

Construção e instrumentação de pavimentos asfálticos submetidos ao Simulador de Grande Porte (SGP)

Construction and instrumentation of asphaltic pavements submitted to the Large-Scale Simulator (LSS)

Construcción e Instrumentación de suelos asfálticos sometidos al Simulador de Gran Tamaño (SGT)

Construction et instrumentation de chaussées en asphalte soumises au simulateur à grande échelle (SGE)

Juceline Batista dos Santos Bastos (OrCID)
jucelinebatista@hotmail.com
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Jorge Barbosa Soares (OrCID)
jsoares@det.ufc.br
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Resumo

A instrumentação com sensores é uma tecnologia relativamente recente para a pavimentação. Outra metodologia, ainda embrionária no Brasil, é o uso de simuladores de tráfego, no entanto a sua utilização permite acelerar as falhas nos pavimentos em um curto espaço de tempo. Dessa forma, esta pesquisa visa apresentar a experiência quanto à construção, instrumentação e aceleração das degradações nos pavimentos a partir da passagem de um simulador de grande porte (SGP) no Ceará. Para isso, dois trechos experimentais foram construídos e submetidos ao SGP, sendo um trecho devidamente instrumentado. Para avaliação dos dados obtidos pela instrumentação (pressão, deformação, umidade e temperatura), utilizou-se a programação Python. Por meio dos termopares foi possível perceber a concordância das temperaturas utilizadas em ensaios laboratoriais de materiais asfálticos, contemplando as temperaturas que ocorrem na parte inferior do revestimento asfáltico em campo. Os sensores de umidade indicaram que as camadas de base e sub-base apresentaram umidade de cerca de 4% abaixo da umidade ótima. Os extensômetros e as células de carga permitiram determinar os valores de deformação e . Por fim, incentiva-se o prosseguimento da coleta de dados por meio da instrumentação em campo, algo ainda incipiente no país.

Palavras-chave: Instrumentação. Simulador de tráfego. Pavimentos asfálticos.

Abstract

Sensor instrumentation is a relatively recent technology for paving. Another methodology still embryonic in Brazil is the use of traffic simulators; however, its use allows accelerating the faults in the pavements in a short time. In this way, this research aims to present the experience regarding the construction, instrumentation, and acceleration of the degradations in the pavements from the passage of a Large-Scale Simulator (SGP) in Ceará. For this, 02 experimental sections were constructed and submitted to the SGP, being 01 section properly instrumented. To evaluate the data obtained by the instrumentation (pressure, deformation, humidity, and temperature), Python programming was used. Through the thermocouples, it was possible to observe the agreement of the temperatures used in laboratory tests of asphaltic materials, considering the temperatures that occur in the lower part of the asphalt coating in the field. Moisture sensors indicated that the base and sub-base layers had a moisture content of about 4% below the optimum humidity. The extensometers and the load cells allowed determining the values of deformations and pressures. Finally, it is encouraged

the continuation of data collection through instrumentation in the field, something still incipient in the country.

Keywords: Instrumentation. Heavy vehicle simulator. Asphaltic pavements.

Resumen

La instrumentación con sensores es una tecnología relativamente reciente para pavimentación. Otra metodología aún embrionaria en Brasil es el uso de simuladores de tránsito, sin embargo, su utilización permite acelerar los fallos en los suelos en un corto período de tiempo. Así, esta investigación tiene el objetivo de presentar la experiencia cuanto a la construcción, instrumentación y a la aceleración del deterioro de los suelos a partir del paso de un Simulador de Gran Tamaño (SGT) en Ceará. Para eso, 02 tramos experimentales fueron construidos y sometidos al SGT, de estos 01 adecuadamente instrumentado. Para evaluación de los datos obtenidos por la instrumentación (presión, deformación, humedad y temperatura), se utilizó la programación Phyton. Por medio de los termopares fue posible notar la concordancia de las temperaturas utilizadas en ensayos de laboratorio de materiales asfálticos, contemplando las temperaturas que ocurren en la parte inferior del revestimiento asfáltico en campo. Los sensores de humedad indicaron que las capas de base y sub-base presentaron humedades cerca de 4% abajo de la humedad óptima. Los extensómetros y las células de carga permitieron determinar los valores de deformaciones y presión. Por fin, se fomenta la continuación de la colecta de datos por medio de la instrumentación en campo, algo todavía incipiente en el país.

Palabras-clave: Instrumentación. Simulador de tránsito. Suelos asfálticos.

Résumé

L'instrumentation par capteurs est une technologie relativement récente pour la chaussée. Une autre méthodologie encore nouvelle au Brésil est l'utilisation de simulateurs de trafic. Pourtant, son utilisation permet d'accélérer les défauts des chaussées dans une courte période. Ainsi, cette recherche a comme objectif présenter l'expérience sur la construction, l'instrumentation et sur l'accélération des dégradations dans les chaussées lors du passage d'un simulateur à grande échelle (SGE) au l'état du Ceará au Brésil. Pour cela, 02 sections expérimentales ont été construites et soumises au SGE. Il faut avoir en compte que 01 section a été correctement instrumentée. Pour évaluer les données obtenues par l'instrumentation (pression, déformation, humidité et température), la programmation en Python a été utilisée. Grâce aux thermocouples, il a été possible d'observer la concordance des températures utilisées lors des essais en laboratoire des matériaux asphaltiques. Tout cela en prenant en compte des températures présentes dans la partie inférieure du revêtement d'asphalte sur le terrain. Les capteurs d'humidité ont indiqué que les couches de base et de sous-base ont présenté une teneur en humidité d'environ 4% inférieure à l'humidité optimale. Les extensomètres et les cellules de charge ont permis de déterminer les valeurs de déformations et de pressions. Enfin, il est encouragé de poursuivre la collecte de données par une instrumentation sur le terrain, ce qui commence à apparaître dans le pays.

Mots-clés: Instrumentation. Simulateur de trafic. Revêtement asphaltique.

1 Introdução

A validação/refinamento do novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos brasileiro requer o monitoramento de trechos experimentais, abrangendo as mais variadas condições a que os pavimentos são submetidos e as mais diversas opções de materiais, além de uma tecnologia que permita identificar os principais processos que convergem para a queda do desempenho estrutural dos pavimentos após a sua abertura ao tráfego. A necessidade da realização desses monitoramentos advém das incertezas incorporadas às funções de transferência utilizadas para o dimensionamento de pavimentos novos e em

projetos de restauração de pavimentos, além da utilização dos dados para modelagem das condições futuras dos pavimentos.

O uso de simuladores de tráfego corrobora com o monitoramento, pois permite acelerar as falhas nos pavimentos em um curto espaço de tempo, reproduzindo a deterioração que irá ocorrer ao longo do período de serviço. Assim, o uso dessa ferramenta, associada a uma instrumentação com aquisição de dados, possibilita a modelagem da evolução das falhas baseada em informações estruturais (tensões e deformações no sistema de camadas) que surgem a partir da passagem do simulador, agregando informações relevantes para o projeto.

Logo, esta pesquisa visa apresentar a experiência quanto à construção, instrumentação e aceleração das degradações nos pavimentos a partir da passagem de um simulador de grande porte (SGP) no Ceará.

2 Revisão de literatura

2.1 Simuladores de grande porte

Pesquisas com simuladores permitem uma investigação mais próxima da realidade. Entre os modelos de simuladores de grande porte atualmente existentes, destacam-se: o *Manège de Fatigue* em Nantes, França e o do CEDEX, localizado na cidade de Madrid na Espanha, e um norte-americano, conhecido como *Accelerated Loading Facility (ALF)*, na Virgínia. A Figura 1 apresenta alguns simuladores de tráfego internacionais.

Em âmbito nacional, citam-se os seguintes simuladores de tráfego de grande porte: o do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) (Fig. 2a), o desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por meio do convênio com o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens do Rio Grande do Sul (DAER-RS) (Fig. 2b), e o Simular, fruto da parceria entre a empresa CIFALI e a UFRGS (Fig. 2c).

Figura 1 – Simuladores de tráfego internacionais.



(a) *Manège de Fatigue* (Nantes)

(b) CEDEX (Madrid)

(c) ALF (Virgínia)

Fonte: Vale, 2008.

Figura 2 – Simuladores de tráfego nacionais.



