

Montagem e validação de um banco de dados climáticos para fins de avaliação do efeito da temperatura no desempenho de pavimentos flexíveis

Climatic database assembling and testing for the assessment of the temperature effect in flexible pavement performance

Lélio Antonio Teixeira Brito(1); Lucas Fraporti Heller(2)

1 Engenheiro Civil pela UFRGS (2003). Mestre em Geotecnia pela UFRGS (2006). PhD em Engenharia pela University of Nottingham (2011). Professor Associado da PUCRS.

E-mail: lelio.brito@pucrs.br

2 Engenheiro Civil pela PUCRS (2016). Mestrando em Construção e Infraestrutura pela UFRGS.

E-mail: heller.lucas@gmail.com

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 4, n. 1, p. 3-18, Jan.-Jun. 2017 - ISSN 2358-6508

DOI: <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v4n1p3-18>

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Há um limitado número de bases de dados climáticos históricos para estações brasileiras disponíveis para a modelagem do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis; nenhum que contemple todos os parâmetros necessários para o uso com modelos de previsão de desempenho destes materiais. O objetivo deste trabalho foi o de compilar um banco de dados climáticos para uso com o método de dimensionamento da AASHTO – um dos mais completos pacotes de dimensionamento mecânicos para pavimentos flexíveis da atualidade. O método necessita de longas séries históricas com parâmetros específicos para a projeção do clima ao longo da vida de serviço dos pavimentos dimensionados. Para tanto, foi criado um arquivo HCD (*hourly climatic data*) para as cidades de Porto Alegre, Brasília, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, possibilitando a utilização do software da AASHTO – *Pavement ME Design*. O arquivo HCD foi montado com dados disponibilizados pelo INMET. Após a compilação dos dados, foram determinados os parâmetros adicionais necessários como incidência de luz nos pavimentos e realizado as consistências necessárias para que não houvesse séries incompletas. Os resultados das análises mostram que os resultados para Porto Alegre foram coerentes e com significativas diferenças para as estações norte-americanas que podem ser usadas na falta de dados locais (Miami e Savannah). Após as análises de consistência foi realizada uma análise de sensibilidade com variação de $\pm 5\%$ da temperatura média, para avaliação do desempenho dos pavimentos frente a variação de temperatura. Os resultados demonstraram que um aumento de 5% na temperatura média é capaz de aumentar em até 12% o afundamento de trilha de rodas nas cidades testadas.

Palavras-chave: AASHTOWare *Pavement ME Design*. Pavimentos flexíveis. Banco de dados climáticos.

Abstract

There is a limited number of historic climatic data bases available for Brazilian weather stations available for flexible pavement mechanical behavior modelling, which do not contain the required parameters for the prediction of pavement performance through the modeling. The main goal of this work was to compile a climatic data base for use with AASHTO newest pavement design guide – one of the most complete, customizable and up-to-date packages for a mechanistic design of flexible pavement. The method requires long historic series with specific parameters for the long term climatic determination throughout the pavement life service. To accomplish this work, HCD (*hourly climatic data*) files were compiled for the cities of Porto Alegre, Brasília, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, enabling the use of AASHTO newest software, *Pavement ME Design*. The HCD file was assembled with data supplied by the National Meteorological Institute – INMET. Upon gathering of datasets, the additional required parameters were calculated, such as sunshine, and the necessary consistency checks were performed in order to assure fully complete series. The results of the simulations for the city of Porto Alegre in the software were consistent and with some significant variation when compared to US climatic weather stations typically used in the absence of local compiled data (Miami and Savannah). After the consistency tests, a sensibility analysis was carried out with variation of $\pm 5\%$ of the mean temperature to assess the pavement performance variation due to temperature change. Results showed that an increase of 5% in temperature can account for up to 12% higher permanent deformation in the surface of the asphalt pavements for the tested locations.

Keywords: AASHTOWare *Pavement ME Design*. Flexible Pavement. Climatic Database.

1 Introdução

Dados climáticos são parte importante nos programas atuais de dimensionamento de pavimentos como o norte-americano *AASHTOWare Pavement ME Design*, o qual consegue compilar uma grande quantidade de dados históricos capaz de abastecer as análises das camadas da estrutura do pavimento. Métodos antigos como o do DNER (SOUZA, 1981) não levavam em consideração o clima do local – a exceção do chamado fator regional, que por recomendação do próprio DNER deve ser adotado como valor unitário.

No Brasil, os estudos feitos com esse software (BRITO; SPECHT, 2014; FERNANDES *et al.*, 2016) ainda são realizados com base nos bancos de dados de temperatura norte-americanas. Isto leva a uma defasagem entre os dias frios e quentes que, associado à sazonalidade dos veículos na frota, dificulta adequada avaliação do comportamento modelado, ainda que atenuados com a defasagem entre as estações simuladas nos dados de entrada. Mais importante é o fato da singularidade das características de cada cidade quanto aos parâmetros climáticos. Por mais próximo que se busquem cidades norte-americanas de clima semelhante, não há, evidentemente, qualquer equivalência direta com as cidades brasileiras.

O presente estudo propôs, portanto, que sejam montados bancos de dados climáticos para as cidades de Porto Alegre, Brasília, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, que sejam completos o suficiente para permitir uma modelagem do pavimento nas condições climáticas locais de forma a permitir uma avaliação do efeito da temperatura no comportamento de pavimentos flexíveis. Futuramente, espera-se que tais dados permitam análises adicionais sobre o efeito das ilhas de calor em estudos mais avançados sobre o incremento de temperatura em áreas urbanas devido à pavimentação. A escolha destas cidades é para uma melhor representatividade dos grandes centros urbanos brasileiros.

