

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ULIANE BORTOLOTI MARTINEZ

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
TERMOMECÂNICO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO EM
PÁTIOS DE AERONAVES**

VITÓRIA

2018

ULIANE BORTOLOTI MARTINEZ

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
TERMOMECÂNICO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO EM
PÁTIOS DE AERONAVES**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil na Área de
Concentração de Construção Civil da
Universidade Federal do Espírito Santo,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz
Calmon Nogueira da Gama

VITÓRIA

2018

ULIANE BORTOLOTI MARTINEZ

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
TERMOMECÂNICO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO EM
PÁTIOS DE AERONAVES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Área de Concentração de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Fábio M.B. Zorzal
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Prof. Dr. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Prof. Dr. Marcel Olivier Ferreira de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todo amor e bênçãos em minha vida.

O despertar para a pesquisa científica aconteceu em 2010 quando então o Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon me convidou para participar da iniciação científica como sua orientanda. Desde então, foram muitas horas de estudo, reuniões, artigos e apresentações que culminaram nessa dissertação. Então, meu agradecimento especial vai ao meu grande mestre e amigo: o Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon, quem me ensinou a pesquisar e a sempre buscar o conhecimento, independente das dificuldades. O senhor é exemplo de dedicação e competência, além do coração enorme que possui.

Agradeço também ao meu amado marido Vitor, quem esteve sempre ao meu lado, me incentivando e ajudando a concluir mais essa etapa. Agradeço pelas vezes que não me sentia capaz e suas palavras e carinho me davam forças para continuar. Muito obrigada!

Agradeço também minha família, principalmente, meus pais Sandra e Francisco e minha irmã Raiane, os quais são responsáveis por minha formação profissional e pessoal e por me ensinar a sempre buscar o meu melhor. Amo vocês, obrigada.

A jornada só é possível quando temos pessoas que nos amam por perto. Por isso, também agradeço a minha família de coração, meu sogro e sogra, Penha e Rodney, meus cunhados e meus amigos pelos momentos de apoio, de diversão e de carinho que foram essenciais para seguir em frente.

Agradecimentos especiais à equipe da INFRAERO responsável por gerenciar as operações do aeroporto Eurico de Aguiar Salles, a qual autorizou a pesquisa de campo no pátio de aeronaves deste aeroporto.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para essa pesquisa.

RESUMO

As tensões devidas a gradientes térmicos representam uma parcela significativa em relação às tensões totais em pavimentos de concreto de cimento Portland nos pátios de aeronaves em aeroportos. Dada a importância do assunto, várias pesquisas foram realizadas com o intuito de verificar a influência climática no empenamento térmico de pavimentos de concreto. Esse trabalho tem como objetivo realizar uma ampla abordagem acerca do comportamento termomecânico dos pavimentos de concreto em pátios de aeroportos expostos ao tráfego de aeronaves e ações ambientais. Foram comparados os diferenciais térmicos e tensões no pavimento das cinco regiões brasileiras representadas pelas capitais Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina, levando em consideração a temperatura ambiente, radiação solar e o agregado graúdo mais utilizado em cada região. Análises paramétricas também foram realizadas de forma a verificar a influência de cada parâmetro nos diferenciais térmicos e nas tensões do pavimento. As simulações térmicas com o modelo numérico foram realizadas através do software ANSYS®/Multiphysic (Versão 15.0) e a simulação estrutural através do software EverFE (versão 2.23). O método dos elementos finitos foi utilizado para avaliar os diferenciais térmicos, os deslocamentos e tensões resultantes das diferentes condições de contorno e solicitações impostas ao pavimento. Os resultados indicam que as condições climáticas exercem grande influência na distribuição de temperatura no pavimento: os maiores gradientes térmicos são positivos e não lineares, as maiores tensões são encontradas no fundo do pavimento devido à combinação do carregamento térmico e mecânico. Outro fator de grande relevância encontrado é o tipo de agregado graúdo utilizado no traço do concreto, o qual influencia nas propriedades termomecânicas do material e, por consequência, nos valores dos gradientes térmicos e tensões.

Palavras-chaves: Pátio de aeroportos, diferenciais térmicos, pavimentos de concreto, tensões térmicas, elementos finitos, efeitos climáticos.