(a) simulador do IPR

(b) simulador da UFRGS

(c) Simular

Fonte: (a) Moura, 2010; (b) CONCEPA-LAPAV, 2007; (c) Vale, 2008.

No Ceará, conta-se com o SGP da Universidade Federal do Ceará (UFC), construído no âmbito da Rede Asfalto N/NE, financiada pela Petrobras e pela FINEP em parceria com uma empresa local. O SGP é composto

de sistema hidráulico, estrutura, carro de ensaio, sapatas e sistema de controle dos ensaios. Para acelerar os danos no pavimento, nesse SGP, é possível variar os seguintes parâmetros: a velocidade de ensaio, de 0 a 12 km/h, com incremento de 1 km/h; a força aplicada no carro de ensaio, de 0 a 7.000 kgf, com incremento de 500 kgf; o sentido de deslocamento longitudinal, podendo ser nos sentidos de ida, volta, ou ida e volta; o sentido de deslocamento transversal, podendo se deslocar 10 cm a partir de um ponto central para direita ou para esquerda, com incremento de 5 cm, podendo assim ser posicionado em 5 pontos distintos, com até 99 passadas por pontos.

No Brasil, várias pesquisas fizeram uso do simulador e dos trechos experimentais da UFRGS/DAER:

- Núñez *et al.* (1999) estudaram a viabilidade do uso de basaltos alterados como materiais de pavimentos delgados. Na pesquisa, cinco trechos experimentais foram construídos e submetidos à aplicação de carga em um único sentido, ao longo de 8 metros e com velocidade de 6 km/h. Para essas estruturas, os Afundamentos em Trilha de Rodas (ATRs) foram o principal dano.
- Gonçalves (2002) monitorou a evolução da degradação dos pavimentos asfálticos ao longo do tempo. Para isso, das seis seções experimentais construídas e instrumentadas, duas foram submetidas aos esforços do tráfego.
- Albano (2005) investigou e quantificou os efeitos do excesso de carga, verificando que, para 20% de excesso de carga por eixo, houve uma redução da vida prevista em cerca de 50% no pavimento investigado.
- Wickboldt (2005) avaliou a eficiência de um recapeamento em asfalto-borracha no retardamento de trincas. Quanto à instrumentação, as deformações horizontais na direção longitudinal e a 45° mostraram aumento progressivo, enquanto a tensão horizontal apresentou queda brusca, indicando dano no sensor.
- A USP também se destaca na investigação do uso de simuladores de grande porte aplicados a trechos experimentais. Destacando-se as seguintes pesquisas:
- Vale (2008) propôs um método para o uso do SGP, recomendando-se: (1) deslocamento transversal de no mínimo 100 mm e (2) movimento da carga em ambos os sentidos, já que, de acordo com a revisão de literatura desse autor, esse movimento não influencia quando se estuda a deformação permanente.
- Moura (2010) estudou a previsibilidade de deformações em campo por meio do método laboratorial. Dentre os três trechos avaliados por meio do simulador, destaca-se a inadequabilidade da mistura asfáltica com o ligante 50/70 para pavimentos submetidos ao tráfego pesado e lento.
- Negrão (2012) investigou trechos com misturas asfálticas distintas, modificadas por SBS e RET, e uma gap-graded com ligante modificado por borracha de pneu moído. A partir de medidas de ATR, foram calibradas as equações de evolução de ATR, usando o modelo do *HDM IV (Highway Development and Management)*.

A COPPE/UFRJ utilizou essa ferramenta para avaliar soluções de reforço de pavimentos asfálticos na rodovia Rio Teresópolis. Nesse local, foram construídos 4 trechos de 50 metros cada um. Optou-se por utilizar o simulador em um único sentido, pois o uso nos dois sentidos é mais recomendado para o estudo de ATR, e o sentido único para estudo de fadiga, que é o caso da rodovia em estudo, devido às tensões cisalhantes, que se desenvolvem num sentido e, depois, no outro, tendendo a “fechar” as trincas. Adotou-se, ainda, o deslocamento de 5 cm para cada lado, totalizando 10 cm de deslocamento transversal (FRITZEN, 2005).

2.2 Instrumentação de pavimentos

Para avaliar o desempenho de pavimentos em serviço, diversos estudos têm sido feitos envolvendo a construção e a análise de pistas experimentais por meio da instrumentação com sensores eletrônicos, permitindo a determinação em escala real de parâmetros, como pressão, temperatura, pluviometria e deformação.

Historicamente, comum para a indústria aeroespacial, a instrumentação com sensores é uma tecnologia recente para a pavimentação. As células de carga, usadas em análises de tensão, por exemplo, são muito comuns em monitoramento de aterros, obras de terra em geral, entre outros (PINELO, 2017). Em sua maioria, os sensores não são especificamente voltados para uso em estruturas de pavimentos. Portanto, a tecnologia empregada para pavimentos são adaptações de sensores usuais de outras áreas. Os sensores com capacidade de avaliar deformações mais comuns no mercado e em pesquisas voltadas a análise em pavimentos são os extensômetros elétricos. Esses sensores analisam deformações por meio da variação da resistência elétrica em um filamento metálico. Pode-se, nesse contexto, entender a dificuldade de encontrar e especificar equipamentos para essa finalidade, além da dificuldade dessas adaptações coletarem de forma adequada os dados dos pavimentos.

Silva e Motta (1999) abordaram as principais experiências brasileiras em instrumentação de pavimentos. De acordo com as autoras, a primeira instrumentação ocorreu em 1976, na localidade de Nova Brasília, Ibituba-SC, visando avaliar o desempenho de misturas pozolânicas em um trecho experimental. Nesse trecho, 2 seções, com espessuras diferentes de bases de mistura pozolânica, foram instrumentadas. Entretanto os 19 extensômetros não funcionaram; as 12 células de carga funcionaram durante 4 meses; e os 24 termopares apresentaram uma boa atuação durante o período da pesquisa (cerca de 3 anos) (PINTO *et al.*, 1977 *apud* SILVA e MOTTA, 1999).

O DNER (1993), por meio do convênio com a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, executou uma pesquisa sobre concreto rolado (CR) na pista circular experimental do IPR/DNER. A pista foi dividida em duas seções: CR atuando como base e revestimento, e CR apenas como base, mas tendo como revestimento um concreto asfáltico (CA). Nelas foram instalados os seguintes sensores: 12 extensômetros, 6 termopares e 4 células de carga. As 4 células de carga mediram a pressão vertical na superfície do subleito. Os dados medidos foram comparados com os dados calculados e os resultados foram bastante próximos. Os 12 extensômetros foram usados para obter as deformações horizontais na superfície do CR (SILVA e MOTTA, 1999).

Em 1998, o DNER, novamente, por meio de convênio com a ABCP, instrumentou a pista do IPR/DNER para estudar o recapeamento de pavimentos flexíveis com concreto - *whitetopping* (WT). Para tanto, foram utilizados 6 extensômetros de resistência instalados a cerca de 2 cm acima da camada de CA, ficando imersos no concreto, mas o mais próximo possível da fibra inferior do recapeamento. Foram instaladas também 2 células de carga, de forma a medir os esforços exercidos pela placa de concreto sobre a superfície do CA. Os dados provenientes desses sensores foram condicionados em um sistema de aquisição de dados.

Os cabos de ligação dos sensores aos instrumentos de medição foram abrigados por eletrodutos metálicos, protegendo as ligações elétricas da umidade do solo e minimizando as interferências eletromagnéticas. Os seis extensômetros embutidos na camada de WT resistiram satisfatoriamente aos esforços na fase de construção e às solicitações devido ao carregamento externo e fatores ambientais, entretanto o período de registro das medições foi de aproximadamente três meses, período muito curto para permitir concluir sobre a vida útil desses sensores, uma vez que foram submetidos a um número relativamente reduzido de repetições. Por fim, os resultados de deformações dessas medições mostraram-se satisfatórios quando comparados às simulações numéricas, indicando um avanço na utilização de instrumentação de pavimentos. Com os registros dos extensômetros foi possível, também, calcular as tensões de tração na face inferior do WT (SILVA e MOTTA, 1999).

