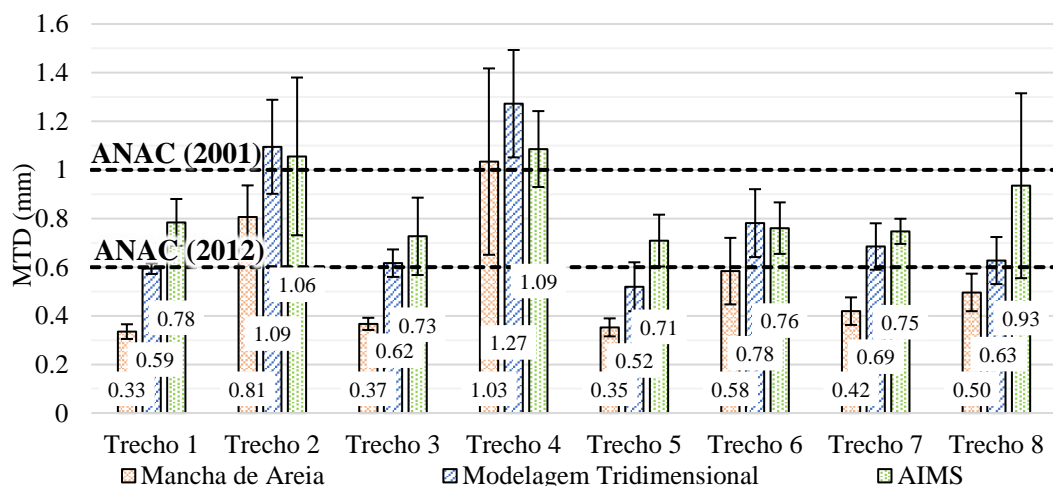
**Tabela 2:** Análise estatística (ANOVA) para avaliação do esqueleto mineral

	<b>p-valor = 0,09</b>	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7
<b>Número de contatos</b>	Trecho 1	-						
	Trecho 2	0,83	-					
	Trecho 3	1,00	0,91	-				
	Trecho 4	0,83	0,16	0,73	-			
	Trecho 5	0,98	0,35	0,94	1,00	-		
	Trecho 6	0,90	0,21	0,82	1,00	1,00	-	
	Trecho 7	0,73	0,11	0,61	1,00	0,99	1,00	-
	<b>p-valor = 0,39</b>	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7
<b>Comprimento dos Contatos</b>	Trecho 1	-						
	Trecho 2	0,93	-					
	Trecho 3	0,98	1,00	-				
	Trecho 4	1,00	0,78	0,91	-			
	Trecho 5	1,00	0,97	1,00	1,00	-		
	Trecho 6	1,00	0,62	0,79	1,00	0,98	-	
	Trecho 7	0,95	0,40	0,57	0,99	0,89	1,00	-
	<b>p-valor = 0,33</b>	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7
<b>Orientação dos Agregados</b>	Trecho 1	-						
	Trecho 2	0,50	-					
	Trecho 3	0,23	1,00	-				
	Trecho 4	0,50	1,00	1,00	-			
	Trecho 5	0,88	0,99	0,88	0,99	-		
	Trecho 6	0,94	0,97	0,80	0,97	1,00	-	
	Trecho 7	0,71	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	-
	<b>p-valor = 0,43</b>	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4	Trecho 5	Trecho 6	Trecho 7
<b>Orientação dos Contatos</b>	Trecho 1	-						
	Trecho 2	0,85	-					
	Trecho 3	1,00	0,97	-				
	Trecho 4	0,99	1,00	1,00	-			
	Trecho 5	1,00	0,60	0,98	0,88	-		
	Trecho 6	0,73	1,00	0,91	0,99	0,46	-	
	Trecho 7	1,00	0,93	1,00	1,00	0,99	0,85	-

Entende-se, portanto, que parâmetros de desempenho da mistura asfáltica em campo que sejam dependentes de sua estrutura interna (esqueleto pétreo/mineral), como a deformação permanente (Ferreira *et al.*, 2016), tenham mais influência de questões como granulometria e propriedades de forma dos agregados (mantidas constantes nos 8 trechos). Esse entendimento vai ao encontro do proposto por Bastos (2016), que relacionou a resistência à deformação permanente obtida pelo *Flow Number* (FN) com parâmetros como a forma 2D e a proporção de agregados graúdos. Apesar dessa percepção, Araujo (2017) salienta a ocorrência de uma correlação positiva entre aumento de GC (%) e número de contatos agregado-agregado para trechos finalizados com o mesmo tipo de rolo compactador (rolo duplo tandem).

