ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO NOS PÁTIOS DE AERONAVES NAS REGIÕES SUL E SUDESTE DO BRASIL

U. B. MARTINEZ
Mestranda
Universidade Federal do Espírito Santo
Espírito Santo; Brasil
uli_martinez1@hotmail.com

J. L. Calmon
Professor e Pesquisador
Universidade Federal do Espírito Santo
Espírito Santo; Brasil
calmonbarcelona@gmail.com

RESUMO

Fissuras no pavimento de concreto diminuem sua durabilidade e aumentam os custos com manutenção. O clima da região influencia consideravelmente na distribuição de temperatura no pavimento, variando também as tensões resultantes do gradiente de temperatura combinado com as cargas das aeronaves. Para evitar a fissuração é necessário um estudo do comportamento termomecânico do pavimento para a região em que será construído, com o objetivo do aumento da vida útil e redução de custos com manutenção. O objetivo desse artigo é avaliar o comportamento termomecânico resultante do aumento de temperatura na superfície do pavimento devido às condições climáticas da região (temperatura ambiente e radiação solar) e do peso próprio de aeronaves das regiões sul e sudeste do Brasil. O método dos elementos finitos foi utilizado para avaliar as tensões resultantes das diferentes condições de contorno e solicitações impostas ao pavimento As análises térmicas com o modelo numérico foram realizadas através do software ANSYS®/Multiphysic 15.0 e as análises termomecânicas foram realizadas através do software EverFe 2.23. Como resultado foi obtido que as tensões de origem térmica representam uma parcela significativa em relação às tensões totais e que a distribuição das tensões para um mesmo pavimento é sensível ao clima em que se encontra.
Palavras-chave: Durabilidade. Pavimentos de concreto. Aeroporto. Empenamento térmico. Comportamento termomecânico.

ABSTRACT

Concrete pavement cracks reduce its durability and raise maintenance costs. The climate of each region influences considerably the temperature distribution on the pavement, which also varies the stresses resulted of the temperature gradient combined with airplane loads. In order to avoid cracking it is necessary the study of the thermomechanical behavior of the pavement for the region of construction with the goal of raise the lifespan and reduction of maintenance costs. The purpose of this article is to analyze the pavement behavior due to the temperature rise on the surface due climate conditions of the region (ambient temperature and radiation) and self-weight of aircrafts of the south and southeast regions of Brazil. The finite elements method was used to evaluate tensile stresses resulted from different boundary conditions and loads applied on the pavement. The simulations with the numerical model were performed using ANSYS®/Multiphysic 15.0 software and the thermal-structural simulations were performed using EverFe 2.23 software. The results have shown that the thermal stresses represent a significant parcel of the total stress and the stress distribution on the pavement is sensible to the climate.
Keywords: Durability. Concrete pavements. Airport. Thermal curling. Thermomechanical behavior.

1. INTRODUÇÃO

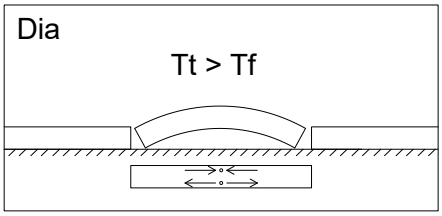
São considerados pavimentos rígidos os pavimentos constituídos de uma laje de concreto apoiada em uma sub-base estável. Balbo (2009) define pavimentos de concreto como aqueles que utilizam concreto na camada de revestimento ou de rolamento. Segundo a Federal Aviation Administration (2009), a superfície de concreto de um pavimento rígido de aeroporto deve ser antiderrapante, deve prevenir a infiltração de água para a sub-base, suportar as cargas dos aviões, deve ser firme, estável, livre de detritos soltos e resistir às ações climáticas. Os pavimentos de concreto simples (PCS), objeto de estudo dessa pesquisa, são caracterizados por não serem armados, ou seja, são constituídos por placas de concreto e podem ou não conter barras de transferência, as quais são responsáveis pela distribuição do cerregamento entre placas interligadas.

Os pavimentos de concreto estão sujeitos à variação de temperatura e umidade que resultam em variação de volume no concreto, empenamentos das lajes e em acréscimo de tensão nas placas. Com o objetivo de reduzir as tensões, a laje é dividida em uma série de placas, do mesmo tamanho sempre que possível, através das juntas (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009). Então, as juntas entre placas tem o objetivo do controle da fissuração devida à retração, ao empenamento e à dilatação térmica (OLIVEIRA, 2000) .

Westergaard (1926 apud SEVERI, 2002) foi o pioneiro na análise do empenamento térmico em pavimentos de concreto. Ele verificou que as tensões térmicas eram responsáveis pelas fissuras em pavimentos que não haviam sido liberados ao tráfego e publicou seu primeiro trabalho sobre o tema em 1926 (SEVERI, 2002). O empenamento térmico está diretamente relacionado com a magnitude e a distribuição do gradiente térmico ao longo da profundidade do pavimento. Essa distribuição de temperaturas, por sua vez, está relacionada com o clima da região onde o pavimento foi construído, sendo influenciada pela radiação solar, velocidade do vento e temperatura ambiente, além das propriedades térmicas do concreto.