A instrumentação das pistas experimentais de Gonçalves (2002) foi constituída por células de carga e extensômetros encapsulados em resina epóxi com duas configurações: roseta a 45° e *H-gage*. O motivo da adoção de tais configurações deve-se à necessidade de ancoragem do instrumento no interior da mistura asfáltica e também para assegurar a sua horizontalidade. Tais ferramentas possibilitaram a determinação das tensões e deformações no interior das camadas dos pavimentos experimentais. Esses resultados apresentaram magnitudes compatíveis com os valores determinados por meio da aplicação de modelos teóricos.

Gonçalves (2002) fez algumas observações quanto à instrumentação: (i) a elevada taxa de perda dos extensômetros instalados durante a compactação das camadas asfálticas das pistas se deu pelo uso de vibro-acabadora inadequada e a falta de treinamento da equipe envolvida na fase construtiva dos pavimentos; (ii) o principal fator identificado como responsável pelo não funcionamento adequado de algumas células de carga foi a presença de umidade nas emendas realizadas nos cabos elétricos; e (iii) as células de carga com capacidade de 10 kgf/cm², utilizadas na pesquisa para leituras de tensões em camadas de brita graduada, revelaram-se, em sua maioria, inadequadas para tal finalidade, uma vez que os registros apresentaram variações significativas.

Internacionalmente, destaca-se o estudo que foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Minnesota (Mn/DOT) nos Estados Unidos, que planejou e implementou um programa de pesquisas denominado *Minnesota Road Research Project (Mn/Road)*. Nessa pesquisa, foram instalados 8.500 sensores, os quais permitiram monitorar a resposta dos pavimentos, tanto em relação às cargas do tráfego como no que se refere às condições ambientais (temperatura e umidade). Os dados coletados no Mn/DOT foram usados para avaliar os métodos de projeto atualmente disponíveis, assim como para auxiliar no desenvolvimento de novas metodologias para avaliação e projetos de estruturas de pavimentos (JOHNSON *et al.*, 2009).

Em 1992, Mn/Road já realizava experimentos em escala real (VAN DEUSEN *et al.*, 1992). Nessa pesquisa, foram usados cerca de 3.000 sensores, em que as deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico foram avaliadas a partir da instalação de extensômetros espaçados sob as trilhas de roda. Esses sensores funcionaram e apresentaram resultados razoáveis até 3 anos após a construção. Observaram-se, nessa pesquisa, as variações das respostas, tanto em períodos curtos como em períodos longos, dentro do período de projeto. Esses autores recomendam que a instrumentação seja montada durante a construção dos pavimentos para que ocorra uma melhor conformidade com o material circundante.

Em 1998, foi construída a rodovia *Virginia Smart Road*, que vem sendo utilizada em pesquisas para acompanhar o desempenho de 12 diferentes pavimentos asfálticos sob diversas condições ambientais e de carga. Um banco de dados vem sendo construído com os resultados dessas seções de pavimentos, a partir da variação do efeito da pressão de inflação dos pneus (724, 655 e 552 kPa), magnitude de carga e velocidade (8, 24, 40 e 72 km/h). Para construção desse banco de dados foram embutidos, nas seções do pavimento, durante a construção, termopares, sondas de reflectometria para medir o teor de umidade nas camadas de base e sondas de resistividade para medir a penetração de geadas, além de células de carga e extensômetros. Tal procedimento resultou em um insucesso médio, nessa fase, de apenas 4,6% e, após o primeiro ano da construção, falha média menor que 13%. Os resultados mostraram que a baixa velocidade afetou o desempenho dos citados pavimentos, aumentando as deformações horizontais nas camadas de misturas asfálticas e aumentando o tempo de carregamento. A distribuição de pressão foi importante para validar a distribuição de cargas no pavimento, responsável por danos, especialmente deformação permanente (LOULIZI *et al.*, 2001).

Na Itália, o projeto Leopoldo investigou seis trechos experimentais instrumentados, com a finalidade de obter dados sobre as condições ambientais (temperatura e umidade), respostas do tráfego (velocidade e comprimento do veículo; quantidade de eixos, pesos por eixo e total de cada veículo) e dos pavimentos (pressão e deformação). Para tanto, foram instalados termômetros, *Time Domain Reflectometer (TDRs)*, sistema *Weight in Motion (WIM)*, células de pressão e extensômetros, durante a construção desses trechos. A instrumentação foi montada evitando o contato entre esses sensores e os agregados maiores que 5 mm. Após a colocação dos extensômetros, tomou-se o cuidado de cobri-los com uma camada de 2 cm de uma mistura de ligante asfáltico e agregados de diâmetro máximo de 5 mm, e utilizar o rolo estático para compactação das camadas de CA, a fim de evitar os danos nos sensores. Com esses cuidados, não ocorreu falha dos sensores. Além disso, os dados coletados têm mostrado uma boa concordância com as previsões teóricas (LEANDRI *et al.*, 2013).

3 Materiais e métodos

3.1 Simulador de grande porte e instrumentação de campo

O Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC conta com o SGP (Fig. 3) dentro das instalações físicas de um de seus parceiros (empresa Insttate Engenharia), local em que esta pesquisa acompanhou trechos experimentais a partir de ensaios acelerados, e também com a instrumentação de campo.

Figura 3 – Simuladores de tráfego da UFC.



Fonte: Autores (2019).

Para acelerar a evolução da deterioração do pavimento através do SGP, variou-se a velocidade de ensaio de 1 a 6 km/h; o pneu de 25 cm de largura estava inflado a 560 kPa; a força aplicada no carro de ensaio de 500 a 4.500 kgf, que produz pressão correspondente de 1,0 a 4,6 kgf/cm², esta última próxima ao eixo padrão, com acréscimo de 10%; o deslocamento longitudinal nos sentidos ida e volta, para agilizar os experimentos; o sentido de deslocamento transversal de 20 cm, com incremento de 5 cm, sendo posicionado em 5 pontos distintos, com 99 passadas por pontos em cada ciclo.

Apresentam-se os instrumentos que permitiram analisar o comportamento das estruturas de pavimentos asfálticos quanto às deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico, às tensões e à umidade presente nas diversas camadas e às temperaturas as quais o pavimento esteve sujeito:

a) Sensores de umidade

Os *TDRs* CS625 analisaram a permissividade dielétrica em meios granulares. Esses *TDRs* consistem em uma sonda de 30 cm que mede a velocidade de propagação de um pulso diferencial entre duas barras metálicas, que depende da permissividade elétrica do meio que a cerca. Como a água possui uma permissividade maior do que a do solo que a contém, a oscilação da frequência resultante é diretamente proporcional água contida no meio em que se pretende analisar. As unidades são medidas em teor volumétrico de água (*VWC* – *Volumetric Water Content*). Esses *TDRs* possuem precisão e resolução de 0,1% *VWC* e trabalham em temperaturas de 0 a 70°C.

b) Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura (termopares) LM35 apresentam uma boa precisão (0,5°C) na sua faixa de utilização, compreendida entre de -55 a 150°C, atendendo às necessidades de todas as etapas construtivas e de serviço dos pavimentos asfálticos investigados nesta pesquisa.

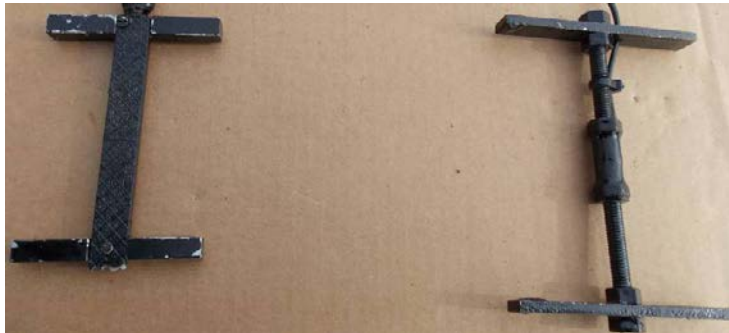
c) Sensores de deformação – Extensômetro

Como os extensômetros são dispositivos relativamente frágeis, eles precisam funcionar selado contra umidade, protegido contra a temperatura e impacto de esmagamento. Dos 10 extensômetros Kiowa Mortar (KM) (Fig. 4 à esquerda), foram utilizados 3 no topo do subleito, 3 no topo da sub-base e 3 no topo da base, em forma de roseta, e 1 no topo do reforço do subleito no sentido longitudinal ao trecho I. Estes seguem as

seguintes características: permitem imersão; temperatura de serviço entre -10 a 70°C; comprimento de 120 mm; largura de 80 mm; resistência de 120 Ω ; base do material em acrílico e cabo com fios revestidos com vinil.