#### 4.2. Considerações sobre a influência da compactação na textura superficial

Ao longo dos últimos anos, questões de textura e atrito relacionadas aos trechos experimentais em estudo foram avaliadas por meio de diferentes técnicas e métodos, incluindo meios tradicionais (MA e PB), além da aplicação do AIMS2 e da FPA. Em todos os casos, há uma convergência em relação à ideia de que se existe uma tendência de maior macrotextura (MTD) nos trechos onde não é aplicado o acabamento da compactação com o rolo duplo tandem (trechos 2 e 4), conforme mostrado na Figura 4. Ainda assim, também é possível notar que, nos trechos de GC reduzido (6, 7 e 8), o MTD médio medido por meio das técnicas de PDI se aproxima do valor mínimo de MTD exigido atualmente em regulamento brasileiro (0,60 mm), por meio da Resolução 236/12 da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Na década de 2000, o valor mínimo de MTD exigido pela ANAC era de 1,0 mm (IAC 4302/01), magnitude de macrotextura para a qual os protocolos de compactação a serem aplicados devem ser extensivamente pensados, dada a dificuldade em se atingir esse valor em campo a partir de misturas asfálticas densas, conforme consta em Hall *et al.* (2009), que refere aos limites de 0,60 mm e 1,20 mm para macrotextura de misturas densas de predominância de frações miúdas e graúdas, respectivamente.



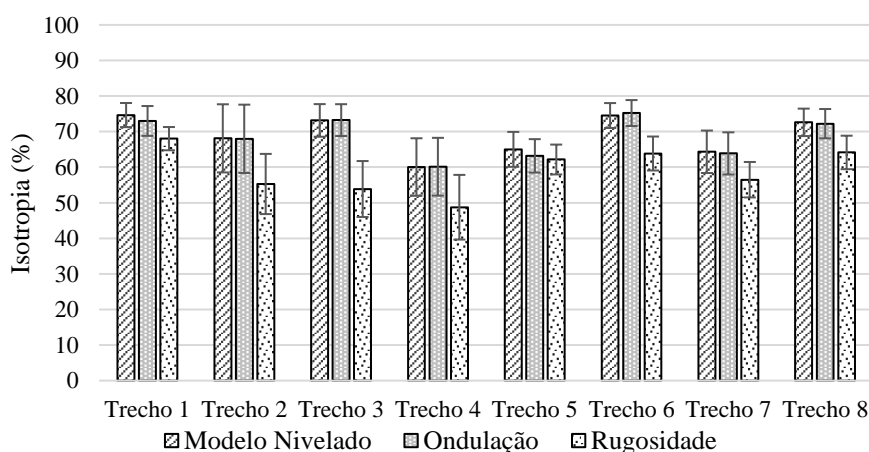
**Figura 4:** Macrotextura dos trechos experimentais (pós-construção)

Embora a redução do GC possa se apresentar como uma alternativa para o cumprimento de valores mínimos de macrotextura, esses trechos podem apresentar valores de permeabilidade acima do limite de  $1,25E-05$  m/s (conforme exposto no item 4.3) deste trabalho). Uma percepção geral deste grupo de pesquisa ao longo dos últimos anos tem sido a capacidade de os métodos de PDI que avaliam diretamente os perfis bidimensionais ou as estruturas tridimensionais de superfícies de misturas asfálticas resultarem, de maneira geral, em maiores

valores de MTD, se comparados à técnica da MA (amplamente difundida no meio técnico). Esse fato se dá por uma mais precisa captura dos picos das superfícies. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que os picos avaliados em um perfil podem não representar satisfatoriamente a realidade de uma área consideravelmente maior. Dessa forma, conforme tem sido objetivo dos estudos mais recentes mostrados na literatura mundial, há uma convergência pela preferência de análise de parâmetros tridimensionais (*Aeral Parameters*).

Quanto à microtextura, resultados obtidos em diferentes trabalhos deste grupo de pesquisa (Maia e Castelo Branco, 2019; Araujo *et al.*, 2020) sugerem que essa propriedade se relaciona diretamente com a textura superficial dos agregados existentes na matriz pétreo. Entretanto, observou-se que a análise de microtextura executada no AIMS2 é capaz de capturar diferenças sutis em termos de microtextura. Uma vez que se parte da premissa que granulometria e propriedades de forma dos agregados são iguais para os 8 trechos estudados, poder-se-ia imaginar que as microtexturas de todos os trechos seriam estatisticamente semelhantes entre si. Entretanto, a aplicação do método das *wavelets* avaliada a partir de testes pareados de Tukey mostra que existem diferenças estatisticamente significativas ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) entre determinados trechos, por mais que eles sejam porventura classificados de forma igual.