ABSTRACT

Thermal stresses due to thermal gradients represent a significant parcel of the total stresses in Portland cement concrete pavements in airport aprons. By the noteworthiness of this theme, many researches have been done with the aim to verify the climate influence on the thermal curling of concrete pavements. The main objective of this research is to do a broad approach of the thermomechanical behavior of concrete pavements of airport aprons due to the aircrafts traffic and ambient conditions. There were compared the thermals differentials and stresses on the pavement of five Brazilian's regions represented for its capitals Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina. There were taken into consideration the ambient temperature, solar radiation and the course aggregate most utilized in each region. Parametric analyses were held to verify the influence of each parameter on the thermal differentials and stresses on the pavement. The thermal simulations with the numerical model were done through the software ANSYS®/Multiphysic (Version 15.0) and the structural simulations through the software EverFE (version 2.23). The finite elements method was used to evaluate the thermal differentials, displacements and stresses resulted for the boundary conditions and loads applied to the pavement. The results have shown that the ambient conditions have an important role on the pavement's temperature distribution, the main thermal differentials are positives and non-linear, the greatest stresses are found on the bottom of the pavement due to the combination of thermal and mechanical load. Another relevant point founded is that the type of course aggregate used on the concrete mixture, which plays an important role on the thermomechanical properties of the material and therefore, on the magnitude of thermal gradients and stresses.

Keyword: Airport aprons, termal differetials, concrete pavements, termal stresses, finite elements method, climate.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e justificativa.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Os pátios de aeronaves nos aeroportos.....	5
2.1.1. Pavimentos rígidos para pátios de aeronaves.....	5
2.2. Comportamento Termomecânico dos pavimentos de concreto .	12
2.2.1. Mecanismos de transferência de calor	12
2.2.2. Equação geral de transmissão de calor	16
2.2.3. Parâmetros Térmicos	17
2.2.4. Propriedades térmicas do concreto	20
2.2.5. Propriedades físicas e mecânicas do concreto	24
2.2.6. Estudos Teóricos Clássicos	28
2.3. Pesquisas realizadas na área de análise termomecânica em pavimentos de concreto de cimento Portland.....	34
2.3.1. Estudo de Tsubokawa <i>et al.</i> (2011).....	34
2.3.2. Estudo de Kim, Park e Jeong (2013).....	37
2.3.3. Estudo de Nam, Yeon e Behring (2014).....	40
2.3.4. Estudos de Severi e Balbo (2000; 2002)	42
2.3.5. Termografia aplicada à construção civil	44
3. MODELAGEM NUMÉRICA.....	49
3.1. Método dos Elementos Finitos.....	49

3.2. Etapas para análise utilizando os softwares ANSYS e EverFE ...	50
3.2.1. Conceptualização.....	51
3.2.2. Pré-Processamento	51
3.2.3. Solução.....	52
3.2.4. Pós-processamento	52
3.3. Análise térmica	53
3.3.1. Temperatura ambiente	53
3.3.2. Radiação Solar	57
3.3.3. Calor emitido pelas turbinas das aeronaves.....	58
3.3.4. Modelo Numérico	62
3.3.5. Carregamento e condições de contorno.....	63
3.3. Análise termo tensional	65
3.3.1. Modelo Numérico	66
3.3.2. Carregamento	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1. Temperaturas e diferenciais térmicos observados nas cinco regiões brasileiras	69
4.1.1. Diferenciais térmicos observados ao longo do ano	69
4.1.2. Não linearidade dos diferenciais térmicos	73
4.1.3. Temperaturas no topo e no fundo do pavimento ao longo do dia	76
4.2. Comportamento tensional das placas nas cinco regiões brasileiras	79
4.2.1. Carregamento devido somente ao peso próprio.....	80
4.2.2. Carregamento devido ao peso próprio e ao diferencial térmico positivo.....	81
4.2.3. Carregamento devido ao peso próprio e ao diferencial térmico negativo	86
5. ANÁLISES PARAMÉTRICAS.....	92
5.1. Influência da temperatura ambiente e da radiação solar no diferencial térmico.....	92