Utilizaram-se, ainda, 2 extensômetros Jewell (Fig. 4 à direita), sendo 1 no topo do reforço do subleito no sentido transversal e 1 no topo da camada de base no sentido longitudinal. Esses sensores possuem 150 mm de comprimento e 100 mm de largura, e são mais robustos (resistência de 350 Ω) e mais caros quando comparados aos extensômetros KM, pois, além de suportarem temperaturas mais altas (-34 a 200°C), são capazes de suportar a compactação com rolo vibratório, necessário na execução de pavimentos asfálticos.

Figura 4 – Extensômetros desta pesquisa.



Fonte: Autores (2019).

d) Células de Pressão

As células de pressão Geokon 3500 podem ser usadas em solos, concretos e outros materiais maciços. Elas obedecem às seguintes especificações: capacidade de carga de 2,5 MPa, temperatura de trabalho entre -20 e 80°C, altura de 6 mm e diâmetro de 230 mm, e vida de fadiga de 100 milhões de ciclos *Full Scale (FS)*.

Esses equipamentos são constituídos por duas membranas de aço inox ligadas entre si pelo seu perímetro através de soldadura. O interior é preenchido por uma fina camada de óleo, cuja pressão varia com a pressão nas paredes das células provocada pelas pressões externas. A pressão do óleo é transformada em sinal elétrico por um transdutor de pressão acoplado.

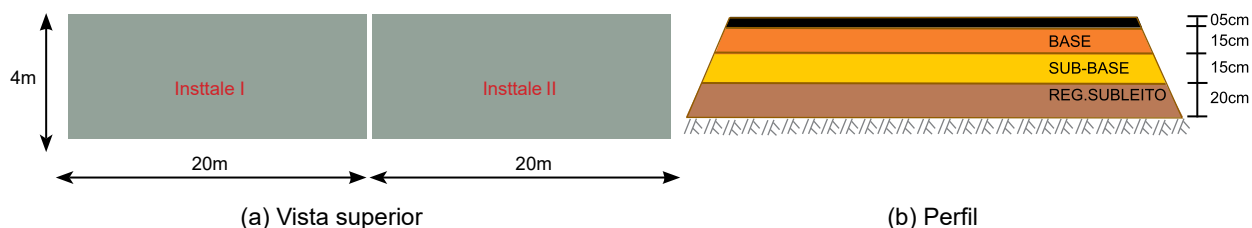
3.2 Etapas metodológicas

Esta pesquisa foi dividida em (a) caracterização dos materiais dos pavimentos e dimensionamento das pistas experimentais, (b) acompanhamento da construção dessas pistas, (c) instalação da instrumentação, (d) ensaios com o SGP, e (e) leituras periódicas da instrumentação (umidade, temperatura, pressão e deformação)

Para atingir o objetivo desta pesquisa, 2 trechos foram construídos e submetidos à aceleração das degradações nos pavimentos a partir da passagem do SGP. A pista experimental monitorada do trecho I foi instrumentada para identificação dos principais processos que convergem para a queda do desempenho estrutural. Para tanto, nesse trecho adotou-se 1 mistura asfáltica do tipo CA com brita 3/4", brita 1/2", pó de pedra e cal. Para a pista II adotou-se os mesmos materiais do trecho I e ainda a incorporação de 18% de fresado (Fig. 5a). Os agregados minerais de ambas as misturas são provenientes da pedreira Pyla. Além disso, essas misturas possuem teor de ligante e granulometrias bem semelhantes.

Para a construção das camadas granulares das pistas foram definidas as seguintes soluções: (a) regularização do subleito com solo natural (20 cm); (b) sub-base com esse solo natural estabilizado com brita 3/4" (30% de brita e 70% de solo) (15 cm) e (c) base brita graduada simples (15 cm) (Fig. 5b). Foram utilizadas as seguintes energias de compactação em campo e nos ensaios mecânicos: normal para o subleito e para a camada de regularização do subleito, intermediária e modificada para as camadas de sub-base e base, respectivamente.

Figura 5 – Perfil dos trechos experimentais.



Fonte: Autores (2019).

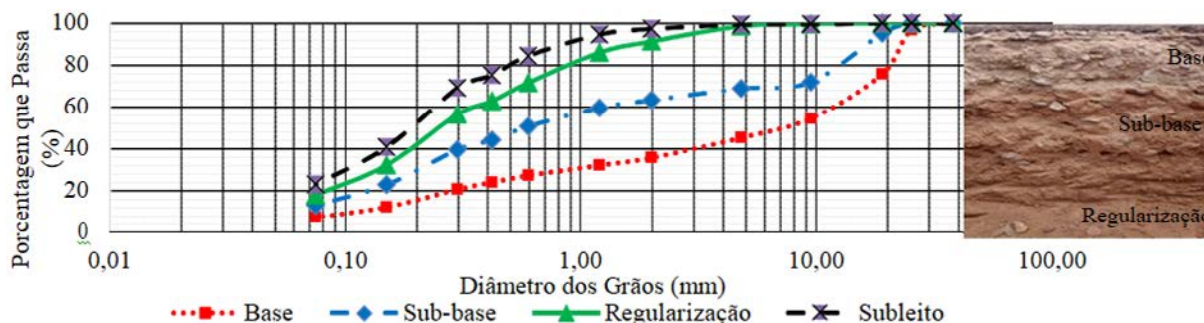
Os materiais das camadas granulares e do subleito foram coletados e caracterizados de acordo com os ensaios de granulometria por peneiramento (DNER ME 080, 1994) (Fig. 6), limites de plasticidade (DNER ME 082, 1994) e de liquidez (DNER ME 122, 1994), compactação (DNER-ME 162, 1994), índice de suporte Califórnia (ISC ou *CBR*), expansão (DNER ME 049, 1994) e módulo de resiliência (DNIT 134, 2010) (Tab. 1).

Os serviços referentes à execução de todas as camadas e do subleito foram controlados por meio dos seguintes ensaios: massa específica aparente *in situ* com frasco de areia (DNER ME 092, 1994) e determinação da umidade com uso do *Speedy* (DNER ME 052, 1994) (Tab. 1), atendendo aos limites exigidos pelo DNIT (2006).

Para a camada de revestimento seguiu-se a especificação de serviço 31 (2006) e foram extraídos corpos de prova com sonda rotativa para determinação do grau de compactação e espessura da camada, além da verificação do teor de ligante na mistura (DNER ME 053, 1994), atendendo à especificação de serviço.

Os agregados utilizados nas misturas I e II são do tipo gnáissico; o CAP usado foi o Lubnor 50/70* (PG 64-XX). Embora o ligante dessas misturas seja proveniente da Lubnor, portanto, seja 50/70, esse ligante foi classificado com 30/45 (possivelmente esse material já tenha sofrido envelhecimento).

Figura 6 – Curvas granulométricas das camadas granulares e do subleito.



Fonte: Autores (2019).

Tabela 1 – Caracterização dos materiais granulares sob revestimento.

Material	Camada	Umidade Ótima (%)	Densidade Máxima	GC (%)	<i>CBR</i> (%)	MR _{médio} (MPa)	Exp. (%)	LL (%)	IP (%)
BGS	Base	7,8	2,156	100	64	478	0,01	NL	NP
Solo-brita	Sub-base	7,0	2,197	101	29	493	0,16	15	2,2
Solo natural	Reg. subleito	8,6	2,030	101	18	376	0,13	14	1,5
Subleito	-	8,3	1,956	99	24	407	0,00	NL	NP

Fonte: Autores (2019).

4 Apresentação dos resultados e discussões

Para avaliação dos dados obtidos pela instrumentação [pressão (kPa), deformação (*microstrain*), umidade (%) e temperatura (°C)] do trecho, utilizou-se a programação Python (*software* WinPython). Assim, a partir de cada passagem do SGP, contabilizada por 2 sensores de presença fixados no simulador (Fig. 7), foi possível conhecer essas informações.

Figura 7 – Sensores de presença para contabilização da passagem do simulador.



Fonte: Autores (2019).