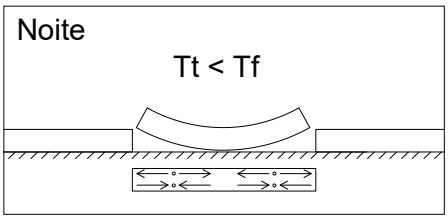
O gradiente de temperatura entre topo e fundo do pavimento é responsável pela curvatura do empenamento. No período diurno, o gradiente de temperatura é positivo visto que a temperatura do topo é maior que a do fundo do pavimento. Nessa situação há uma dilatação do topo e uma contração do fundo. Esse movimento é restringido pelo peso próprio do pavimento e então, são induzidas tensões de compressão no topo e de tração no fundo do pavimento, como mostra a figura 1. No período noturno a situação é oposta e ocorrem tensões de tração no topo e compressão no fundo do pavimento (figura 2).

Figura 1 - Empenamento diurno de placas de concreto



Fonte: Severi, 2002.

Figura 2 - Empenamento noturno de placas de concreto



Fonte: Severi, 2002.

As tensões de origem térmica representam uma parcela significativa das tensões totais atuantes no pavimento e são dependentes, principalmente, da temperatura ambiente e da radiação solar. Esses parâmetros ambientais variam de acordo com a localização do aeroporto e dada à relevância, é prudente que sejam levados consideração para estimativa das tensões térmicas.

Esse artigo tem o objetivo de demonstrar que as tensões de origem térmica variam de acordo com a região, considerando pavimentos com características idênticas. Para isso, será realizado um comparativo das regiões sul e sudeste do Brasil, representadas pelas cidades de Porto Alegre (Rio Grande do Sul) e Vitória (Espírito Santo).

2. METODOLOGIA

De forma a alcançar o objetivo desse artigo que é a comparação das tensões de origem térmica de duas cidades de regiões distintas do Brasil, deverão ser realizadas análises numéricas em elementos finitos. No primeiro momento, faz-se as análises térmicas transientes, as quais utilizam as temperaturas ambientes e valores de radiação solar de cada município como condições de contorno. Para essas análises será utilizado o software ANSYS®/Multiphysic, Versão 15.0 (2014). O resultado dessas análises são os gradientes máximos positivos e máximos negativos em relação a cada município. Os gradientes encontrados na primeira etapa são dados de entrada na segunda etapa, a qual se realiza análises termo estruturais cujas condições de contorno são o peso próprio de aeronave, o peso próprio do pavimento e o gradiente térmico. Como resultado da segunda etapa, tem-se as tensões internas no pavimento dos municípios de Porto Alegre e Vitória. Com os resultados obtidos, prossegue-se com a comparação entre os municípios.

3. ANÁLISE TÉRMICA

Após os estudos pioneiros de Westergaard (1926 apud SEVERI, 2002), o tema foi estudado por diversos autores como Bradbury (1938 apud SEVERI, 2002) e Barber (1957 apud SEVERI, 2002). Então, as tensões de origem térmica começaram a ser incorporadas no dimensionamento de pavimentos (SEVERI, 2002). O tema continua em estudo e várias pesquisas já foram publicadas como os artigos dos autores: Martinez e Calmon (2017), Mackiewicz (2014), Nam, Yeon e Behring (2014), Kim, Park e Jeong (2013), Tsubokawa, Mizukami e Saitou (2011), Belshe Et al. (2011) e Severi (2002). É consenso entre os pesquisadores que as tensões de origem térmica são significativas e devem ser levadas em consideração no dimensionamento dos pavimentos.

No Brasil, a pesquisa pioneira de Severi (2002) com orientação do professor Tadeu Balbo investigou os gradientes térmicos em pavimentos de concreto no ambiente tropical. Os estudos mostraram que o tipo de clima influencia o gradiente térmico e as temperaturas máximas e mínimas nos pavimentos rígidos. Nesse sentido, torna-se importante que as tensões sejam estudadas por regiões climáticas para que sejam estimadas com maior precisão. No dimensionamento, estas tensões são combinadas com o carregamento devido ao tráfego de aeronaves para o cálculo das tensões totais de tração e de compressão.

3.1. Modelo numérico

A mesma geometria e propriedades foram utilizadas nas análises das duas capitais. O modelo em duas dimensões consiste em uma seção transversal de uma placa de um pavimento com 6,0m de comprimento, composto de uma camada de concreto de 0,25m de espessura, uma base cimentada de 0,10m de espessura e a sub-base com 0,70m. O software ANSYS®/Multiphysic, Versão 15.0 (2014) foi utilizado para a modelagem em elementos finitos, foi escolhido o elemento PLANE77 e foi realizada uma análise transiente durante o período de um ano, com *time-step* de uma hora. No total foram 8760 *time-steps* e uma malha de 8929 nós. A tabela 1 contém o resumo das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais utilizados. As propriedades térmicas do concreto, da base e sub-base são provenientes da pesquisa de Qin (2016) e as propriedades densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da pesquisa dos autores Kim, Park e Jeong (2013). O objetivo desta análise é conhecer os gradientes críticos de temperatura ao longo da espessura, para que seja considerado no cálculo das tensões no pavimento.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico

Parâmetro	Concreto	Base	Sub-base
Condutividade Térmica (W/mK)	2,50	1,30	0,85
Calor Específico (J/kg.K)	1000	800	750
Densidade (kg/m³)	2500	2200	2000
Módulo de Elasticidade (MPa)	27600	3448	176
Coeficiente de Poisson	0,20	0,20	0,35