5.2. Variação dos parâmetros térmicos, mecânicos e geométricos considerando a cidade de Porto Alegre como referência	94
5.2.1. Condutividade Térmica	95
5.2.2. Módulo de elasticidade	96
5.2.3. Coeficiente de expansão térmica	98
5.2.4. Dimensão da placa	100
5.2.5. Espessura da placa.....	101
5.2.6. Distribuição do diferencial térmico.....	105
6. CONCLUSÕES	108
6.1. Conclusões gerais.....	108
6.2. Comparativo entre as cinco regiões brasileiras.....	109
6.3. Análises Paramétricas	111
6.4. Proposta para futuras pesquisas	113

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - Esquematização da distribuição de cargas em pavimentos rígidos	5
Figura 2-2 - Perfil de um pavimento de concreto simples sem barras de transferência	6
Figura 2-3 - Perfil de um pavimento de concreto simples com barras de transferência	6
Figura 2-4 - Esquema ilustrativo de um PCADD	9
Figura 2-5 - Esquema ilustrativo de um PCCA	9
Figura 2-6 - Esquema ilustrativo de um PCA	11
Figura 2-7 - Empenamento diurno e noturno de placas de concreto	12
Figura 2-8 - Empenamento diurno e ação do peso próprio da placa de concreto	13
Figura 2-9 - a) Típica variação de temperatura diária; b) Típica variação do fluxo de calor devido à radiação solar durante o dia; c) Variação diária de temperatura no pavimento	15
Figura 2-10 - a) Temperatura do ar; b) Radiação solar (QIN, 2016, p. 4)	19
Figura 2-11 - Relação entre o coeficiente de expansão térmica do agregado e do concreto	23
Figura 2-12 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a variação do tipo de agregado e a porcentagem em volume de pasta de cimento.....	24
Figura 2-13 - Relação entre porosidade e resistência à compressão do concreto	25
Figura 2-14 - Comparação da resistência à compressão com a variação da relação a/c e da idade do concreto	25
Figura 2-15 - Resistência à tração em função da resistência à compressão por diversas equações propostas na literatura	26
Figura 2-16 - Relações entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão propostas por diversos autores na literatura	27

Figura 2-17 - Coeficientes de Bradbury.....	31
Figura 2-18 - Distribuição da insolação	33
Figura 2-19 - Planta baixa (a) e seção transversal (b) do pavimento de concreto experimento	35
Figura 2-20 - Mudança diária na tensão térmica do pavimento	35
Figura 2-21 - Seção transversal do modelo numérico	36
Figura 2-22 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento	36
Figura 2-23 - Relação entre o coeficiente de tensão térmica e a espessura do pavimento	37
Figura 2-24 - Modelo numérico em elementos finitos	38
Figura 2-25 – Diagrama de tensões somente com o carregamento devido ao tráfego.....	39
Figura 2-26 - Diagrama de tensões com o gradiente de temperatura e o tráfego considerados.....	39
Figura 2-27 - Máximas tensões de tração para diferentes combinações de carregamento.....	39
Figura 2-28 - Deflexão x Temperatura na superfície do pavimento	41
Figura 2-29 - Deslocamento vertical da placa para diferentes espessuras às 8:00h.....	41
Figura 2-30 - Seções da pista experimental	42
Figura 2-31 - Gráfico com dados meteorológicos e leituras de campo	43
Figura 2-32 - Termografia de uma parede com umidade	45
Figura 2-33 - Detecção de falhas no isolamento de uma parede	46
Figura 2-34 - Fachada salmão com destacamento - imagem real e termografia	46
Figura 2-35 - Termograma de um trecho de pavimento no Aeroporto Internacional de Atenas	47

Figura 3-1 - Fluxograma simplificado das etapas da resolução do MEF	50
Figura 3-2 - Distribuição diária de temperatura em Brasília.....	54
Figura 3-3 - Distribuição diária de temperatura em Manaus	55
Figura 3-4 - Distribuição diária de temperatura em Porto Alegre	55
Figura 3-5 - Distribuição diária de temperatura em São Paulo	56
Figura 3-6 - Distribuição diária de temperatura em Teresina.....	56
Figura 3-7 - Termógrafo FLIR i7 em uso no dia 19/07/2017	59
Figura 3-8 – Termografias registradas a partir do horário de 14:27h: (a) Turbina da aeronave; (b) Pavimento de concreto abaixo da asa da aeronave; (c) Pavimento abaixo da Turbina; (d) Pavimento abaixo da Turbina	60
Figura 3-9 – Termografias registradas antes e depois do estacionamento de uma aeronave. (a) Foto real do local de estacionamento; (b) Termografia do pavimento antes da chegada da aeronave; (c) Termografia do momento da chegada da aeronave; (d) Turbina da aeronave; (e) e (f) pavimento abaixo da turbina da aeronave	61
Figura 3-10 - Planta baixa do modelo utilizado na análise termo tensional	66
Figura 4-1 - Diferenciais térmicos positivos observados ao longo de um ano .	69
Figura 4-2 - Diferenciais térmicos negativos observados ao longo do ano	70
Figura 4-3 - Máximos diferenciais térmicos encontrados.....	71
Figura 4-4 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Brasília.....	73
Figura 4-5 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Manaus	73
Figura 4-6 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Porto Alegre.....	74
Figura 4-7 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – São Paulo	74
Figura 4-8 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Teresina.....	75