Para isso, foi utilizada a seguinte instrumentação: 12 extensômetros, 3 células de pressão, 3 *TDRs*, 12 termopares. Durante todo o período de ensaio, o conjunto de sensores ficou encoberto pelo material que constitui as camadas da estrutura, como: regularização do subleito (20 cm), sub-base (15 cm), base (15 cm) e CA (5 cm). Reforça-se que permaneceu nessa condição durante toda a pesquisa (10 meses). Para que os sensores fossem corretamente instalados e não viessem a interferir no comportamento estrutural do pavimento, a instalação acompanhou a construção, exceto para os *TDRs*.

O primeiro conjunto de sensores foi instalado no topo subleito, após o lançamento do material da camada superior e antes da compactação da camada. O processo foi repetido até que todos os sensores fossem instalados em todas as camadas. Terminada a fase de instalação, coletou-se as informações necessárias ao estudo, quais sejam, pressão, deformação, umidade e temperatura. A instrumentação nas camadas granulares foi montada evitando o contato entre esses sensores e os agregados maiores que 5 mm.

Posteriormente, foi importante compactar com cuidado o solo removido anteriormente, a fim de restaurar a superfície plana. Após a colocação dos sensores, tomou-se o cuidado de cobri-los com uma camada de 1 cm de uma areia de rio (Fig. 8a) e utilizar o rolo estático na primeira passagem do equipamento para compactação das camadas e do subleito, a fim de evitar danos nos sensores. Com esses cuidados, não ocorreu nenhuma falha dos sensores durante a construção. Os *TDRs* foram instalados na borda do pavimento, após a construção dos trechos, buscando, dessa forma, resguardá-los (Fig. 8b). A Figura 9 mostra a posição dos sensores em relação às camadas do pavimento e ilustra a vista superior dessa instrumentação.

Figura 8 – Exemplo da montagem dos sensores.



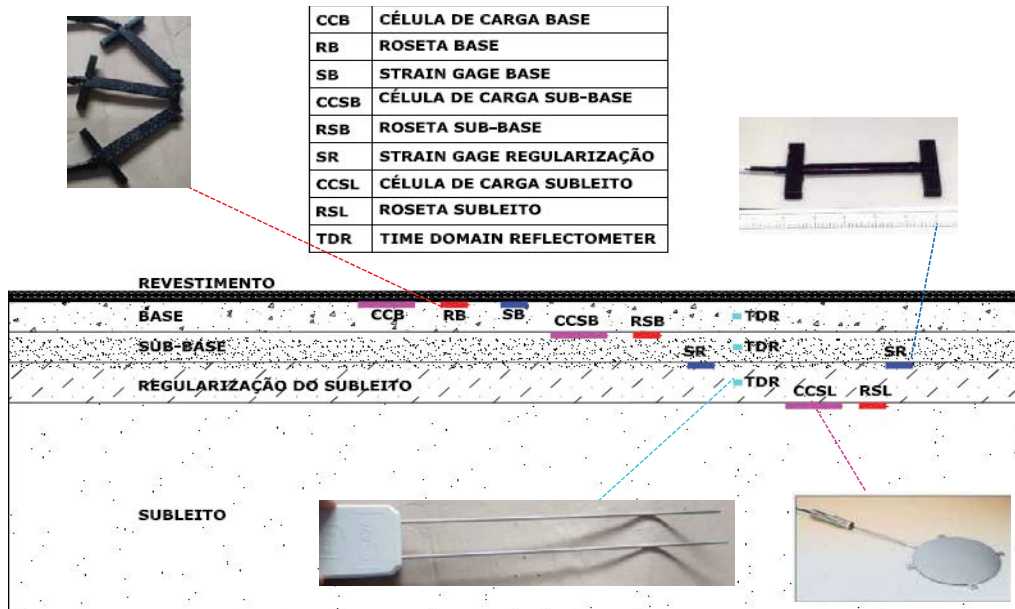
a) Instalação durante a construção



b) Instalação dos *TDRs* após a construção

Fonte: Autores (2019).

Figura 9 – Posições dos sensores em cada camada.



Fonte: Autores (2019).

Após a execução das camadas granulares (Figs. 10a, 10b e 10c), executou-se a imprimação da camada de base com asfalto diluído do tipo CM (Cura Média) - 30 na taxa de 1,0 L/m². Após 6 meses da execução da imprimação, os 2 revestimentos foram executados. Antecedendo a construção dos revestimentos, aplicou-se na estrutura imprimada uma pintura de ligação (Fig. 10d), utilizando-se uma emulsão asfáltica na taxa de 0,6 L/m².

Para construção dos revestimentos, a empresa Insttale Engenharia produziu os CAs. Após a produção, esses CAs seguiram em caminhões basculantes até o local da obra. A aplicação da mistura asfáltica pela vibro-acabadora (Fig.10e) foi acompanhada pela compactação por um rolo compactador de pneus (Fig. 10g). O último conjunto de sensores foi instalado após o lançamento da mistura asfáltica pela vibro-acabadora e antes da compactação (Fig. 10f). Em seguida, prosseguiu-se com a compactação com rolo liso (Fig. 10h).

Figura 10 – Etapas construtivas dos trechos. (Continua)



a) Compactação do subleito

b) Construção da sub-base

Figura 10 – Etapas construtivas dos trechos. (Conclusão)



c) Construção da camada de base



d) Aplicação da pintura de ligação



e) Aplicação dos CAs



f) Instrumentação sob revestimento



g) Compactação com rolo de pneu



h) Compactação com rolo liso

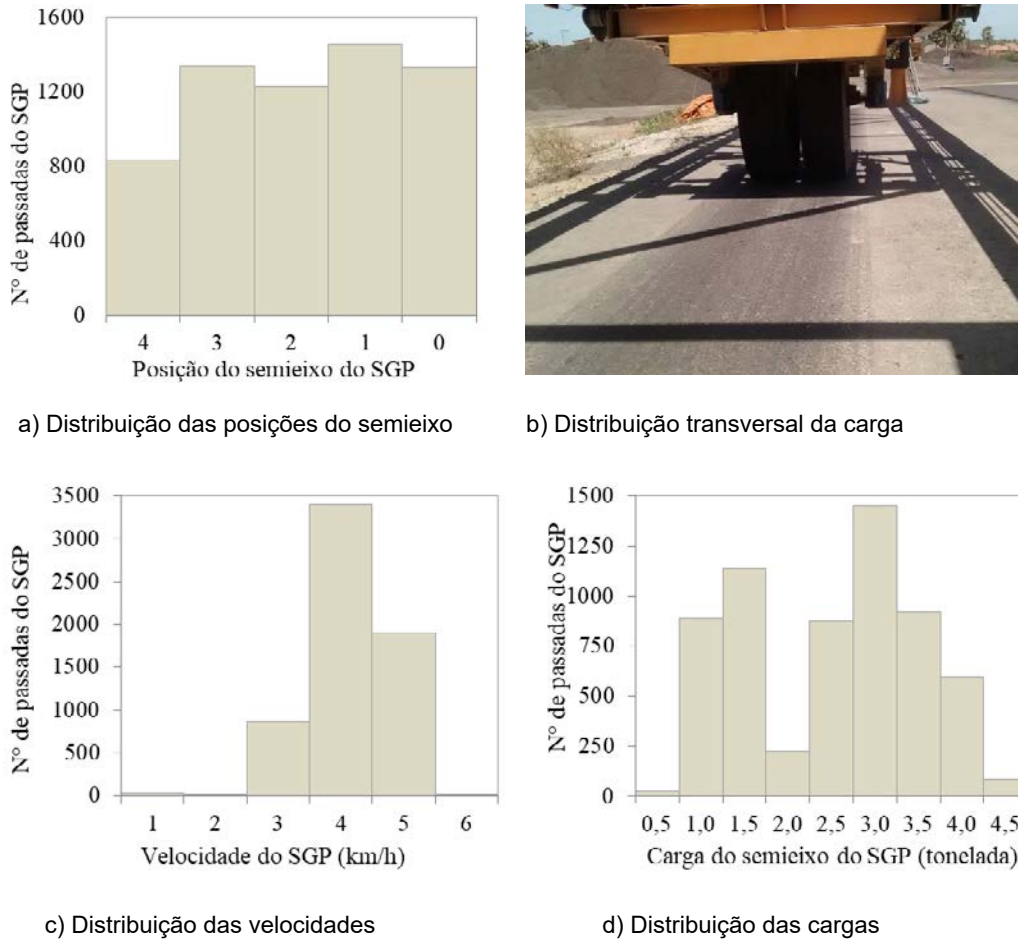
Fonte: Autora (2019).