3.2. Carregamento e condições de contorno

Os parâmetros ambientais foram considerados na análise transiente. Foi definida uma equação para cada mês do ano e foram implementadas no ANSYS® como temperatura ambiente. Essas equações foram formuladas por Agullo (1991) e descrevem a temperatura ambiente diária em forma de uma função senoidal dependente da temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) diária e os horários que ocorrem, sendo h_{max} o horário da máxima temperatura e h_{min} o horário da mínima. A equação (1) representa a formulação do autor para a temperatura ambiente diária e as equações (2) a (5) representam os parâmetros utilizados na equação (1).

$$T=A\ sen\left(2\pi.\frac{t-b_1}{2b_2}\right)+B \quad (1)$$

Onde:

$$A=\frac{T_{max}-T_{min}}{2} \quad (2)$$

$$B=\frac{T_{max}+T_{min}}{2} \quad (3)$$

$$b_1=\frac{h_{max}+h_{min}}{2} \quad (4)$$

$$b_2=h_{max}-h_{min} \quad (5)$$

A equação (1) foi aplicada aos municípios de Porto Alegre e Vitória. As temperaturas máximas e mínimas médias mensais de Porto Alegre foram coletadas no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017) e de Vitória no Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2016). As figuras 3 e 4 ilustram a distribuição diária de temperatura dos meses de fevereiro, junho, agosto e outubro em Porto Alegre e Vitória, respectivamente. Nota-se que Porto Alegre possui temperaturas mais baixas e menor amplitude térmica ao longo do dia.

Figura 3 - Distribuição diária de temperatura em Porto Alegre - Brasil

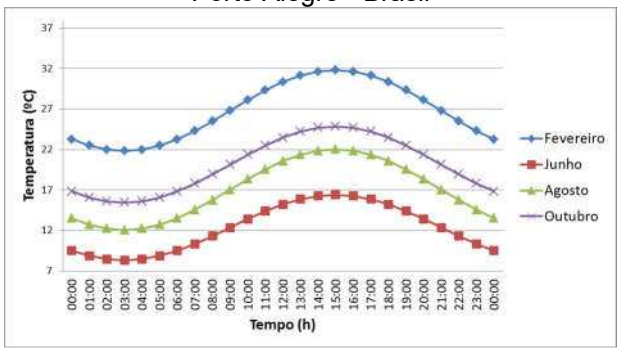
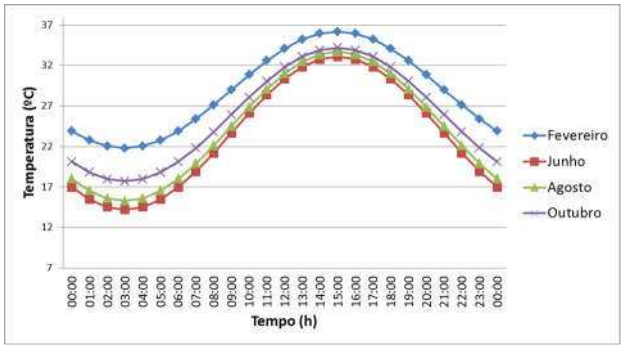


Figura 4 - Distribuição diária de temperatura em Vitória - Brasil



A intensidade de radiação solar (I(t)) foi implementada como uma função senoidal (equação 6, EMERSON, 1973 apud CALMON, 1995) variando no tempo (t) e cujos valores de radiação global diária (W) e insolação (T_0), por mês, foram extraídos do Atlas Solarimétrico do Brasil (2000). Durante a noite não há radiação solar e durante o dia a radiação aumenta segundo uma senoide.

$$I(t)=\frac{2W}{T_0}sen^2\left(\frac{\pi.t}{T_0}\right) \quad (6)$$

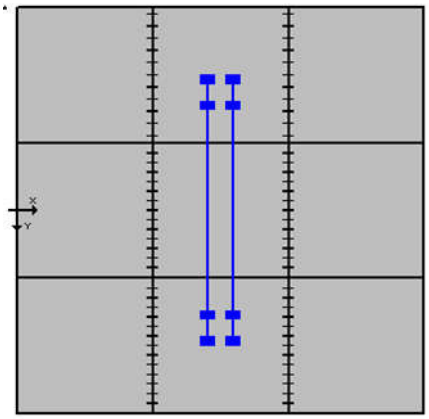
4. ANÁLISE TERMO TENSIONAL

O software EverFe 2.23 foi utilizado para as análises termomecânicas do pavimento. Esse software foi desenvolvido pela Universidade de Maine, nos Estados Unidos da América, especificamente para simulações de cargas de eixos e gradientes térmicos em pavimentos de concreto. Também é possível a modelagem de bases, sub-bases, barras de transferência, juntas e barras de ligação. Os gradientes podem ser desde lineares até trilineares ao longo da profundidade do pavimento. O efeito térmico é considerado com uma pré-deformada em que as deformações são convertidas em vetores de forças nodais e são subtraídos das deformações totais durante o cálculo das tensões internas. Como resultado, o programa fornece as distribuições de tensões e deslocamentos e também modela a deformada do pavimento.