No que se refere à isotropia (Figura 5), não foram encontradas correlações relevantes entre GC (%) e uma direção dominante de textura. Esse resultado indica que, por mais que o sentido de compactação seja único, as propriedades intrínsecas dos materiais que compõem as misturas asfálticas tendem a favorecer uma isotropia acima de 50% em termos de textura superficial. Ainda assim, observou-se menor isotropia para o trecho sem passagem de rolo tandem com menor GC (trecho 4). Observou-se que os modelos 3D menos isotrópicos são os modelos de rugosidade (obtidos através da aplicação de filtro Gaussiano robusto), entretanto não obtém uma conclusão confiável acerca da relação isotropia de textura e orientação de contatos e agregados na estrutura interna, uma vez que esses valores tendem a apresentar valores próximos em média e de elevado CV.



**Figura 5:** Análise de isotropia

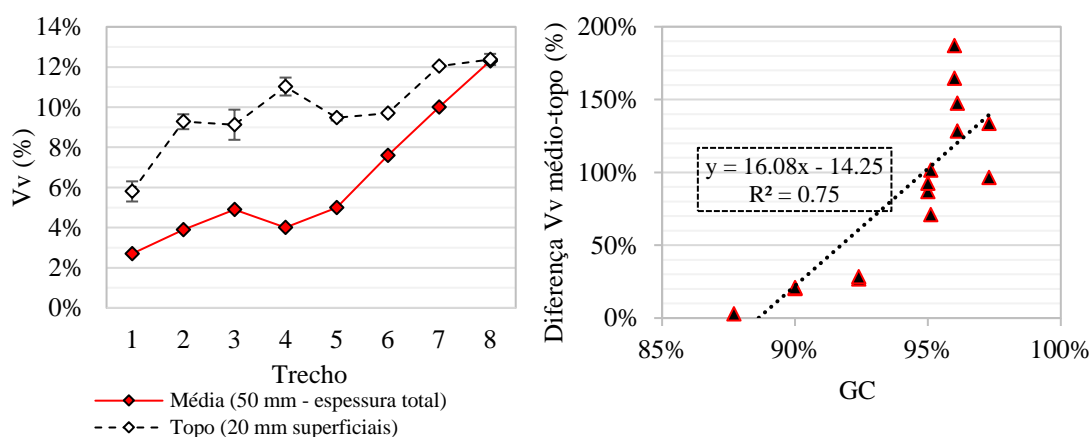
#### 4.3. Considerações sobre a influência da compactação na distribuição de vazios e na permeabilidade

Na execução das misturas asfálticas, realiza-se um controle de compactação por meio de GC (%) e Vv (%). Entretanto, existem diferenças entre o Vv médio da camada em sua total espessura e o Vv obtido para os 20 mm superiores (camada mais superficial) (Figura 6, a). Esta

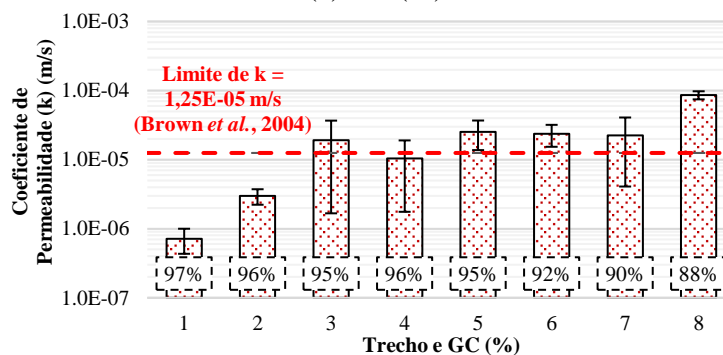


tendência vai de encontro à percepção de que, para camadas de concreto asfáltico de aproximadamente 50 mm, o  $V_v$  na camada intermediária é menor do que no topo e na base de CPs obtidos de campo (Castelblanco, 2004; Nascimento *et al.*, 2006; Ferreira *et al.*, 2019). Sugere-se, assim, que, em camadas de espessura ao redor de 5 cm, existe um potencial de absorção de água por parte da estrutura, porém, ao atingir uma profundidade intermediária, a umidade pode ficar confinada, potencializando efeitos deletérios.