Destaca-se que esta é a primeira pesquisa na região Nordeste utilizando tais ferramentas simultaneamente (instrumentação e simulador de grande porte) em pavimentos flexíveis. Ressalta-se que Matos (2015), em Sergipe, estudou a variação de danos ao pavimento semirrígido a partir das respostas obtidas por células de pressão. Nesta pesquisa, além de células de pressão, foram utilizadas células de deformação, umidade e temperatura, sob aplicação do SGP. O SGP foi utilizado até atingir 6.195 passadas, sob diferentes posições do semieixo (Figs. 11a e 11b), velocidade (Fig. 11c) e carga (Fig. 11d); e a instrumentação foi responsável por apresentar a pressão, deformação, umidade e temperatura da estrutura do trecho I.

Para testar o SGP em diferentes posições e para evitar o tráfego canalizado, a partir do ponto central (posição 2) (Fig. 11b), o semieixo foi deslocado para direita (posições 3 e 4) ou para esquerda (posições 1 e 0), 5 cm para cada posição. De forma semelhante e buscando ainda acelerar as falhas nos pavimentos em um tempo reduzido, buscou-se utilizar as maiores velocidades e cargas do SGP. A fim de minimizar problemas

mecânicos, verificou-se que o SGP deve ser usado até 4 km/h e sob a carga de 4 toneladas. Para cargas e velocidades maiores, o equipamento precisa aumentar o espaço disponível para frenagem, o que evitaria impactos à estrutura do SGP.

Figura 11 – Características dos ensaios com o SGP.

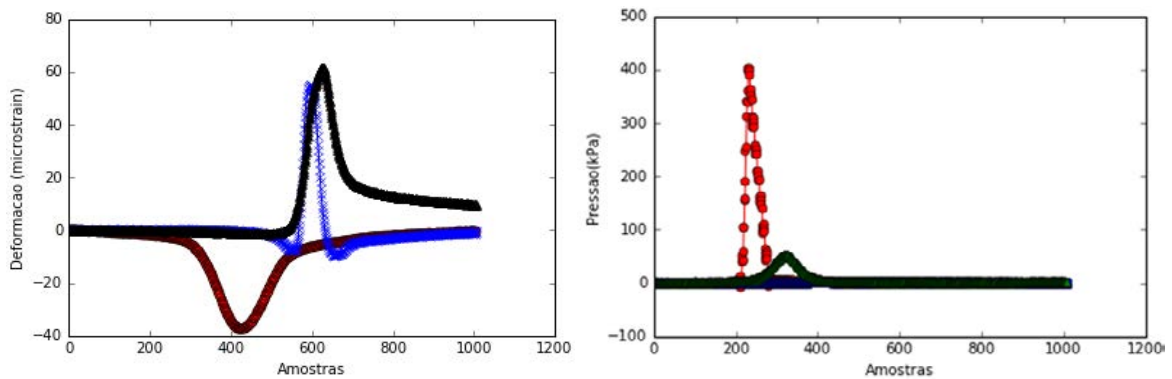


Fonte: Autores (2019).

Quanto aos sensores, destaca-se que, apesar dos sensores terem resistido à fase de construção dos pavimentos, etapa considerada crítica, apenas 3 (esses integram a roseta do topo da camada de base e foram aplicados na última etapa construtiva, juntamente com a execução do revestimento do trecho) dos 12 extensômetros estavam íntegros quando se iniciaram os ensaios com o SGP (após 3 meses da execução dos revestimentos asfálticos). Dessa forma, os sensores de deformação apresentaram taxa de perda de 75%. Os 2 extensômetros Jewell, mais robustos (resistência de 350 Ω) e mais caros, estão entre os sensores que não resistiram ao tempo da pesquisa.

A Figura 12a exemplifica as deformações registradas pela roseta, instalada na face inferior do revestimento, nas direções longitudinal (Fig. 12a - azul), transversal (Fig. 12a - vermelho) e a 45° (Fig. 12a - preto), sob a passagem do semieixo do SGP. De forma semelhante, a célula de carga da face inferior da base apresentou-se danificada (Fig. 12b azul) quando foram iniciados os ensaios com o SGP (Fig. 12b). Além disso, após avaliar os dados desses sensores, foi possível perceber que a célula de carga sob o revestimento (Fig. 12b - vermelho) estava com mau contato, de modo que ora apresenta o pulso de carga, ora não.

Figura 12 – Registro das deformações e pressões no trecho I, sob SGP.



a) Deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico

b) Pressões nas partes inferiores do revestimento asfáltico e da regularização do subleito

Fonte: Autores (2019).

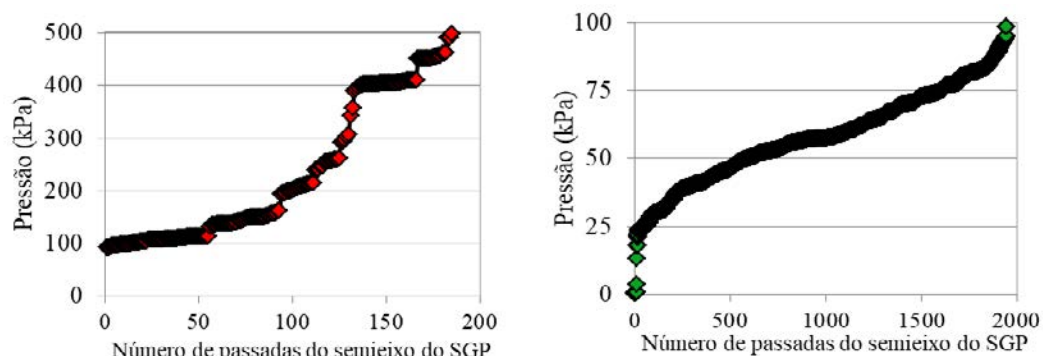
Essas medições foram efetuadas em um período de 30 segundos, tempo superior para que o SGP completasse uma passada completa nos trechos, e permitiram determinar os valores de pressão e deformação. As Figuras 13a e 13b apresentam as pressões na parte inferior do revestimento asfáltico e da regularização do subleito, respectivamente. Os valores máximos de pressão vertical nesses pontos, para as diferentes velocidades (Fig. 11c), cargas (Fig. 11d) e posições do semieixo (Fig. 11a), foram de cerca de 500 e 100 kPa, respectivamente.

Esses resultados são corroborados por Fernandes Jr. (1994) e Bastos (2013). Os autores realizaram análises numéricas considerando a pressão de um eixo simples com rodas duplas, com uma carga por eixo de 8,2 t e com pressão de enchimento de 560 kPa (80 psi), uniformemente distribuída sobre uma superfície de carregamento circular. Além disso, nesta pesquisa, através da análise no CAP3D (HOLANDA *et al.*, 2006), foram obtidos os estados de tensão na fibra inferior do revestimento (361 kPa) e no topo do subleito (26 kPa), considerando as camadas elásticas lineares.

Apesar dos resultados das análises se mostrarem dentro dos intervalos obtidos em campo, as diferenças observadas são atribuídas principalmente às hipóteses simplificadoras citadas, que não representam fielmente a realidade de campo. Fernandes Jr. (1994) recomendou mais estudos e investimentos em pesquisas experimentais, tendo vista a dificuldade do conhecimento dos efeitos cumulativos do tráfego.

Contudo algumas observações podem melhorar a eficácia das análises, como usar modelos constitutivos que traduzam melhor as condições dos módulos elásticos dos materiais das camadas que sejam dependentes do estado de tensões, carregamentos nas mesmas áreas de contato, frequência e temperatura observadas em campo.

Figura 13 – Pressões no pavimento instrumentado.