4.1. Modelo numérico

Para ambas as análises o modelo numérico é idêntico. O modelo utilizado é composto de nove placas com dimensões de 6x6m e três camadas, a primeira de concreto com 0,25m, uma base cimentada de 0,10m de espessura e a sub-base com 0,70m. As propriedades dos materiais estão descritas na tabela 1. O modelo também contempla barras de transferência de 510mm de comprimento e 40mm de diâmetro espaçadas em 460mm ao longo das juntas transversais. A figura 5 ilustra a configuração das placas, barras de transferência e o carregamento devido ao tráfego.

Figura 5 - Planta baixa do modelo utilizado na análise termo tensional



4.2. Carregamento

Os dados do BOEING 767-300, retirados do documento do próprio fabricante, foram utilizados como carregamento na análise. A aeronave é composta de rodas tandem duplas cuja distância entre eixos é de 9,30m. O peso da aeronave, de acordo com o fabricante, varia entre 143789 kg e 154221 kg. Na modelagem foi considerado o peso de 150000 kg, sendo que os eixos modelados suportam 95% dessa carga. Não foram consideradas na análise as rodas dianteiras já que são responsáveis por apenas 5% do peso da aeronave (KIM, PARK E JEONG, 2013). O carregamento foi posicionado no centro das placas para a análise tensional.

O EverFe (2003) permite que seja implementado o gradiente térmico na análise. É possível modelar gradientes lineares, bilineares e trilineares através da espessura do pavimento. De acordo com o autor Tsubokawa et al. (2011), quanto maior a não linearidade do gradiente térmico, maiores são as tensões internas. Por esse motivo optou-se proceder com as simulações utilizando gradientes trilineares. Foram escolhidas as temperaturas nas profundidades de 0,0m, -0,075m, -0,175m e -0,25m. Os gradientes máximos encontrados para as cidades de Porto Alegre e Vitória foram simulados nas análises termo tensionais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise térmica

O objetivo da análise térmica é a verificação dos gradientes de temperaturas que ocorrem no pavimento devido às condições ambientais locais. Esse artigo considerou as temperaturas máximas e mínimas por mês dos municípios de Porto Alegre – Rio Grande do Sul e Vitória - Espírito Santo. Para o município de Porto Alegre, o maior gradiente térmico positivo ocorreu em janeiro com uma diferença de temperatura entre topo e fundo do pavimento de 4,29ºC e o maior gradiente térmico negativo ocorreu no mês de julho com o valor de -2,81ºC. Em Vitória, o maior gradiente térmico positivo ocorreu no mês agosto com o valor de 9,45ºC e o mês de junho apresentou o maior gradiente térmico negativo com o valor de -4,98ºC. As figuras 6 e 7 ilustram a variação das temperaturas da superfície e do fundo do pavimento ao longo de um ano nos dois municípios. As temperaturas constantes no gráfico correspondem ao dia 15 de cada mês do ano às 13:00h. As figuras 8 e 9 ilustram a distribuição de temperaturas ao longo da profundidade da placa em diferentes horários do dia 15/01 em Porto Alegre e 15/08 em Vitória, datas de ocorrência dos maiores diferenciais térmicos.

Figura 6 - Variação da temperatura no topo e no fundo do pavimento ao longo de um ano em Porto Alegre – RS

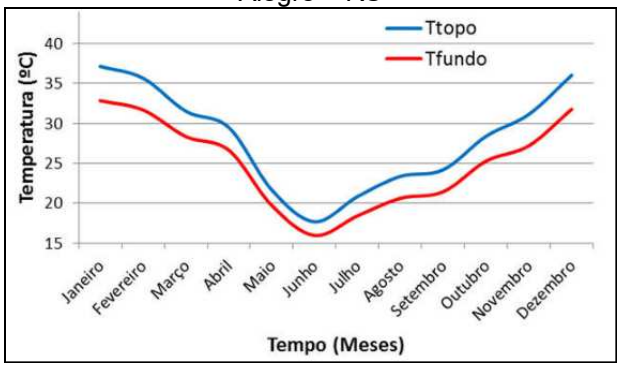


Figura 7 - Variação da temperatura no topo e no fundo do pavimento ao longo de um ano em Vitória – ES

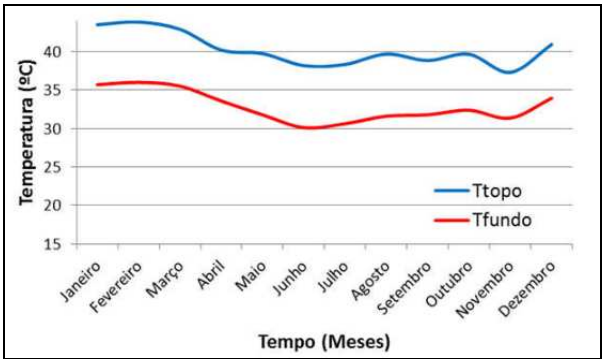


Figura 8 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade em diferentes horários do dia 15/01 em Porto Alegre-RS