Figura 4-9 - Brasília: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro.....	77
Figura 4-10 - Manaus: Comportamento das temperaturas e radiação em outubro.....	77
Figura 4-11 – Porto Alegre: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro.....	78
Figura 4-12 – São Paulo: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro.....	78
Figura 4-13 - Teresina: Comportamento das temperaturas e radiação em outubro.....	79
Figura 4-14 - Fluxograma dos carregamentos considerados nas análises termo tensionais.....	80
Figura 4-15 – Somente peso próprio do pavimento e da aeronave - Tensões máximas no topo.....	80
Figura 4-16 - Somente peso próprio do pavimento e da aeronave - Tensões máximas no fundo.....	80
Figura 4-17 – Brasília: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	83
Figura 4-18 – Manaus: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	83
Figura 4-19 – Porto Alegre: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	84
Figura 4-20 – São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	84
Figura 4-21 – Teresina: São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	85
Figura 4-22 - Comparação das tensões e deslocamentos encontrados com o módulo de elasticidade	86
Figura 4-23 – Brasília: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	88

Figura 4-24 – Manaus: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	88
Figura 4-25 – Porto Alegre: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	89
Figura 4-26 – São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	89
Figura 4-27 – Teresina: São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada	90
Figura 5-1 - Variação do diferencial térmico com a variação da temperatura máxima	93
Figura 5-2 - Variação do diferencial térmico positivo com a variação do ΔT	93
Figura 5-3 - Diferenciais térmicos para diferentes condutividades térmicas	96
Figura 5-4 - Gráfico tensãoxdeformação da análise paramétrica com a variação do módulo de elasticidade – $E = 27605\text{MPa}$ (calcário), $E = 30762\text{MPa}$ (granito) e $E = 36806\text{MPa}$ (basalto)	97
Figura 5-5 - Máximas tensões no topo e no fundo do pavimento com a variação do módulo de elasticidade.....	98
Figura 5-6 - Variação das tensões no topo e no fundo do pavimento com a variação do coeficiente de expansão térmica.....	99
Figura 5-7 - Distribuição das tensões para diferentes valores do coeficiente de expansão térmica – (a): $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; (b): $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; (c): $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;.....	100
Figura 5-8 - Variação das tensões no topo, no fundo e na placa 2x1 com a variação das dimensões da placa de concreto.....	101
Figura 5-8 - Variação das tensões no topo, no fundo e na placa 2x1 com a variação das dimensões da placa de concreto.....	102
Figura 5-10 - Variação do diferencial térmico ao longo do dia 14/12	103
Figura 5-11 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 15 cm	104

Figura 5-12 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 25 cm	104
Figura 5-13 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 35 cm	104
Figura 5-14 - Tensões máximas de tração encontradas para variação da distribuição do diferencial térmico	105
Figura 5-15 - Tensões no fundo do pavimento - Gradiente linear	106
Figura 5-16 - Tensões no fundo do pavimento - Gradiente bilinear	106
Figura 5-17 - Tensões no fundo do pavimento - Gradiente trilinear	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Variação da condutividade térmica com diferentes agregados graúdos.....	20
Tabela 2-2 - Influência da massa específica, grau de saturação e temperatura do concreto no valor do calor específico	21
Tabela 2-3 - Variação do calor específico com o tipo litológico do agregado ..	22
Tabela 2-4 - Variação do coeficiente de expansão térmica utilizado em diversas barragens brasileiras.....	23
Tabela 2-5 - H/C em função de F	34
Tabela 3-1 - Temperaturas máximas e mínimas consideradas nas análises...	57
Tabela 3-2 - Valores de radiação solar global diária e insolação diária por município e por mês.....	58
Tabela 3-3 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico	63
Tabela 4-1 - Diferenciais térmicos e temperaturas críticas encontradas	71
Tabela 4-2 - Resumo das tensões e deslocamentos encontrados	81
Tabela 4-3 - Tensões no topo e no fundo devido aos diferenciais térmicos negativos	86
Tabela 5-1 - Parâmetros utilizados nas análises	92
Tabela 5-2 - Variação dos parâmetros utilizados nas análises paramétricas ..	95