Buscou-se ainda verificar os dados climáticos necessários à modelagem do comportamento mecânico dos pavimentos flexíveis e compilar os referidos dados para as cinco cidades brasileiras propostas em séries históricas de pelo menos quatro anos. Foi possível, com isto, gerar um arquivo tipo HCD para cada capital de maneira a possibilitar o uso no software *AASHTOWare Pavement ME Design* e disponibilizá-lo de forma online para outros pesquisadores, gerando também uma metodologia de obtenção para outras cidades brasileiras. Por fim, foram feitas análises no software *AASHTOWare Pavement ME Design* que avaliem o desempenho de pavimento urbanos frente a variações climáticas de $\pm 5\%$ da temperatura média; isto possibilita o balizamento da variação de desempenho de pavimentos asfálticos quando sob ilhas de calor urbano, que tendem a oscilar as temperaturas dos pavimentos em até $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Comparando-se a variação de $+5^{\circ}$ até $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ poderá se evidenciar os parâmetros climáticos de maior relevância no comportamento mecânico dos pavimentos.

2 Parametros climáticos para projetos de pavimentos flexíveis

O Guia Mecânico-Empírico da AASHTO propôs uma nova ótica na modelagem de pavimentos, abandonando a abordagem essencialmente empírica para expressivo aumento da avaliação mecanicista, que sozinha não era capaz de prever com exatidão como pavimentos se comportariam na prática. Os programas criados a partir desse guia contam com diversas caracterizações complexas do volume de tráfego durante os períodos do ano, características mais avançadas dos materiais e a consideração do clima, fatores com impacto nos pavimentos que não são consideradas na antiga metodologia brasileira.

O fator de clima permite a construção de um pavimento mais adequado para cada região e é necessário a adequação do programa para utilização no Brasil. No seu guia para projetos, o *National Cooperative Highway Research Program*, NCHRP (2014), indica que os cinco parâmetros climáticos necessários para a utilização do método são os seguintes: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e incidência da luz solar. Esses dados são fornecidos pelas estações automáticas nos EUA e necessitam de um período de dados de pelo menos 24 meses.

A temperatura é responsável pela alteração do módulo de elasticidade dos pavimentos flexíveis de valores próximos a 700 MPa no verão, com temperaturas próximas aos 30 °C, para valores superiores a 20000 MPa no inverno, próximo de 0 °C, conforme NCHRP (2014). Elevados gradientes de temperatura e umidade são responsáveis pela perda de vida útil nos pavimentos rígidos, gerando deformações, afetando o contato da placa de concreto e a sub-base, que acabam fraturando. A umidade também altera os módulos das camadas, podendo demandar alteração da estrutura projetada conforme intervalo de umidade previsto. O programa então precisa dessas características para avaliar o ambiente e calcular o impacto em pavimentos implantados nessa região.

A temperatura do ar determina os ciclos de congelamento e descongelamento na região, quando existentes, e em conjunto com a incidência da luz solar elas entram nas equações de balanço de calor. A velocidade do vento é utilizada para o programa calcular os coeficientes de transferência de calor através da convecção nos pavimentos, que dependem da velocidade do vento. Utilizando essas três variáveis, em conjunto com os coeficientes térmicos dos pavimentos, o programa irá resolver as equações, determinando a temperatura dos pavimentos e o fluxo de calor entre as camadas.

A precipitação é utilizada na definição da infiltração, necessária para analisar impactos em pavimentos reabilitados e no processo de envelhecimento. O seu papel, conforme o NCHRP (2014), no balanço térmico não é completamente claro, por isso opta por não utilizar esse fator nas suas equações, já que tal balanço não é evidente e requer estudos mais aprofundados para sua consideração, sendo este um tema

ainda em aberto para pesquisas. A umidade relativa é utilizada para a determinação das umidades das camadas de pavimentos rígidos e no impacto as trincas iniciais e espaçamento entre elas.

Todos esses fatores são necessários no HCD do local a ser analisado, fornecidos de hora em hora. Através do arquivo HCD e com fornecimento de informações complementares da região, como profundidade do lençol freático, latitude e longitude, o programa irá fornecer um resultado apropriado para a localização do pavimento a ser modelado.

O balanceamento térmico ainda utiliza a radiação das ondas curtas e longas do local, obtidas através da posição geográfica, fornecida ao programa em forma de latitude e longitude, e quanto dessa radiação não chega ao solo ou é refletida em função da cobertura de nuvem ou composição do material.

3 Impacto da temperatura em projetos de pavimentos

Huang (2004) cita que os efeitos da temperatura atingem os pavimentos, afetando a camada de concreto asfáltico, as placas de concreto Portland ou ambos os tipos de pavimentos. Os problemas gerados pelos ciclos de congelamento e descongelamento que ocorrem em regiões com invernos rigorosos, também são considerados, onde o gelo formado durante o inverno liquida durante a primavera, saturando os materiais da sub-base, enfraquecendo-a.

Nos pavimentos flexíveis, especificamente, Huang (2004) considera a alteração do módulo de elasticidade com a variação da temperatura. Menores temperaturas tornam o pavimento mais rígido, o que pode diminuir a vida útil de fadiga da mistura asfáltica. Regiões com altas variações de temperatura durante o dia geram esforços nos pavimentos, gerando fadiga e desgastando os mesmos.