Quanto ao coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) da camada superficial de CA (20 mm), a Figura 6 (b) mostra que apenas os trechos 1, 2 e 4 apresentaram um valor médio de  $k$  abaixo do máximo sugerido de  $k = 1,25E-05$  m/s (Brown *et al.*, 2004). Nesses trechos, observa-se um GC superior a 96%, mesmo com diferenças em número de passadas e tipos de rolos compactadores utilizados. O aumento de passadas do rolo de pneus (trechos 2 e 4) favorece à redução da permeabilidade superficial, sem comprometer a textura. O trecho 8 apresentou o maior valor de  $k$ , atingindo aproximadamente  $1,0E-04$  m/s, sugerindo que o processo de compactação (baixo CD de 87,7% e apenas 1 passagem do rolo tandem sem vibração) pode ter levado a uma distribuição de vazios dentro da camada que impacta negativamente no potencial de dano por umidade, uma vez que a água pode facilmente se infiltrar e ficar confinada dentro da camada. Cabe mencionar que, para tal espessura (20 mm), os resultados de  $k$  não podem ser considerados tão confiáveis, em função do impacto da serragem em uma espessura reduzida, assim como da falha na captura da escala de tamanho da mistura asfáltica, uma vez que o Tamanho Máximo Nominal (TMN) do agregado é semelhante à espessura avaliada.



(a)  $V_v$  (%)



(b)  $k$  (m/s)

**Figura 6:** Distribuição de  $V_v$  (a) e permeabilidade média (b) dos trechos experimentais

Devido a questões de planejamento de matriz experimental, as análises de permeabilidade dos CPs extraídos se limitaram aos 20 mm do topo, uma vez que essa é a espessura indicada para a análise de textura de CPs com o uso do AIMS2, não sendo indicada a realização de múltiplas serragens desse material. Dentre os diferentes parâmetros avaliados neste trabalho, a permeabilidade, de fato, tende a ser melhor explicada a partir da variação exponencial do Vv ( $R^2$  entre 0,6 e 0,7), mostrada na Figura 7. Conforme esperado, o maior valor de  $R^2$  foi obtido para a relação entre  $k$  e o Vv da camada superficial de espessura 20 mm. Ambos valores de  $R^2$  não são maiores em função do fato de que a conexão entre vazios e os seus respectivos tamanhos também influenciam no valor de  $k$ , não apenas o seu percentual (Vv) (Caro *et al.*, 2008). A média de permeabilidade da camada superficial de cada trecho também apresenta correlação razoável (Witczak *et al.*, 2002) com GC (independente do processo aplicado de números de passadas de cada equipamento).