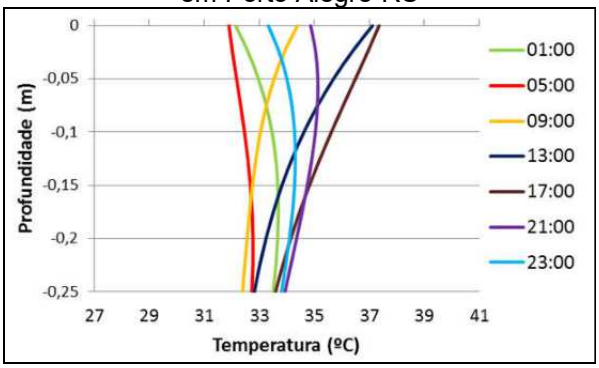
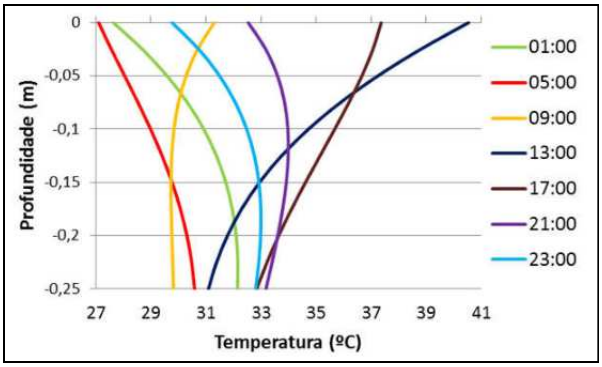


Figura 9 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade em diferentes horários do dia 15/08 em Vitória-ES



As figuras 10, 11, 12, 13 ilustram a variação diária de temperatura na superfície e no fundo do pavimento e a variação diária de radiação implementadas na análise para os meses de fevereiro e agosto. Nota-se que entre 6h e 8h da manhã o gradiente de temperatura alterna de negativo para positivo e entre 20h e 22h o gradiente retorna a ser negativo. Esse comportamento também foi observado nas pesquisas de Severi (2002) e Tsubokawa et al. (2011) e pode ser explicado pelo ciclo da radiação solar. Ao receber o calor devido à radiação solar durante o dia, a superfície do pavimento é aquecida aumentando sua temperatura, todavia, como o material concreto possui baixa condutibilidade térmica, o fundo do pavimento demanda maior tempo de aquecimento e assim surge o gradiente térmico positivo. Durante a noite, a situação é invertida, pois não há incidência de radiação solar. O fundo do pavimento se encontra aquecido devido ao

calor recebido durante o dia e demanda tempo de resfriamento devido à baixa condutividade térmica do concreto. A superfície, por outro lado, perde calor para o ambiente rapidamente e atinge temperaturas mais baixas que a temperatura do fundo, surgindo então, o diferencial térmico negativo.

Figura 10 - Variação da temperatura diária do topo e fundo do pavimento para o mês de fevereiro em Porto Alegre-RS

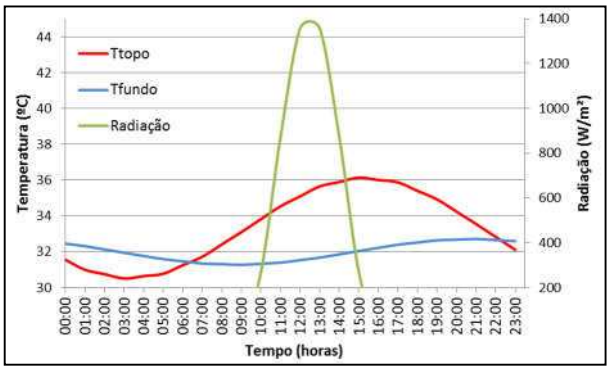


Figura 11 - Variação da temperatura diária do topo e fundo do pavimento para o mês de fevereiro em Vitória-ES

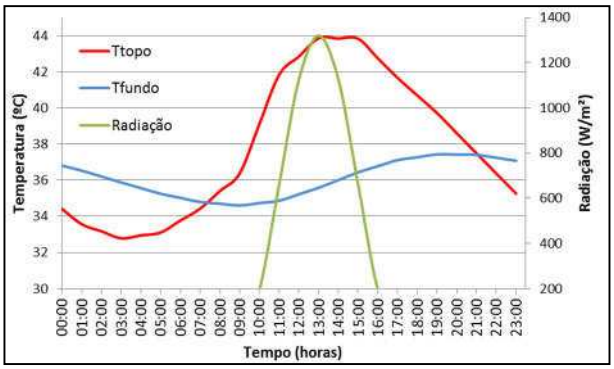


Figura 12 - Variação da temperatura diária do topo e fundo do pavimento para o mês de agosto em Porto Alegre-RS

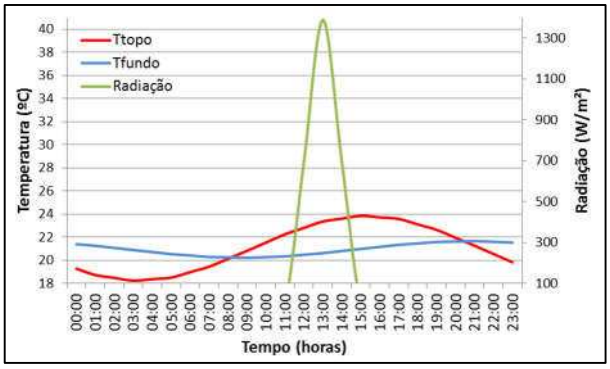
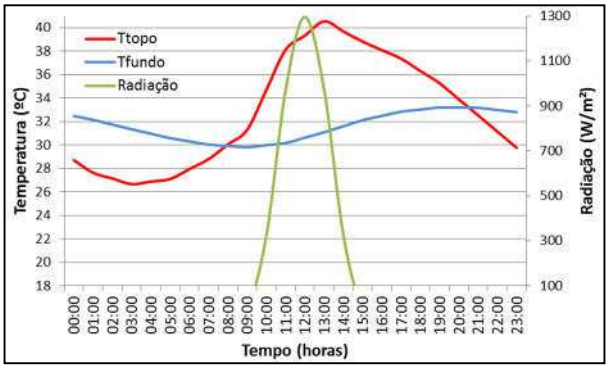