Pomerantz *et al.* (2000) realizaram experimento em pavimentos flexíveis com diferentes temperaturas para testar a resistência a deformação na trilha de rodas. Com uma diferença de 11 °C, diminuindo de 53 °C para 42 °C, os resultados indicaram que o pavimento na temperatura menor poderia resistir mais de 10 vezes, atingindo 270 mil repetições contra apenas 20 mil repetições do pavimento mais quente.

O mesmo estudo de Pomerantz *et al.* (2000) também constatou que a temperatura causa um efeito de envelhecimento acelerado nos pavimentos, uma fragilização maior ocorre com uma temperatura maior, devido ao aumento da viscosidade e enrijecimento de pavimentos flexíveis ao longo do tempo, colaborando para rachaduras. O efeito não é linear com o aumento da temperatura. Uma camada reflexiva poderia diminuir essa temperatura e ainda reduzir os danos causados por luzes ultravioletas.

O programa *AASHTOWare Pavement ME Design*, conforme explicado no guia de projeto da NCHRP (2014), em seus critérios de desempenho utiliza três principais

critérios, com subdivisões. Rachaduras térmicas, trincas por fadiga e deformação permanente na trilha de roda. Os fatores climáticos influem também em cada um desses métodos.

A deformação permanente é influenciada pela temperatura, afetando a rigidez do asfalto e conseqüentemente o módulo de elasticidade da mistura de concreto asfáltico, necessitando que seja levado em conta em função do tempo e profundidade do pavimento. O afundamento da trilha de rodas ainda tem a consideração da umidade do solo. Uma mudança de valor da umidade diminui o módulo de resiliência de um solo granular, aumentando a deformação elástica, quando mantidas as demais condições, e causando uma maior trilha de rodas.

As rachaduras térmicas necessitam do perfil de temperatura ao longo da profundidade, para definição da temperatura durante a vida útil do pavimento utilizado, permitindo a análise dos esforços térmicos.

As trincas de fadiga são divididas na análise final em trincas longitudinais ou fissuração superficial, estilo “couro de jacaré”. Do mesmo modo que as deformações permanentes, a variação da temperatura sobre a rigidez do asfalto e a alteração da umidade das camadas granulares, alterando o módulo de resiliência impactam na formação desse modo de trinca. Um aumento da rigidez diminui os impactos de fadiga, tornando a temperatura em um fator importante para a determinação da fadiga.

4 Modelos de distribuição de temperatura em pavimentos

O guia mecânico-empírico (NCHRP, 2014) informa que a temperatura do ar não pode ser utilizada num modo direto para estimar a temperatura do pavimento, então apresenta um balanço térmico que é utilizado pelo seu *software*. A condição inicial de contorno na superfície do pavimento é encontrada através do balanço térmico, conforme a equação 1 abaixo.

$$Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0 \quad (1)$$

Onde,

Q_i = Radiação de ondas curtas incidentes.

Q_r = Radiação de ondas curtas refletidas.

Q_a = Radiação de ondas longas incidentes.

Q_e = Radiação de ondas longas emitidas.

Q_c = Transferência de calor por convecção.

Q_h = Efeitos da transpiração, condensação, evaporação e sublimação.

Q_g = Energia absorvida pela superfície.

As duas variáveis das ondas curtas podem ser representadas em conjunto, como Q_s que significa a rede de ondas curtas, diminuindo as ondas refletidas das ondas incidentes ($Q_i - Q_r$). O mesmo pode ser realizado para as ondas longas, com a variável

Ql, sendo a diferença entre as radiações recebidas e emitidas. Qs é calculada como segue abaixo. O restante da parametrização pode ser encontrado em (BRITO; HELLER, 2016).

$$Q_s = a_s R * \left[A + B \frac{S_c}{100} \right] \quad (2)$$

Onde,

a_s = Absorção da superfície do pavimento para ondas curtas.

R^* = Radiação extraterrestre incidente em uma superfície horizontal na atmosfera exterior. Depende da latitude e da declinação solar, sendo essa uma função da época do ano.

A,B = constantes para dispersão difusa e adsorção da atmosfera.

S_c = Porcentagem de incidência solar que considera a cobertura de nuvens.

A rede de ondas longas (Ql) é tratada separadamente, através da seguinte fórmula:

$$Q_l = (Q_z - Q_x) \left(1 - \frac{NW}{100} \right) \quad (3)$$

Onde,

N = Fator para nuvens, dependente da altitude.

W = Cobertura de nuvens média para dia e noite (100- S_c).

Q_z = Radiação de ondas curtas incidente sem considerar a cobertura de nuvem.

O equacionamento que segue é realizado pelo próprio *AASHTOWare Pavement ME*, porém é relevante registrar os parâmetros determinados para que se compreenda o impacto que causa um determinado banco de dados climáticos, objeto deste trabalho, mesmo que apresente valores médios de temperatura e chuva idêntico entre duas diferentes localidades.

5 Alterações dos HCDs para testes de temperatura

Um modo de analisar as interferências dos parâmetros climáticos no desenvolvimento dos pavimentos é a alteração dos HCDs para testes. Qiao *et al.* (2013) realizaram um estudo alterando o valor dos parâmetros acrescentando 5% da média anual para cada velocidade do vento, precipitação, cobertura de nuvens e temperatura, criando um novo HCD individual para cada uma dessas alterações. Os autores realizaram tal variação pois identificaram que os efeitos de ilha de calor gerado pelas altas edificações no ambiente urbano, associado com as grandes quantidades de área pavimentada, tendem a elevar as temperaturas nestes centros em até 5 °C.