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de expansão térmica
ΔT_0	Variação da temperatura do ar
ΔT	Gradiente térmico
ε_x	Deformação específica na direção X
ε_y	Deformação específica na direção Y
μ	Coeficiente de <i>Poisson</i>
λ	Condutividade térmica
ρ	Massa específica
σ	Tensão de tração na flexão
σ_x	Tensão na direção X
σ_y	Tensão na direção Y
σ_{axial}	Tensão devida a componente de temperatura axial
σ_{emp}	Tensão devida a componente de temperatura que causa empenamento
σ_{nl}	Tensão devida a componente de temperatura não linear
a	Difusividade térmica
c	Calor específico do corpo
C_x e C_y	Coeficientes de Bradbury
DT	Diferencial Térmico
DT^+	Diferencial térmico positivo
DT^-	Diferencial térmico negativo
E	Módulo de elasticidade, módulo de deformação (do CCP)
E_b	Módulo de elasticidade da base
$f_{ct,M}$	Resistência média à tração na flexão do concreto
h	Espessura da placa de concreto
H	Umidade relativa do ar
h	Coeficiente superficial de transmissão de calor
h_b	Espessura da base
H_f	Umidade de fundo (sob a placa de CCP)
I	Intensidade de radiação solar
I_0	Constante solar
k	Módulo de reação do subleito
I	Raio de rigidez relativo da placa de CCP sobre uma fundação de Winkler
M	Momento fletor
M_x	Momento fletor na direção x
M_y	Momento fletor na direção y
NHI	Número de Horas de Insolação
P	Carga por eixo
Q	Carga

R_s Absorção superficial da radiação solar
 s Desvio padrão
 T Temperatura
 t Tempo
 T_0 Variação da temperatura na superfície do pavimento
 T_{0t} Temperatura na superfície do pavimento no instante t
 T_{ar} Temperatura do ar
 T_{axial} Componente de temperatura que causa deslocamentos axiais
 t_c Período de variação de ciclos de temperatura
 T_{emp} Componente de temperatura que causa empenamento
 T_f Temperatura na base da placa
 T_M Temperatura média
 $T_{máx}$ Temperatura máxima efetiva
 T_{nl} Componente de temperatura não linear
 T_R Amplitude de variação senoidal da temperatura do ar no tempo
 T_t Temperatura no topo da placa
 $T_{t,máx}$ Temperatura de topo máxima
 T_V Variação máxima de temperatura do ar em relação à média T_M
 T_{zt} Temperatura na profundidade z no instante t
 v_v Velocidade do vento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e justificativa

Os pavimentos de concreto em pátios de aeronaves nos aeroportos são amplamente utilizados no Brasil e no exterior. Os pavimentos de concreto simples, objeto dessa pesquisa, são divididos em placas através de juntas previamente dimensionadas e podem ou não conter barras de transferência para distribuição do carregamento entre as placas interligadas.

Durante muito tempo, a influência das tensões de origem térmica no empenamento das placas foi ignorada pelos projetistas de pavimentos, porém, após estudos revolucionários de pesquisadores como Westergaard, Bradbury e Barber, essas tensões começaram a ser incorporadas no dimensionamento dos pavimentos de concreto (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.

Levando em consideração os inúmeros fatores climáticos que influenciam no gradiente térmico do pavimento, a pesquisadora Severi (2002) publicou um estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto no ambiente tropical. Os estudos foram realizados em São Paulo e comparados com estudos no clima temperado e mostraram que o clima da região modifica a distribuição das temperaturas no pavimento. Portanto, um estudo do ambiente local deve ser realizado antes da construção do pavimento para que os gradientes previstos sejam incorporados ao dimensionamento das placas.