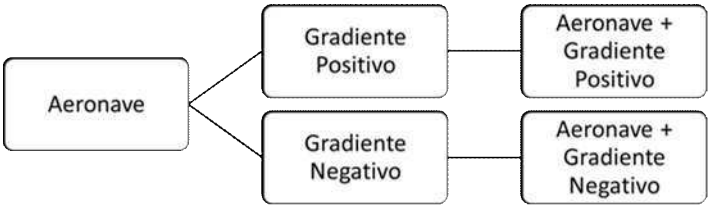
Figura 13 - Variação da temperatura diária do topo e fundo do pavimento para o mês de agosto em Vitória-ES



5.2. Análise termo tensional

O objetivo da análise termo tensional é a avaliação das máximas tensões atuantes no pavimento devido à ação combinada do carregamento ambiental e tráfego de aeronaves. Essa análise foi realizada através do software EverFe 2.23 no qual a simulação do carregamento ambiental é introduzido através do gradiente térmico e do tráfego de aeronaves através de carregamentos distribuídos nas regiões de contato das rodas com o pavimento. Nesse artigo o carregamento devido ao tráfego de aeronaves é o peso próprio de um BOEING 767-300 distribuído por suas rodas durante o taxiamento. O peso próprio do pavimento também foi considerado nas análises. A figura 14 contém o fluxograma dos carregamentos considerados nas análises.

Figura 14 - Fluxograma dos carregamentos considerados nas análises termo tensionais



Os resultados com o carregamento devido somente ao tráfego apontaram que as tensões mais significativas estão concentradas no fundo do pavimento. Para o BOEING 767-300 estas tensões principais de tração atingem valores de até 3,59Mpa nas proximidades das rodas, como mostra a figura 15. Na superfície do pavimento (figura 16) a tensão máxima de tração é de 0,481 MPa.

No artigo dos autores Martinez e Calmon (2017) foram verificadas diversas combinações de carregamento e foi concluído que as máximas tensões ocorrem devido ao efeito combinado do gradiente térmico positivo e do peso próprio da aeronave e podem atingir valores acima do limite de resistência a tração do concreto, o que implica em fissuração do pavimento.

Nesse artigo, para um mesmo pavimento, foram então simulados a combinação de carregamento devido ao peso próprio do BOEING 767-300 e os gradientes positivos máximos encontrados para os municípios de Porto Alegre (4,29ºC) e Vitória (9,45ºC), considerando que essa é a combinação que resulta em maior tensão de tração.

Como esperado, as análises mostraram que as máximas tensões de tração encontradas foram no fundo do pavimento devido à combinação do peso próprio da aeronave e do gradiente térmico positivo. A tensão máxima de tração obtida no fundo do pavimento para Porto Alegre foi de 4,04MPa (figura 17), um aumento de 12,53% comparado com o carregamento devido somente ao tráfego (figura 15). Em Vitória, a máxima tensão de tração encontrada no fundo do pavimento foi de 4,56MPa (figura 18), um acréscimo de 27,02% foi obtido considerando os efeitos do clima, comparado com o carregamento no fundo do pavimento devido somente ao tráfego (figura 15).

Nos gráficos das figuras 3 e 4 é possível notar que o município de Vitória possui maior amplitude térmica ao longo do dia quando comparado a Porto Alegre, o que explica a diferença expressiva entre os gradientes térmicos das duas cidades. Para Vitória, no mês de agosto, o qual ocorre o maior gradiente térmico positivo (9,45ºC), o valor da diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima é de 18,4ºC. Enquanto Porto Alegre, no mês de janeiro, o qual ocorre o maior gradiente térmico positivo (4,29ºC), a diferença entre a temperatura máxima e mínima é de 10,7ºC.

Os resultados confirmam que na medida em que se aumenta a diferença de temperatura entre topo e fundo do pavimento, maiores serão as tensões de tração. Esse resultado está em conformidade com a pesquisa desenvolvida por Tsubokawa et al. (2011), a qual também mostra que a espessura do pavimento é inversamente proporcional às tensões, para um mesmo diferencial térmico e que as tensões são sensíveis ao posicionamento da aeronave. Nas análises desenvolvidas para esse artigo, as maiores tensões foram encontradas com a centralização das rodas da aeronave nas placas do pavimento, como mostra a figura 5.