Qiao *et al.* (2013) ainda criaram um modo para alterar a temperatura de maneira que mantenha a mesma média anual. Utilizando uma função senoide no banco, picos foram criados com aumentos de temperatura de 5% de verão e diminuição de 5% no inverno. Essa alteração que mantém a média anual semelhante, porém intensificando os extremos, uma tendência apontada pelos autores como consequência do aquecimento global.

6 Criação do banco de dados horário a partir das séries históricas

A criação de um HCD que serve de base para uso no *AASHTOWare Pavemente ME Design*, começa com a coleta de dados climáticos necessários. Esses dados conforme citados anteriormente são precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, incidência de luz solar e velocidade do vento. Esses dados devem estar em base horária, obtida através de estações climáticas com pelo menos 60 meses de dados.

O levantamento dos dados foi realizado através da consulta aos websites do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). O site do INMET fornece os dados das estações meteorológicas convencionais desde a sua fundação, porém os dados das estações automáticas disponíveis são apenas dos 90 dias anteriores. O acesso aos demais dados foi realizado através de solicitações diretas ao Instituto. As estações convencionais possuem três entradas por dia, com umidade relativa do ar, temperatura, precipitação e velocidade do vento. As estações automáticas fornecem os mesmos dados que as estações convencionais, entretanto com uma base horária.

O site do INPE disponibiliza os dados das estações METAR (*Meteorological Aerodrome Report*, Relatório Meteorológico de Aeroporto) e SYNOP (*Surface Synoptic Observation*, Observação Sinótica de Superfície). Essas estações disponibilizam os dados em base horária no caso METAR e de 3 horas no caso SYNOP. As estações possuem os dados de temperatura do ar, velocidade do vento e a cobertura de nuvens. As SYNOP possuem os mesmos dados, além da umidade relativa do ar.

Analisando os dados obtidos, percebeu-se que existiam diversas falhas, que encontraram algum erro de leitura. Baseado nisso, foram tratados em conjunto, com auxílio de planilhas eletrônicas, para a criação do HCD. Essas variações fizeram com que os dados recebidos e os HCDs tivessem datas diferentes de início e fim, para adequar um período com menor quantidade de erros possíveis, expresso na Tabela 1. Os dados das estações também se encontravam em horário universal, sendo necessário o desconto de 3 horas para a adequação ao fuso horário brasileiro, impossibilitando o último dia.

Tabela 1. Datas de início e fim, recebidas e utilizadas nos HCDs

Cidade	INMET Aut.		Utilizado HCDs	
	Início	Final	Início	Final
Brasília	07/05/2000	31/12/2015	08/05/2000	30/12/2015
Fortaleza	18/02/2003	31/12/2015	18/02/2003	30/12/2015
Porto Alegre	22/09/2000	30/09/2015	01/01/2005	29/09/2015
Rio de Janeiro	24/05/2000	31/12/2015	01/01/2003	30/12/2015
São Paulo	25/07/2006	31/12/2015	25/07/2005	30/12/2015

Os dados da estação convencional do INMET e das automáticas do SYNOP e METAR vieram com seus dados escritos de maneira semelhante as necessárias, com os dados posicionados em colunas únicas e cada linha significando uma hora. A estação automática INMET, entretanto, vem com um formato diferente de escrita, com os dados formando uma tabela, com cada linha significando um dia e cada coluna, uma hora. O método utilizado para reescrever esses dados foi através de um script que permitiu que as planilhas fossem automaticamente corrigidas.

As planilhas das estações automáticas foram escolhidas para serem as bases principais de dados para a criação do HCD para os parâmetros de temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Para precipitação é utilizada a estação convencional que possui menos erros que a estação automática. Por último a cobertura de nuvens é fornecida pelas estações METAR que possuem base de dados horária. Como as bases de dados que foram utilizadas possuem erros, tornou-se necessária a criação de um método para a correção desses erros.

Para corrigir os problemas dos três parâmetros que utilizam a base de dados das estações automáticas seguiram-se as seguintes etapas:

- i. Interpolar valores próximos
- ii. Inserir os valores das estações convencionais do INMET.
- iii. Inserir os valores do banco de dados do SYNOP e METAR
- iv. Interpolação linear dos valores restantes

Em caso de persistência de erros, ou na inexistência de informações nas séries históricas para completar o set de dados, a opção para correção foi o uso de interpolação linear dos erros até a tabela estar completa e livre de entradas nulas.

Após aplicada a metodologia, a velocidade do vento é convertida para quilômetros por hora, unidade utilizada pelo programa para o dimensionamento, na versão do Sistema Internacional de Unidades (SI). O *software* original exige a conversão para unidades do sistema imperial.

Na precipitação, as estações obtiveram poucas falhas, e em grandes períodos de falhas, os dados foram substituídos pelas estações automáticas. A cobertura de nuvens foi determinada através das estações METAR, inserindo valores das estações SYNOP nos valores nulos. O restante dos valores foi encontrado através de interpolações lineares. Completada a interpolação, os valores de cobertura de nuvens foram descontados de 100% para que se obtivesse a incidência de luz solar que atinge a superfície, seguindo as formulações propostas pelo NCHRP (2014).