A presente pesquisa investigará a distribuição de temperaturas no pavimento para as cinco regiões do Brasil, representadas pelas capitais: Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina e o efeito do clima no comportamento termomecânico do pavimento. Também serão realizadas

análises paramétricas com o objetivo de avaliar a influência de cada propriedade nos diferenciais térmicos e tensões.

Outro fator a ser considerado nessa pesquisa é o calor emitido das turbinas das aeronaves. Não há estudos publicados que demonstrem a influência do calor emitido das turbinas no gradiente térmico ao longo da profundidade do pavimento.

1.2. Objetivos

A presente pesquisa tem como objetivo principal realizar uma ampla abordagem acerca do comportamento termomecânico dos pavimentos de concreto em pátios de aeroportos expostos ao tráfego de aeronaves e ações ambientais.

Os objetivos específicos são:

1. Comparar as temperaturas e diferenciais térmicos no pavimento nas cinco regiões brasileiras;
2. Avaliar as tensões atuantes no pavimento devido ao carregamento termomecânico;
3. Verificar a influência das propriedades térmicas, mecânicas e geométricas no comportamento termomecânico do pavimento através das análises paramétricas;
4. Verificar em campo a influência do calor das turbinas quando a aeronave se encontra estacionada após o taxiamento.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação de mestrado será dividida em capítulos, conforme descrição que se segue.

- **Capítulo 1 – Introdução:** Contém a contextualização e justificativa da pesquisa, os objetivos e a estrutura da dissertação.
- **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:** Apresenta a consulta realizada na literatura disponível sobre o assunto, incluindo estudos clássicos sobre o tema e pesquisas recentes.
- **Capítulo 3 – Modelagem Numérica:** Explica, em detalhes, a modelagem numérica da análise térmica e da análise tensional, o que compreende na definição do modelo geométrico, das propriedades dos materiais, das condições de contorno e do carregamento.
- **Capítulo 4 – Resultados e Discussões:** Nesse capítulo estão presentes o comparativo das análises térmicas e tensionais entre as cinco regiões brasileiras e as termografias da visita ao aeroporto Eurico de Aguiar Salles, em Vitória, Espírito Santo.
- **Capítulo 5 – Análises Paramétricas:** São apresentados os resultados das variações dos parâmetros térmicos, geométricos e das condições de contorno na distribuição de temperatura e tensões no pavimento.
- **Capítulo 6 – Conclusões:** Contém o resumo dos principais resultados encontrados nessa pesquisa, os quais foram divididos entre conclusões gerais, comparativo entre as cinco regiões brasileiras e sobre as análises paramétricas.
- **Capítulo 7 – Referências:** Serão mencionadas todas as referências citadas e consultadas, para embasamento desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Os pátios de aeronaves nos aeroportos

2.1.1. Pavimentos rígidos para pátios de aeronaves

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, deve suportar as cargas dos aviões, deve ser firme, estável, livre de detritos soltos e, por fim, deve resistir às ações climáticas. Os pavimentos rígidos possuem grande área de distribuição de carga e, por isso, transmitem menores tensões na fundação do pavimento, conforme ilustra a Figura 2-1.

Figura 2-1 - Esquematização da distribuição de cargas em pavimentos rígidos



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013, p. 4

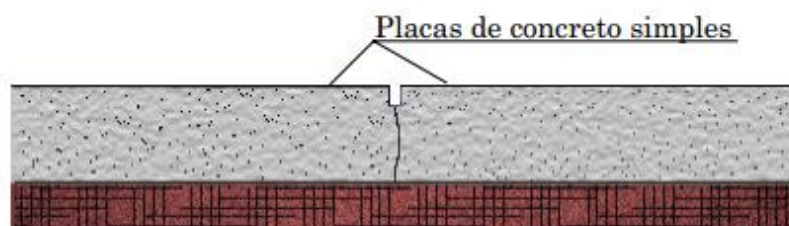
O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2004) enfatiza que com o avanço dos estudos na área de pavimentos rígidos, foi possível incluir nas considerações de projeto aspectos como a influência das sub-bases estáveis, ação de diferentes distribuições de tráfego e o tipo de transferência de carga entre juntas. Outro aspecto que passou a ser considerado foi o empenamento térmico do concreto, o qual é objeto de estudo desta pesquisa. Nesse tópico, serão abordados os diversos tipos de pavimentos rígidos como os pavimentos de concreto simples, com armadura distribuída, continuamente armados, estruturalmente armados e de concreto protendido.