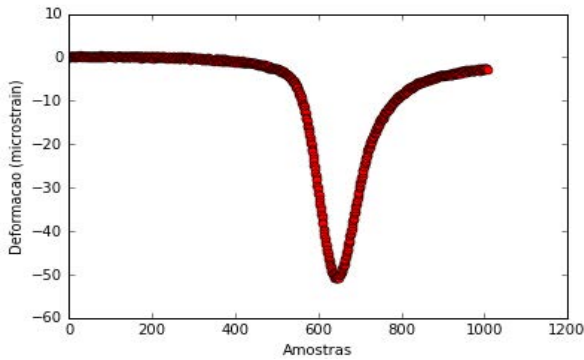
a) Parte inferior do revestimento

b) Parte inferior da regularização do subleito

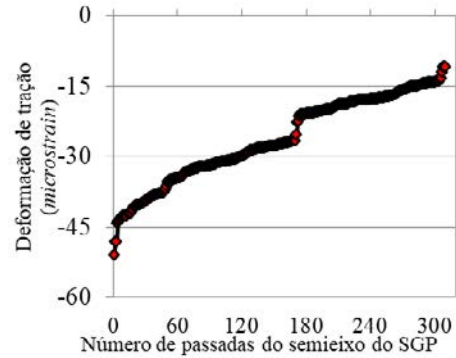
Fonte: Autores (2019).

A Figura 14a mostra o pulso de deformação no extensômetro transversal ao semieixo e a Figura 14b, os valores mínimos de deformação no pulso desse extensômetro. Sob as condições apresentadas na Figura 14, o trecho I apresentou deformação de tração máxima na parte inferior do revestimento asfáltico de $51 \mu\epsilon$. Na Figura 14c tem-se um exemplo do pulso de deformação no extensômetro longitudinal, assim como os valores dos picos máximos e mínimos desses pulsos (Fig. 14d), sendo $60 \mu\epsilon$ (compressão) e $40 \mu\epsilon$ (tração), respectivamente. O extensômetro posicionado a 45° (Fig. 14e) exibiu o mesmo valor ($60 \mu\epsilon$) de tração e compressão (Fig. 14f).

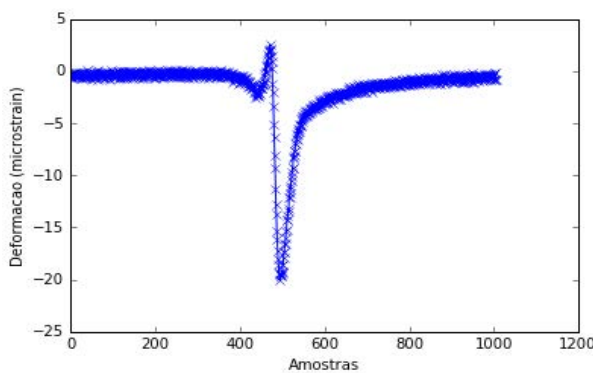
Figura 14 – Pulsos e deformações na parte inferior do revestimento no trecho I.



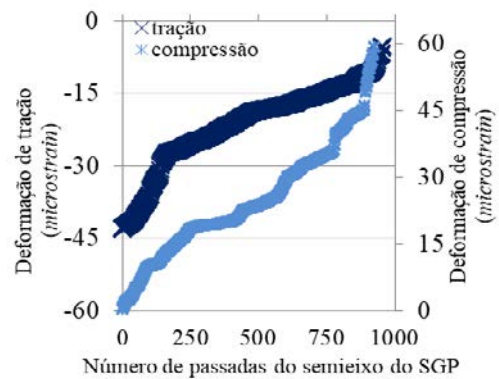
a) Pulso no extensômetro transversal



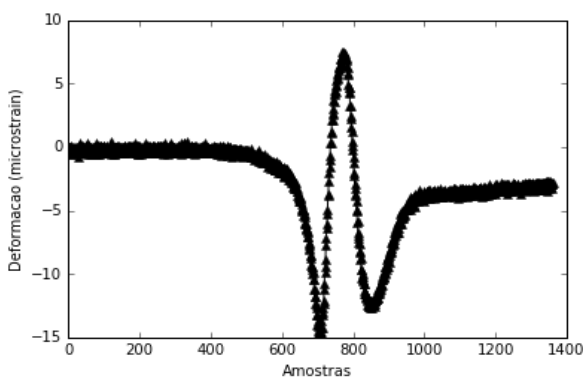
b) Deformação no extensômetro transversal



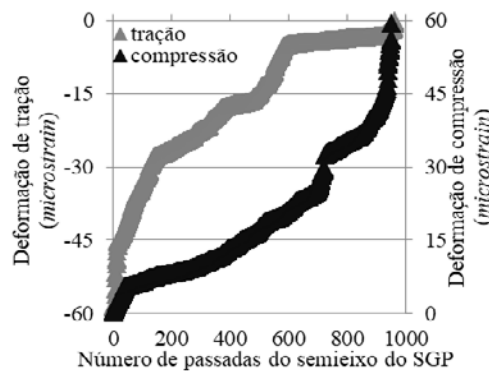
c) Pulso no extensômetro longitudinal



d) Deformação no extensômetro longitudinal



e) Pulso no extensômetro a 45°



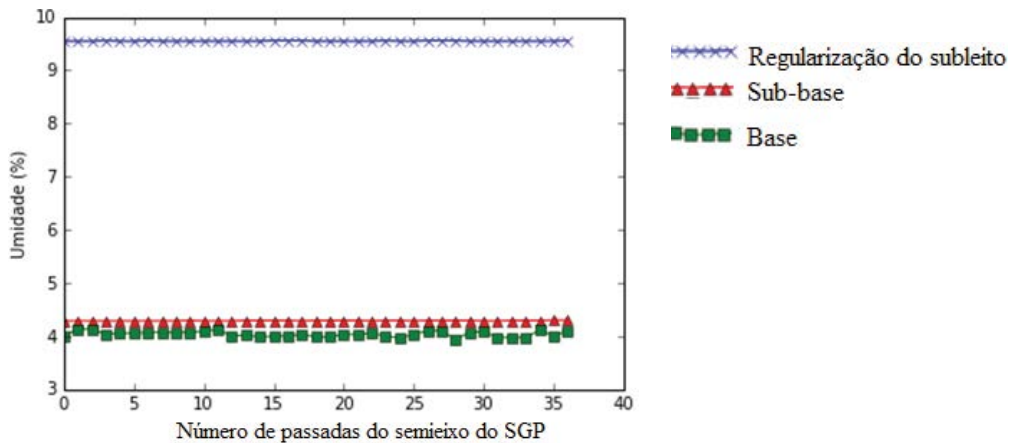
f) Deformação no extensômetro a 45°

Fonte: Autores (2019).

Quanto aos sensores de umidade (*TDRs*), a Figura 15 apresenta as umidades obtidas no meio das camadas de regularização do subleito (9,5%), da sub-base (4,0%) e da base (4,3%). Verifica-se que as camadas próximas ao revestimento (base e sub-base) apresentaram umidade cerca de 4% abaixo da umidade ótima. Isso ocorre tendo em vista a aproximação desses materiais ao revestimento asfáltico, que durante o dia tem a sua superfície com temperaturas de cerca de 60°C.

Quanto aos sensores de temperatura, a utilização dos termopares permitiu conhecer as temperaturas em toda a estrutura do pavimento ao longo do experimento. A Figura 16 exemplifica a variação da temperatura com a profundidade da estrutura e ao longo de um dia de ensaio. Dos 12 termopares utilizados, 10 permaneceram intactos durante toda a pesquisa.

Figura 15 – Exemplos de umidades na estrutura do trecho I.

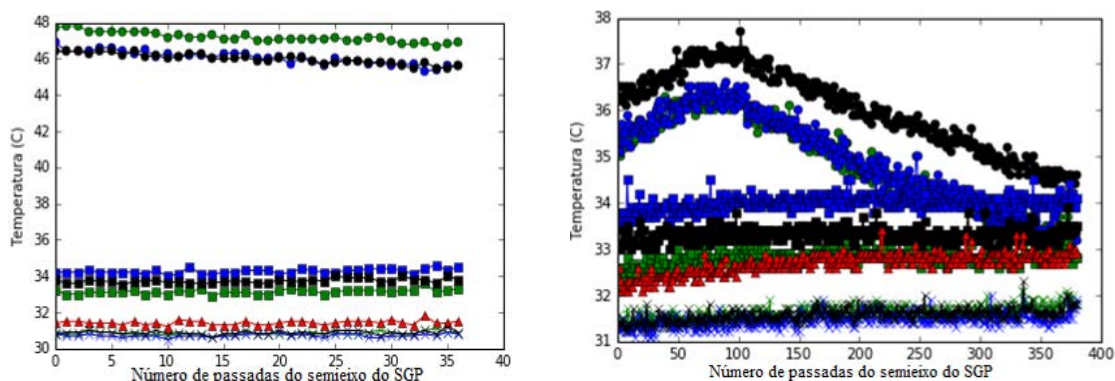


Fonte: Autores (2019).