Terminada a correção de falhas e conversões de valores, os dados foram posicionados na ordem correta: data (AMDH), temperatura (°C), velocidade do vento (m/s), incidência solar (%), precipitação (mm) e umidade relativa (%), em seguida os dados foram copiados para um documento em branco e salvos no formato HCD (.hcd).

Finalizados os HCDs, foram adicionados ao programa, através da adição no arquivo *station.dat* e inseridos dentro das pastas de arquivos de programa do *software*. A inclusão no *station.dat* requer que eles sejam colocados na lista com as demais estações, portanto uma numeração não previamente utilizada pelo programa foi utilizada e a linha seguiu os padrões do programa, com a numeração, seguida pela cidade, estado, nome da estação, latitude, longitude, elevação, data de início, indicação de completo através da letra “C” e data de final.

Os HCDs para os testes de interferência de temperatura foram criados através da modificação direta da temperatura entre +4, +2, -2 e -4 graus para análise do impacto que o aumento ou diminuição da temperatura pode causar em cada ambiente.

Ainda foram criados HCDs conforme propostos no estudo de Qiao *et al.* (2013) para uma análise da sensibilidade das cidades brasileiras para permitir uma melhor compreensão do papel de cada parâmetro e em qual desgaste acontece o maior impacto. A alteração seguiu uma adição, conforme a literatura, de 5% da média nos parâmetros e uma criação de uma curva senoide para a modificação dos extremos de temperatura no inverno e verão de 5% da média. Esses HCDs criados foram então adicionados ao arquivo *station.dat* do mesmo modo que os demais.

7 Resultados e validação para a cidade de Porto Alegre

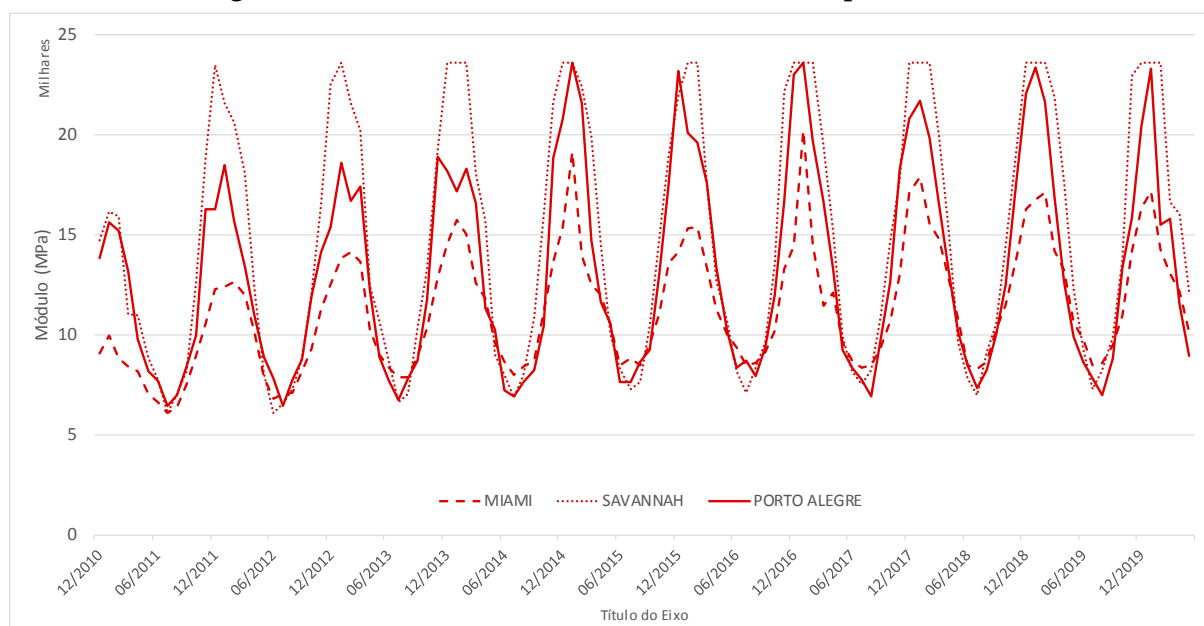
O arquivo HCD de Porto Alegre gerado com a aplicação da metodologia apresentada nos dados climáticos obtidos foi submetido a teste no *software* da AASHTO a fim de validação do método e avaliação de resultados para sua consistência, de forma a validar o arquivo gerado.

Os resultados das previsões dos desgastes do pavimento foram conforme a Tabela 2 e a variação do módulo ao longo do período de teste conforme Figura 1, comparado com duas cidades americanas utilizadas para a análise de coerência dos resultados.

Tanto o módulo, como os desgastes obtidos estão próximos aos das cidades americanas, com picos maiores em Savannah ocorridos pelos invernos mais rigorosos e Miami com módulos mais baixos devido as altas temperaturas anuais da cidade. Os valores de Porto Alegre foram deslocados em 6 meses no gráfico, para fins de visualização e comparação, coincidindo desse modo com o verão e inverno do hemisfério norte. Nesta simulação, não houve variação de outros parâmetros da modelagem, a exemplo de tráfego ou tipo de materiais, haja visto a intenção de se demonstrar o impacto do clima no comportamento do desempenho do pavimento.