Figura 15 - Distribuição das tensões principais na superfície do pavimento devido somente ao peso próprio da aeronave

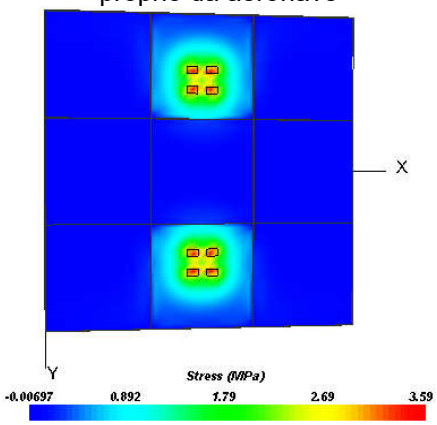


Figura 16 - Distribuição das tensões principais no fundo do pavimento devido somente ao peso próprio da aeronave

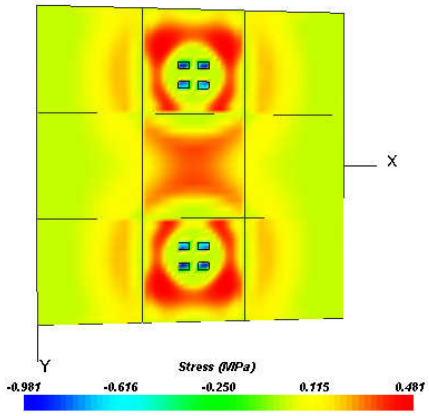


Figura 17 - Distribuição de tensões principais no fundo do pavimento devido ao gradiente térmico positivo + peso próprio da aeronave em Porto Alegre – RS

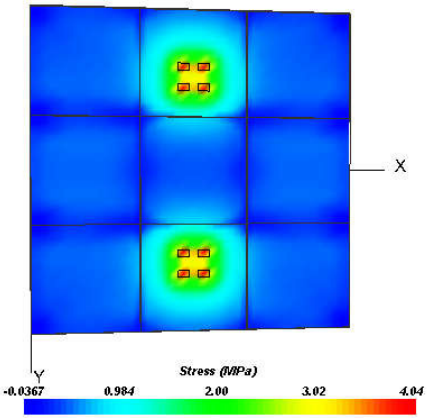
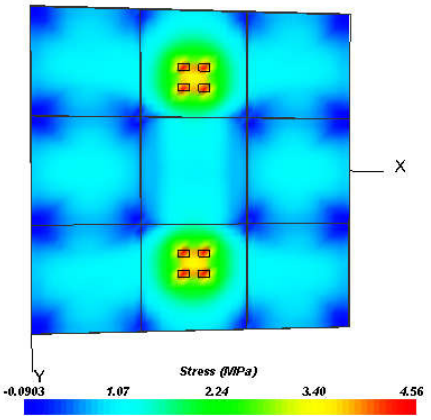
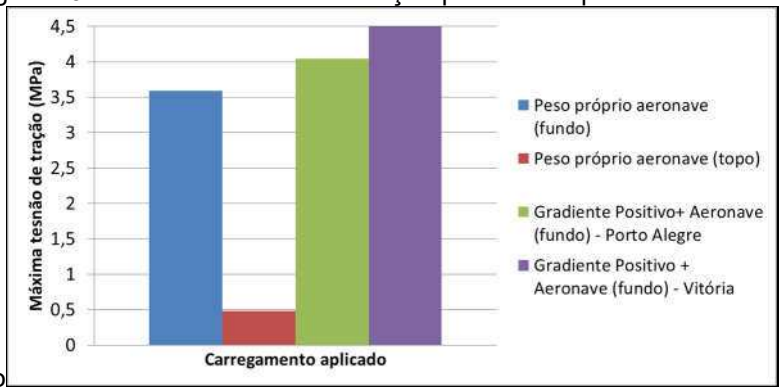


Figura 18 - Distribuição de tensões principais no fundo do pavimento devido ao gradiente térmico positivo + peso próprio da aeronave em Vitória - ES



A figura 19 contém o gráfico com o resumo das máximas tensões encontradas para os diferentes tipos de carregamento analisados. A tensão máxima de tração encontrada foi devida à combinação do carregamento do peso próprio da aeronave e o máximo gradiente positivo de temperatura encontrado para as localidades de Porto Alegre e Vitória. O município de Vitória apresentou a maior tensão de tração entre as simulações realizadas, fato esse que se relaciona com a maior amplitude térmica diária quando comparado com o município de Porto Alegre.

Figura 19 - Máximas tensões de tração para cada tipo de carregamento



6. CONCLUSÃO

O objetivo desse artigo é o comparativo entre as tensões de origem térmica em dois municípios de regiões diferentes, Porto Alegre no sul e Vitória no sudeste. Para isso foram realizadas em um primeiro momento duas análises térmicas do pavimento com as temperaturas e valores de radiação solar de cada município, as quais resultaram nos gradientes térmicos máximos. Na segunda etapa foram realizadas as análise termo tensionais as quais utilizaram como dados de entrada os gradientes térmicos e o peso próprio de aeronave. O resultado da segunda etapa são as tensões internas no pavimento para cada município.

O objetivo da primeira etapa das análises foi alacançado e como resultado foram aencontrados os gradientes máximos para cada município. Em Porto Alegre foi obtido o máximo gradiente térmico positivo com o valor de 4,29ºC e em Vitória, o máximo gradiente térmico positivo foi de 9,45ºC. A diferença de valores entre os dois municípios ocorre principalmente pelo fato da maior amplitude térmica diária de Vitória, a qual resulta em gradientes maiores. Enquanto em Porto Alegre a diferença entre a temperatura máxima e mínima no mês de janeiro, o qual ocorre o maior gradiente térmico positivo (4,29ºC), é de 10,7ºC. Enquanto Vitória, no mês de agosto, o qual ocorre o maior gradiente térmico positivo (9,45ºC), é de 18,4ºC. O gradiente positivo ocorre no período diurno com aquecimento da superfície do pavimento. De forma oposta o gradiente negativo ocorre no período noturno no qual não há incidência de radiação solar. A mudança do gradiente negativo para o positivo nessa pesquisa ocorreu entre as 6h e 8h da manhã independente do mês e do município. A radiação solar desempenha papel fundamental na mudança de sentido da curvatura do empenamento das placas do pavimento, pois aquece as superfícies no período diurno.