2.1.1.1. Pavimento de concreto simples

Os pavimentos de concreto simples (PCS) são caracterizados por não serem armados, ou seja, são constituídos por placas de concreto. O concreto empregado, segundo Balbo (2009), pode ser o concreto convencional (CCV), o concreto de alta resistência (CAR) e o concreto compactado com rolo (CCR). As placas de concreto são moldadas *in loco*, e delimitadas pela serragem das juntas transversais e longitudinais.

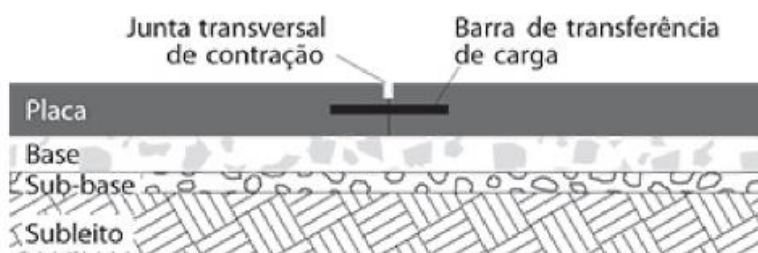
Os pavimentos de concreto estão sujeitos à variação de temperatura e umidade, que resultam em variação de volume no concreto e empenamentos das lajes, os quais, por sua vez, resultam em acréscimo de tensão nas placas. Com o objetivo de reduzir as tensões, a laje é dividida em uma série de placas, do 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). Essas juntas podem possuir barras de transferência de carga, as quais não são caracterizadas como armaduras. Em função das barras de transferência, os PCS podem ser classificados como: sem barras de transferência (figura 2-2) ou com barras de transferência (figura 2-3).

Figura 2-2 - Perfil de um pavimento de concreto simples sem barras de transferência



Fonte: Oliveira, 2000, p. 6

Figura 2-3 - Perfil de um pavimento de concreto simples com barras de transferência



Fonte: Balbo, 2009, p. 4

O objetivo das barras de transferência de cargas é a distribuição dos esforços na junta para as placas subsequentes. Dessa forma, as placas trabalham em conjunto para resistir às tensões impostas pela retração hidráulica do concreto nas mais adversas condições climáticas.

Segundo Santana (2008 apud SANTOS, 2013) e Oliveira (2000), no Brasil, os PCS com barras de transferências têm maior utilização para grandes vias, com placas que variam de 16 a 45 cm de espessura média e dimensões em planta que podem chegar a 7m de comprimento. Já os PCS sem barras de transferência são mais utilizados para vias de menor tráfego e submetidos a menores solicitações, com placas que variam de 15 a 20 cm de espessura, 4 a 6m de comprimento e 3 a 4m de largura.

O PCS, por não possuir armadura estrutural, confere ao concreto toda a responsabilidade de suportar as tensões. O concreto deve suportar, sem que ocorra sua ruptura, as deformações geradas por tração na flexão. Portanto, o dimensionamento do pavimento é baseado em definir uma espessura tal que suporte as deformações de tração na flexão, levando em consideração também a ruptura por fadiga de esforços de natureza repetitiva. Como resultado, o PCS deve resistir por um longo período de tempo ao tráfego imposto e variações climáticas.

Balbo (2009) enfatiza que a maior preocupação dos engenheiros civis durante a execução de um PCS são os critérios para garantir a resistência do concreto prevista em projeto, visto que esse parâmetro é crucial para o bom desempenho do pavimento.

Santos (2013) também disserta sobre a resistência mecânica do concreto. O aumento da resistência mecânica do concreto é relacionado com a diminuição da relação água/cimento do concreto. A problemática é devido ao aumento da retração do concreto com o aumento da relação água/cimento. Logo, muitas pesquisas são desenvolvidas com o intuito de aumentar a resistência do concreto com baixas relações água/cimento. Mehta e Monteiro (2006) explicam que a escolha de agregados com maior dimensão máxima e a escolha de uma combinação de dois diferentes diâmetros os quais resultem em uma maior compacidade do concreto são medidas satisfatórias para a redução da quantidade de cimento do traço, além da escolha de agregados com textura

rugosa, como os agregados britados, que auxilia no aumento de resistência mecânica mantendo a relação água/cimento. Oliveira (2000) ainda comenta que para garantir as características necessárias e a economia de materiais, o melhor método é a dosagem experimental.