Tabela 2. Comparativo dos resultados de Porto Alegre

Critério de Desempenho	Porto Alegre	Miami	Savannah
IRI Final (m/km)	2,85	2,84	2,84
Deformação Permanente (mm)	21,82	20,98	21,34
Trincamento por Fadiga (Porcentagem)	23,50	24,04	22,93
Trincamento por retração térmica (m/km)	5,15	5,15	5,15
Trincas Longitudinais (m/km)	670,0	687,7	658,1
Deformação Permanente (CA) (mm)	9,61	9,11	9,36

Figura 1. Gráficos de módulo das cidades comparadas

8 Resultados para as demais cidades

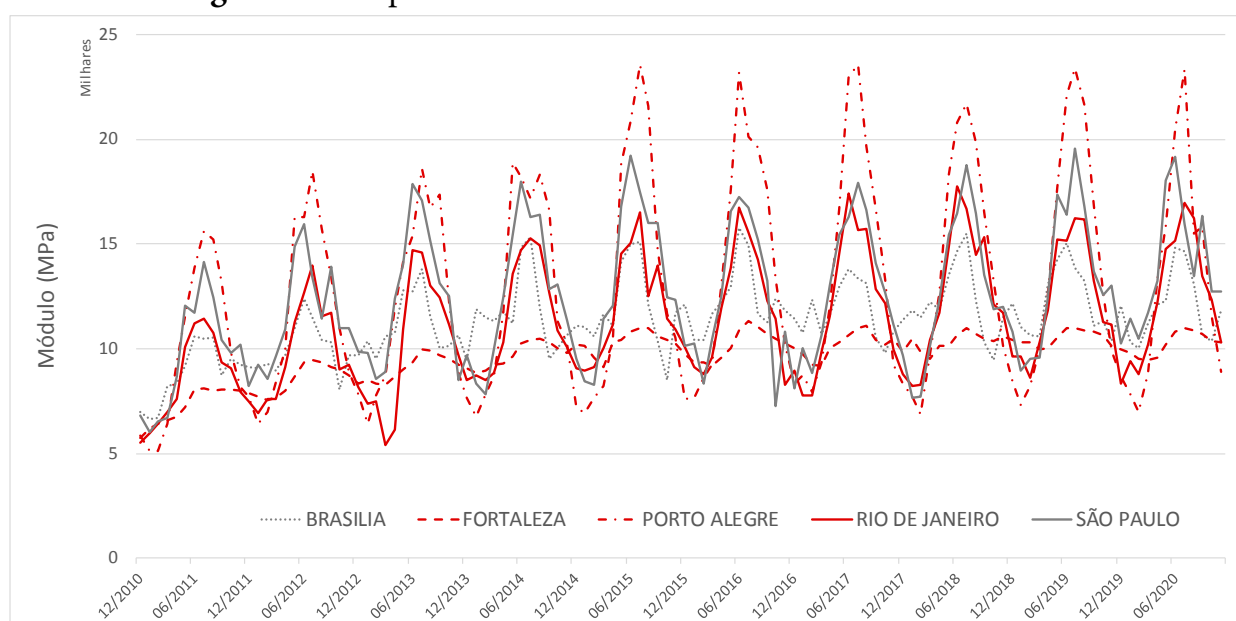
Os arquivos gerados para as demais cidades também passaram por uma análise preliminar, comparados dessa vez com o resultado obtido em Porto Alegre, com os desgastes expressos na Tabela 3 e os módulos expressos na Figura 2.

Os módulos apresentados seguem o comportamento esperado para a temperatura de cada cidade, com Fortaleza mostrando um comportamento mais linear, enquanto Porto Alegre possui os picos mais altos, seguido por São Paulo, condizentes com os invernos mais frios dessa cidade em comparação as demais cidades brasileiras. Os desgastes previstos encontram-se próximos entre as cidades, permitindo que sejam encarados como válidos.

Tabela 3. Comparativo de resultados das cidades brasileiras

Critério de Desempenho	Brasília	Fortaleza	Porto Alegre	Rio de Janeiro	São Paulo
IRI Final (m/km)	2,79	2,90	2,85	2,90	2,83
Deformação Permanente (mm)	19,01	23,07	21,82	23,35	20,56
Trincamento por Fadiga (%)	23,72	24,91	23,50	24,34	24,03
Trinc. p/ retração térmica (m/km)	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15
Trincas Longitudinais (m/km)	650,81	744,27	669,95	721,27	663,19
Def. Permanente (CA) (mm)	7,48	10,72	9,61	10,92	8,56

Figura 2. Comparativo dos módulos das cidades brasileiras



9 Resultado das variações climáticas encontradas

Os HCDs modificados com a primeira opção, com variações de temperatura de +4, +2, -2 e -4 foram testados para todas as cidades e os resultados encontrados foram conforme a Tabela 4.

Observa-se que o aumento da temperatura causa um impacto negativo em todos os requisitos testados, conforme era esperado pela bibliográfica estudada. A segunda análise com as variações em vários parâmetros dos HCDs em 5% foi realizada, possibilitando desse modo um melhor entendimento que cada elemento causa em cada um dos desgastes calculados pelo programa. Os resultados foram colocados em formato de variação percentual, criando uma análise de sensibilidade, e são demonstrados na Figura 3 e Figura 4.