O pavimento hipotético em Porto Alegre com carregamento ambiental devido a um gradiente de temperatura positivo de 4,29ºC e o carregamento devido ao peso próprio de um BOEING 767-300 foi analisado através do software EverFe (2003). Os resultados das análises mostraram que a máxima tensão de tração encontrada foi devida a combinação do gradiente térmico positivo e o peso próprio da aeronave no fundo do pavimento (4,04MPa). Em Vitória, nessa etapa da análise, utilizando o gradiente positivo máximo encontrado de 9,45ºC e o peso próprio do BOEING 767-300, a máxima tenão foi encontrada no fundo do pavimento com o valor de 4,56MPa.

As tensões de tração no pavimento são responsáveis pela fissuração e consequente redução da vida útil do pavimento. Estas tensões devem ser previstas e comparadas com a resistência à tração do concreto. Para tensões maiores que a resistência é necessária uma revisão do dimensionamento do pavimento. Como visto, as tensões são inversamente proporcionais à espessura da placa, portanto, pode-se aumentar a espessura caso a tensão de tração encontrada ultrapasse a resistência do concreto.

O artigo mostrou que os gradientes térmicos e principalmente, as tensões de origem térmica variam sensivelmente com a região em que o pavimento está localizado. Além disso, ficou claro que as tensões de origem térmica representam uma parcela significatica das tensões totais e não devem ser desprezadas no dimensionamento do pavimento, como no caso de Vitória, onde as tensões de origem térmica elevaram em 27,02% as tensões de tração no pavimento quando comparado com a análise onde somente o peso próprio do pavimento e da aeronave foram considerados.

Portanto, é necessário estudo das condições climáticas locais para previsão dos gradientes térmicos críticos e das tensões de tração máximas no pavimento devido às condições ambientais e o tráfego. A previsão desses parâmetros permite o dimensionamento correto, evitando manifestações patológicas, como a fissuração, e redução da vida útil do pavimento.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte financeiro para realização desta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

AGULLO, L. **Estudio termico en presas de hormigon frente a la accion térmica ambiental**. Barcelona: Tesis Doctoral – Universitat Politectènica de Catalunya (UPC), 1991.

ANSYS – Engineering Analysis System. Versão 15.0. Swanson Analysis Systems, 2014.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL: banco de dados solarimétricos /coordenador Chigueru Tiba et al.. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2009.

BELSHE, M., MAMLOUK, M. S., KALOUSH, K. E., RODEZNO, M. Temperature Gradient and Curling Stresses in Concrete Pavement with and without Open-Graded Friction Course. **Journal of Transportation Engineering**, v. 137, n. 10, pp. 723-729, 2011.

CALMON, J. L. **Estudio térmico y tensional em estructuras masivas de hormigón.** Barcelona: Tesis Doctoral – Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 1995.

EverFE. Versão 2.23. University of Maine, 2003. Disponível em: <https://civil.umaine.edu/everfe-2/> Acessado em 23 de dezembro de 2016.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Circular AC 150/5370-10**. Washington: 2009.

INCAPER Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Boletim agroclimático de Vitória. 2016. Available: http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/ ?pagina=vitoria_bol [citado 02 de Outubro de 2016].

INMET Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, 2017. Available: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep [citado 01 de Novembro de 2017].

KIM, S., PARK, J., JEONG, J. Effect of Temperature-induced Load on Airport Concrete Pavement Behavior. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, pp. 182-187, 2013.

MACKIEWICZ, P. Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. **Applied Thermal Engineering,** v. 73, pp. 1169-1176, 2014.

MARTINEZ, U. B., CALMON, J. L. Efeito Combinado dos Gradientes de Temperatura e Carga das Aeronaves no Comportamento Termomecânico de Pavimentos de Concreto. Análise nos Pátios de Aeroportos. **Anais do XIV Congresso latino-americano de patologia das construções CONPAT 2017**, Assunção, Paraguai, 2017.

MOREIRA, A., CALMON, J.L. Barragens de concreto submetidas à ação térmica ambiental. Análise da barragem Llosa del Cavall. **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções CBPAT2016**. Porto Alegre - RS: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES (ALCONPAT-BRASIL), v. 1. p. 707-718, 2016.

Nam, B. H., Yeon, J. H., Behring, Z. Effect of daily temperature variations on the continuous deflection profiles of airfield jointed concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 73, pp. 261-270, 2014.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. São Carlos, São Paulo: Tese (Mestre em Engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, 2000.

QIN, Y. Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar absorption and reciprocal thermal inertial. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 97, pp. 391–399, 2016.

Severi, A. A. **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical**. São Paulo: Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. .

TSUBOKAWA, Y., MIZUKAMI, J., SAITOU, Y. Study on effects of nonlinear distribution and slab thickness on thermal stress of airport concrete pavement, **7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology**, 2011. Disponível em <www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kukou/sisetu/pdf/201108b.pdf> Acessado em 15 de agosto de 2016.