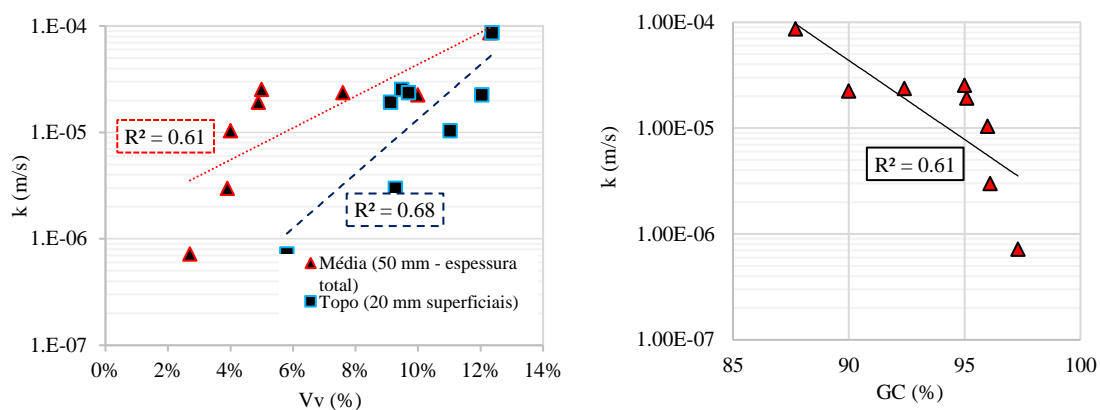


Figura 7: Relações  $k$ -Vv e  $k$ -GC

Partindo-se da premissa de que a análise do esqueleto mineral da mistura asfáltica dos trechos experimentais poderia fornecer algum indicativo dos outros fatores de influência em  $k$  (especialmente a conexão entre vazios), o parâmetro “número de contatos entre agregados minerais” apresentou o maior  $R^2$  (em torno de 0,4), porém tal valor é apenas regular (segundo classificação subjetiva proposta por Witczak *et al.*, 2002). Não há indícios de influência de comprimento de contatos, orientação de contatos e orientação de agregados em  $k$  (valores de  $R^2$  inferiores a 0,2).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo construtivo de misturas asfálticas pressupõe diversos desafios, especialmente no que tange ao equilíbrio entre propriedades volumétricas, mecânicas e funcionais. No meio aeroportuário, especificamente, esse desafio é potencializado em função de normas mais restritivas de cumprimento de requisitos mínimos de condição de textura superficial. No caso da macrotextura, por exemplo, a ANAC (2012) exige um valor mínimo de MTD de 0,60 mm. Surgem, portanto, por parte do meio técnico, diversas tentativas de cumprimento desse requisito a partir da manipulação do processo construtivo a partir da compactação em campo. Entretanto, tais modificações podem impactar em outros aspectos do desempenho da mistura, especialmente a resistência mecânica e a permeabilidade, esta última diretamente ligada ao potencial de dano por umidade.

Dessa forma, os avanços que surgem para melhor entendimento das inter-relações entre essas diferentes características de misturas de CA são de extrema valia para o meio técnico. Tem sido

um assunto recorrente de estudos deste grupo de pesquisa a avaliação dos processos de compactação objetivando orientar para maior eficiência do processo construtivo de misturas asfálticas aeroportuárias. Este trabalho, portanto, cumpre com o objetivo de traçar relações entre ideias e resultados que foram obtidos ao longo dos últimos anos. Para tanto, foram realizados estudos em trechos experimentais em escala real, construídos a partir de uma mistura aeroportuária típica. Os aspectos de estrutura interna e textura foram avaliados segundo técnicas de PDI e a permeabilidade da face superior das misturas foi medida a partir de um procedimento adaptado. Verificou-se que o fator compactação não foi estatisticamente significativo para a definição de parâmetros do esqueleto mineral da referida mistura. Por outro lado, verificou-se uma relação mais clara entre o processo de compactação e a macrotextura dos diferentes trechos. Além disso, verificou-se também que o aumento do GC torna mais expressivas as diferenças entre os Vv do topo da camada e os da camada intermediária de CA, entretanto, para GC superiores a 96% (independente dos equipamentos usados), verifica-se o cumprimento do valor máximo ideal de permeabilidade. Espera-se que tais relações possam melhor orientar o processo decisório de definição do protocolo de compactação a ser realizado em campo.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq pelo auxílio financeiro fornecido. Agradecemos também à Insttate Engenharia pela construção das pistas de teste em escala real.

#### REFERÊNCIAS

- Araujo, V. M. C.; Bessa, I. S.; Castelo Branco, V. T. F. (2015) Measuring Skid Resistance of Hot Mix Asphalt Using the Aggregate Image Measurement System (AIMS). *Construction and Building Materials*, n.98, pp.476–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.117>.
- Araujo, V. M. C. (2017) Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas em face à Compactação para uso em Revestimentos Aeroportuários a partir do uso do Processamento Digital de Imagens. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.
- Araujo, V. M. C.; Maia, R. S.; Castelo Branco, V. T. F.; Maia, A. O.; Rodrigues, C. B. (2020) Avaliação das Relações entre Propriedades de Forma de Agregados, Compactação, Parâmetros do Esqueleto Mineral e Textura de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI). *Revista Transportes (Rio de Janeiro)*. Aceito para publicação em março de 2019.
- Bastos, J. B. (2016) Considerações sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.
- Brown, E. R.; Hainin, M. R.; Cooley, A.; Hurley, G. (2004) NCHRP - National Cooperative Highway Research Program (TRB): Relationship of Air Voids, Lift Thickness, and Permeability in Hot Mix Asphalt Pavements. Report 531.
- Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D. N. (2008) Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures - Part 1: Mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.9, n.2, pp.81–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430701792128>.
- Casey, T.; McGowan, R.; Millar, P.; Woodward, D. (2018) Enveloping of Hot Rolled Asphalt Macrotexture Using 3-D Modeling. In: Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington-DC, EUA.
- Castelblanco, A. T. (2004). Probabilistic analysis of air void structure and its relationship to permeability and moisture damage of hot mix asphalt (Dissertation Thesis). Texas A&M University.
- Chen, J.; Huang X.; Zheng, B.; Zhao, R.; Liu, X.; Cao, Q.; Zhu, S. (2019) Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry. *Construction and Building Materials*, Vol. 26, P. 910-919, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.321>.
- Coenen, A.; Kutay, M. E.; Bahia, H. U. (2012) Aggregate Structure Characterization of Asphalt Mixtures Using 2-Dimensional Image Analysis. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3), p. 433-454. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.711923>
- Ferreira, W. L. G. (2015) Análise do fluxo d'água em revestimentos asfálticos com diferentes permeabilidades. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.
- Ferreira, J. L. S.; Soares, J. B. E Bastos, J. S. (2016) Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. *Revista Transportes (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2. p. 46-52, 2016. DOI:10.4237/transportes.v24i2.1129.