Tabela 4. Comparativo dos resultados dos HCDs modificados

Cidade	Var.	IRI Final (m/km)	Deformação Permanente (mm)	Trincas por Fadiga (Porcentagem)	Trincas Longitudinais (m/km)	Deformação Permanente (CA) (mm)
Brasília	-4	2,71	16,27	22,85	598,98	5,32
	-2	2,75	17,5	23,28	622,16	6,29
	0	2,79	19,01	23,72	650,81	7,48
	+2	2,83	20,67	24,16	684,18	8,8
	+4	2,88	22,54	24,58	723,43	10,27
Fortaleza	-4	2,79	19,16	23,88	660,35	7,64
	-2	2,84	21	24,42	699,47	9,09
	0	2,9	23,07	24,91	744,27	10,72
	+2	2,96	25,33	25,31	800,02	12,49
	+4	3,03	27,76	25,65	885,52	14,4
Porto Alegre	-4	2,77	18,84	22,84	620,92	7,24
	-2	2,81	20,25	23,14	643,07	8,36
	0	2,85	21,82	23,5	669,95	9,61
	+2	2,9	23,58	23,89	703,97	11,02
	+4	2,96	25,5	24,23	755,6	12,55
Rio de Janeiro	-4	2,8	19,92	23,55	650,81	8,23
	-2	2,85	21,6	23,98	684,18	9,55
	0	2,9	23,35	24,34	721,27	10,92
	+2	2,95	25,43	24,72	777,98	12,55
	+4	3,01	27,58	25,05	845,32	14,24
São Paulo	-4	2,75	17,69	23,21	613,3	6,28
	-2	2,79	19,07	23,65	636,55	7,36
	0	2,83	20,56	24,03	663,19	8,56
	+2	2,88	22,18	24,37	694,57	9,86
	+4	2,92	23,99	24,68	732,58	11,32

Os resultados demonstrados nas Figuras 3 e 4 mostram que a temperatura é o principal parâmetro nos desgastes dos pavimentos. A alteração de 5% elevou as trincas longitudinais na ordem de 5% e causou um aumento nas trilhas de rodas no concreto asfáltico de aproximadamente 12% no pior dos casos. Precipitação e incidência solar são padrões com menor interferência nos desgastes causados nos pavimentos. A velocidade do vento é o único parâmetro que reduz os desgastes ocorridos nos pavimentos. Isso ocorre, pois, o vento age no balanço térmico reduzindo a temperatura da superfície, acelerando a convecção e liberação de calor da superfície do pavimento, conforme os resultados demonstram e pode ser observado nas equações de balanço térmico do NCHRP (2014).

Figura 3. Gráficos de sensibilidade dos HCDs modificados

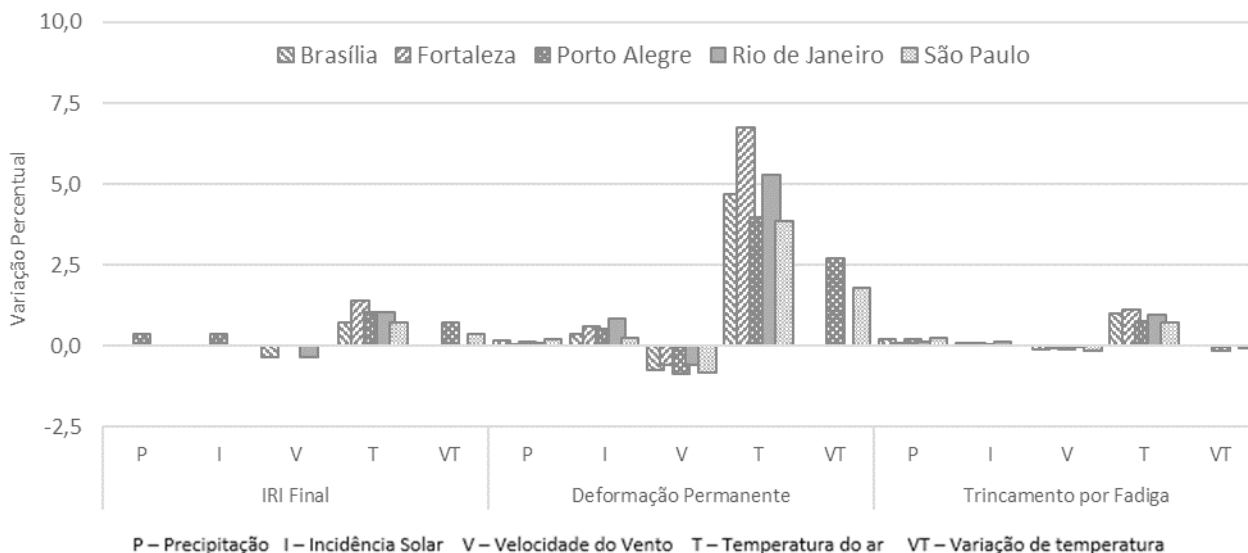
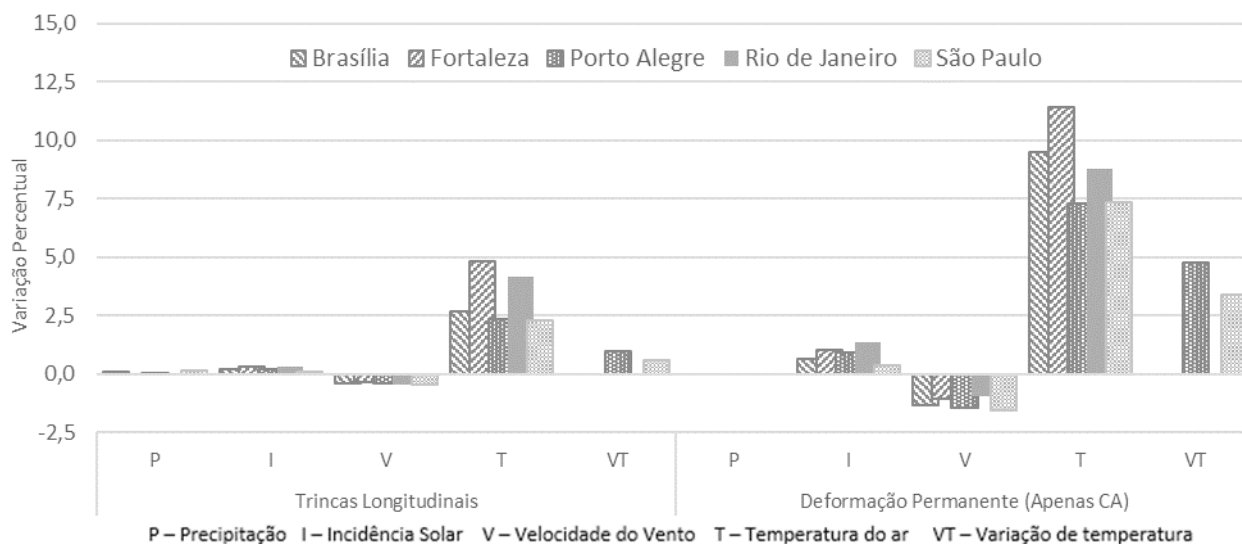