De forma semelhante ao apresentado na Figura 16, os ensaios realizados ao longo dos meses de outubro e novembro de 2016, com temperatura média do ar máxima e mínima de 30,5°C e 25°C, respectivamente, mostraram que, à medida que se aprofunda em direção ao subleito da estrutura do pavimento, as temperaturas vão diminuindo, o que já era esperado. Verificou-se que as temperaturas médias (com base em 3 termopares; exceto para a camada de regularização do subleito, em que a medição da temperatura foi realizada por apenas 01 termopar) na parte inferior da regularização do subleito, da sub-base, da base e do revestimento foram cerca de 31, 32, 33 e 40°C, respectivamente. Além disso, é possível perceber a mudança da temperatura média na parte inferior do revestimento ao longo do dia, variando de 33 a 47°C. Isto mostra a importância de um método de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos que considere a rigidez das misturas asfálticas por meio da caracterização pelo ensaio de módulo dinâmico e, portanto, sob diferentes temperaturas.

Observa-se, ainda, a pertinência das temperaturas utilizadas nos ensaios *TSS* [considera as temperaturas de 17, 37 e 47°C (máxima)] e uniaxial de carga repetida (60°C), contemplando as temperaturas que ocorrem na parte inferior do revestimento asfáltico do trecho instrumentado.

Figura 16 – Temperaturas na estrutura do trecho I.



×Fibra inferior da regularização ΔFibra inferior da sub-base □Fibra inferior da base ○Fibra inferior do revestimento

Fonte: Autores (2019).

5 Considerações finais

Para esta pesquisa foram construídos 2 trechos experimentais submetidos ao simulador de grande porte (SGP), sendo 1 trecho instrumentado. A instrumentação e o monitoramento dos trechos tornou possível conhecer *in situ* o comportamento de um pavimento asfáltico típico do Ceará. Por meio dos termopares foi possível perceber a concordância das temperaturas utilizadas em ensaio como o módulo dinâmico, que considera as temperaturas de até 54,4°C (máxima), e uniaxial de carga repetida (60°C), contemplando as temperaturas que ocorrem na parte inferior do revestimento asfáltico do trecho instrumentado.

Os sensores de umidade indicaram que as camadas próximas ao revestimento (base e sub-base) apresentaram umidades cerca de 4% abaixo da umidade ótima. Os extensômetros e as células de carga permitiram determinar os valores de deformação e pressão, mostrando que essa tecnologia permite identificar os principais processos que convergem para a queda do desempenho estrutural dos pavimentos após a sua abertura ao tráfego.

Destaca-se que o que se julgava um desafio, isto é, a sobrevivência de sensores na construção, foi atingindo nesta pesquisa quase que integralmente, tendo em vista que 75% dos sensores sobreviveram à etapa de construção. No entanto, isto não ocorreu na fase de monitoramento, em que ocorreu uma taxa de perda elevada. Isto reforça a necessidade de utilizar uma quantidade maior de extensômetros ou a seleção de sensores mais reforçados, já que é comum a elevada taxa de perda durante a construção e/ou vida de serviço dos pavimentos. Assim, como recomendações, incentiva-se o prosseguimento da coleta de dados por meio da instrumentação em campo, algo ainda incipiente no país. Além disso, aponta-se o cuidado durante a construção do pavimento, no posicionamento correto dos sensores, incluindo a angulação e a nivelção desses instrumentos, além da compactação das camadas.

Referências

- ALBANO, J. F. **O efeito dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. 2005. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- CERATTI, J. A. P. **Análise de estrutura de pavimento da rodovia BR-290/RS através de ensaios acelerado**. Projeto de Pesquisa CONCEPA – LAPAV. Relatório Final. Porto Alegre, 2007.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas** - DNER ME 049. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com o emprego do “Speedy”** - DNER ME 052. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – percentagem de betume** - DNER ME 053. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – análise granulométrica por peneiramento** - DNER ME 080. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do limite de plasticidade** - DNER ME 082. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solo – determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia** - DNER ME 092. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito** - DNER ME 122. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas** - DNER ME 162. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico** - DNIT ES 031. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência** - DNIT ME 134. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.
- FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. 327 f. Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos 1994.
- FRITZEN, M. A. **Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego na rodovia Rio Teresópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- GONÇALVES, F. J. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 2002. 506 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- HOLANDA, A. S. *et al.* Finite element modeling of flexible pavements. *In*: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27. 2006. **Anais [...]**. Belém: CILAMCE 2006. p. 1-14.
- JOHNSON, A.; CLYNE, T. R. e WOREL, B. J. **MnROAD Phase II Construction Report**. Saint Paul: Minnesota Department of Transportation, 2009.
- LEANDRI, P. *et al.* **Appropriate and reliable use of pavement instrumentation on in-service roads**. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements. Los Angeles, California: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013. p. 1424-1433.
- LOULIZI, A. *et al.* Data collection and management of the instrumented Smart Road flexible pavement Sections. **Transportation research record**: journal of the transportation research board, Washington, v. 1769, issue 1, p. 142-151, 2001.

- MATOS, L. J. S. **Análise de tensões verticais em estrutura de pavimento semirrígido instrumentado sob carregamento variado**. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.
- MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- NEGRÃO, D. P. **Contribuição para calibração de curva de evolução de afundamentos em trilha de roda de revestimentos asfálticos com utilização de resultados obtidos de simulador de tráfego em escala real**. 2012. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- NÚÑEZ, W. P.; *et al.* Um estudo experimental sobre os afundamentos nas trilhas de rodas de pavimentos delgados com basaltos alterados. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 10-29, 1999.
- PINELO, A. (2017). A Geotecnia no ciclo de vida das infraestruturas de transporte. **Revista Geotecnia**, Lisboa, Vol. 139, p. 99-131.
- SILVA, P. D. E. A. e MOTTA, L. M. G. Instrumentação da pista circular experimental do IPR/DNER. **Rev. Transportes**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 29-46, 1999.
- VALE, A. F. **Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos**. 2008. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- VAN DEUSEN, D. A.; NEWCOMB, D. E. e LABUZ, J. F. **A review of instrumentation technology for the Minnesota Road Research Project**. 1992. 120 f. Federal Highway Administration Report No. FHWA/MN/RC-92/10, Minnesota: University of Minnesota, 1992.
- WICKBOLDT, V. S. **Ensaio acelerados de pavimentos para avaliação de desempenho de recapamentos asfálticos**. 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Sobre os autores

Juceline Batista dos Santos Bastos

Doutora em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE). Possui experiência em Engenharia Estrutural, principalmente em alvenaria estrutural. Atua na área de Engenharia de Transportes, com ênfase em Infraestrutura de Transportes, desempenhando atividades nos seguintes temas: projeto, construção e monitoramento de pavimentos asfálticos; dosagem e caracterização mecânica de misturas asfálticas; análise e dimensionamento de pavimentos.

Jorge Barbosa Soares

Diretor de inovação da Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (FUNCAP) desde 2015. Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (1991). Mestrado (1994) e PhD (1997) em Engenharia Civil pela *Texas A&M University*. É professor titular da Universidade Federal do Ceará (UFC), já foi coordenador de pós-graduação, chefe do Departamento de Engenharia de Transportes e também diretor de pesquisa do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). Coordena o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Caracterização de Materiais para Infraestrutura (INCT-Infra). É diretor da *International Society for Asphalt Pavements*, integra a Comissão de Asfalto do IBP/ABNT desde 2003, é editor associado da Revista Transportes, da ANPET, é membro do corpo editorial do *International Journal of Road Materials and Pavement Design* e é revisor das principais revistas internacionais da área de pavimentação.

Recebido em: 07.04.2019

Aceito em: 02.05.2019