- Ferreira, W.L.G.; Castelo Branco, V.T.F.; Caro, S.; Vasconcelos, K. (2019) Analysis of water flow in an asphalt pavement surface layer with different thicknesses and different permeability coefficients. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1617186>.
- Hall, J. W.; Smith, K. L.; Titus-Glover, L.; Wambold, J. C.; Tager, T.J.; Rado, Z. (2009) Guide for Pavement Friction, NCHRP Web-Only Document 108. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington-DC, USA.
- Hartley, R. I.; Sturm, P. (1997) Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 68, n.2, pp.146–157. DOI: <https://doi.org/10.1006/cviu.1997.0547>.
- Kogbara, R. B.; Masad, E. A.; Kassem, E.; Scarpas, A.; Anupam, K. (2016) A State-of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, n.114, pp.602-617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>.
- Kogbara, R. B.; Masad, E. A.; Woodward D.; Millar, P. (2018) Relating surface texture parameters from close-range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. *Construction and Building Materials*, n.166, pp.227-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102>.
- Maia, R. S.; Castelo Branco, V. T. F. (2019) Consideração da Textura Superficial avaliada a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI) na seleção de Agregados Minerais para uso em revestimentos asfálticos. In: 33º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET), Balneário Camboriú-SC.
- Masad, E.A.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T. (1999) Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13(2), p.88-95. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1999\)13:2\(88\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:2(88)).
- Masad, E. A. (2005) Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1. College Station-TX, USA.
- Masad, E.; Castelblanco, A.; Birgisson, B. (2006) Effects of Air Void Size Distribution, Pore Pressure, and Bond Energy on Moisture Damage. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 34, n.01. DOI: 10.1520/JTE13112.
- McQuaid, G.; Millar, P.; Woodward, D. (2014). A Comparison of Techniques to Determine Surface Texture Data. In Civil Engineering Research in Ireland Conference, Belfast, Ireland.
- Medeiros, M. S.; Underwood, B. S.; Castorena, C.; Rupnow, T.; Rawls, M. (2016) 3D Measurement of Pavement Macrotecture Using Digital Stereoscopic Vision. In: Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Washington-DC, EUA.
- Nascimento, L., Leite, L., Campos, E., Marques, G., & Motta, L. (2006). Uso da tomografia computadorizada e de imagens digitais para estudo de misturas asfálticas. 18º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro-RJ.
- Rezaei, A., Hoyt, D., Martin, A. E. (2011) Simple Laboratory Method for Measuring Pavement Macrotecture. *Transportation Research Record*, Vol. 2227, pp.146-152. DOI: <https://doi.org/10.3141/2227-16>.
- Ribas, C. R. (2016) Avaliação da Influência do Método de Compactação na Macroestrutura de Misturas Asfálticas Densas Utilizando o Processamento Digital de Imagens. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Sefidmazgi, N. R. (2011) Defining Effective Aggregate Skeleton in Asphalt Mixture Using Digital Imaging. Dissertação de Mestrado, University of Wisconsin, Madison-WI, EUA.
- Tiggs, B.; Mclauchlan, P.; Hartley R.; Fitzgibbon, A. (2000) Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In: International Workshop on Vision Algorithms, Corfu, Greece. Springer-Verlag.
- Witzak, M. W.; Kaloush, K.; Pellinen, T.; El-Basyouny, M.; Von Quintus, H. (2002) NCHRP – Report 465: Simple performance test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board, Washington-DC, EUA.

---

Renan Santo Maia ([renanmaia@det.ufc.br](mailto:renanmaia@det.ufc.br))

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco ([veronica@det.ufsc.br](mailto:veronica@det.ufsc.br))

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Departamento de Engenharia de Transportes (DET), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC)  
Campus do Pici, s/n – Bloco 703 – CEP: 60440-554 – Fortaleza, Ceará, Brasil