Figura 4. Gráficos de sensibilidade dos HCDs modificados



A variação da temperatura, modelada como uma função senoide e mantendo-se as mesmas médias anuais - apenas aumentando os máximos e mínimos -, teve um impacto menos acintoso que o aumento de 5% da média em todas as entradas de temperatura. No entanto, foi responsável por aumentar os desgastes em praticamente todos os parâmetros citados, exceto no trincamento por fadiga, onde sua ação é quase nula.

Esse resultado demonstra que para uma mesma média de temperatura, as temperaturas mais rigorosas no verão e inverno tendem a gerar impactos negativos no desempenho dos pavimentos.

As deformações permanentes apresentam a maior sensibilidade com o aumento de temperatura. Deformações e trilhas de rodas tendem a ter esse tipo de comportamento devido a diminuição do módulo de elasticidade que ocorre com o aumento da temperatura, tornando o pavimento deformável.

10 Considerações Finais

Foram compilados dados climáticos com base horária para cinco capitais brasileiras: Porto Alegre, Brasília, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo. Os arquivos gerados foram do tipo HCD para uso com o *software AASHTOWare Pavement ME Design*, permitindo assim a análise do comportamento de pavimentos flexíveis frente à variação climática. O banco de dados construído foi com base em séries históricas contemplando entre 10 e 15 anos de dados, superando a recomendação mínima de 5 anos da AASHTO.

As análises realizadas demonstraram haver uma coerência com dados de estações similares norte-americanas para a cidade de Porto Alegre, que se aproxima de dados médias de temperatura e chuva às cidades de Miami e Savannah. Uma análise comparando o comportamento de uma estrutura padrão de pavimento flexível foi realizada entre os três diferentes climas destas cidades. Esta avaliação permitiu determinar a consistência do banco de dados montado a partir da avaliação correlata com tais cidades. Os parâmetros de desempenho foram razoavelmente próximos, tendo Savannah se aproximado mais do comportamento da cidade de Porto Alegre.

Nas análises de sensibilidade através da função senoidal, mantendo-se a mesma média anual, porém aumentando os máximos e mínimos (condições frequentes devido aos eventos climáticos extremos) resultou em um aumento dos desgastes em praticamente todos os parâmetros testados, exceto no trincamento por fadiga, onde a ação é quase nula. Na alteração geral de 5%, o aumento gerou um aumento de 5% nas trincas longitudinais e 12% do afundamento da trilha de rodas no aumento da temperatura. Estes elementos auxiliam na identificação de parâmetros a serem monitorados e também na compreensão do mecanismo de funcionamento combinado pavimento-clima.

Os bancos de dados para as cinco cidades estão disponíveis para download no relatório de Brito e Heller (2016).

Referências Bibliográficas

- BRITO, L. A. T.; HELLER, L. (2016). **Relatório Final de Pesquisa “Influência da temperatura no comportamento de Pavimentos Flexíveis – uma análise direcionada às ilhas de calor”** vl.1.1049p.
- BRITO, L. A. T.; SPECHT, L. (2015). **Relatório Final de Pesquisa. Impacto da sobrecarga legal em projetos de pavimentos novos e restaurações – métodos convencionais nacionais e AASHTO 2002 através do software AASHTOware® Pavement ME.** Rev . 113p.
- FERNANDES, W. D., SPECHT, L., PEREIRA, D. S., BRITO, L. A. T., BARONI, M. (2016). **Análise Comparativa entre os Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do Brasil e o Método da AASHTO.** Reunião Anual de Pavimentação – RAPv (2016).
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 22 fev. 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de previsão do tempo e estudos climáticos. **Dados Observacionais.** Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 22 fev. 2016.
- POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; HARVEY, J. T. **Durability and Visibility Benefits of Cooler Reflective Pavements.** Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Report. 2000.
- QIAO, Y.; FLINTSCH, G.; DAWSON, A.; PARRY, T. **Examining the effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life.** Transportation Research Record. Volume 2349. Geology and Properties of Earth Materials. 2013. <http://dx.doi.org/10.3141/2349-12>
- SHI, X.; REW, Y.; SHON, C. S.; PARK, P. **Controlling Thermal Properties of Asphalt Concrete and Their Effects on Pavement Surface Temperature.** TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers. 20p. 2015.