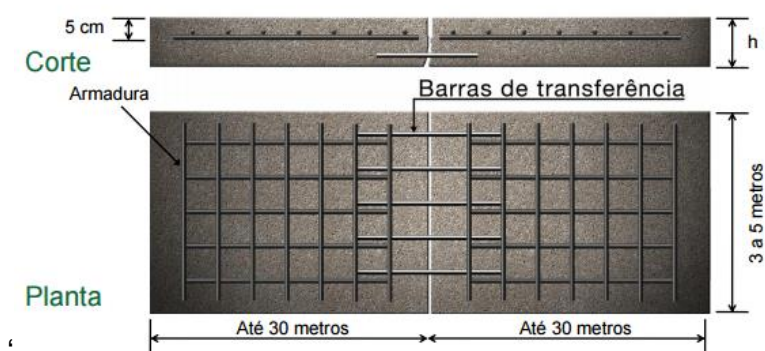
No Brasil, a NBR 7583 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986) “Execução de Pavimentos de Concreto Simples por meio Mecânico” estabelece as exigências mínimas em relação aos materiais, a execução, a inspeção e aceitação de PCS em estradas, aeródromos, vias urbanas, pátios de estacionamento, pisos industriais e docas portuárias.

2.1.1.2. *Pavimento de concreto com armadura distribuída descontínua*

Os pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua (PCADD), de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2004), são compostos por barras de aço sob a forma de telas, as quais são limitadas pelas juntas transversais. Para esse tipo de pavimento, é obrigatório o uso de barras de transferência de carga nas juntas. As armaduras contidas no PCADD não possuem função estrutural, estas barras estão dispostas apenas para manter as fissuras fortemente ligadas. O aço não evita as fissuras do pavimento, porém, aumenta sua vida útil já que mantém as fissuras unidas e fechadas, reduzindo a penetração de detritos para o interior de concreto.

Oliveira (2000) cita que a utilização de telas soldadas para o controle da fissuração reduz, consideravelmente, o número de juntas. Essas malhas podem ser compostas de barras de aço amarradas no local ou por telas soldadas pré-fabricadas, são posicionadas no terço médio da seção, mantendo no mínimo um cobrimento de 5 cm. O PCADD permite a execução de placas com dimensões de até 30 m de comprimento e superiores a 6 m de largura. Porém, é usual a execução de placas com aproximadamente 15 m de comprimento. A Figura 2-4 ilustra um PCADD.

Figura 2-4 - Esquema ilustrativo de um PCADD

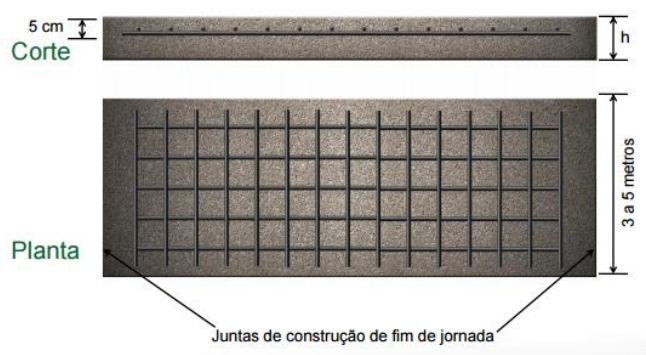


Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013, p. 9

2.1.1.3. Pavimento de concreto continuamente armado

A *Federal Aviation Administration* (2009) define pavimento de concreto continuamente armado (PCCA) como sendo um pavimento de concreto com cimento Portland com malha de aço continuamente distribuído e sem juntas transversais ou juntas de contração. Esse tipo de pavimento possui somente juntas de construção, executadas após o término de um ciclo de trabalho ou quando as faixas são construídas separadamente. A distância da armadura até a face superior do pavimento é de, aproximadamente, $\frac{1}{3}$ da espessura da placa. Similarmente ao PCADD, o aço tem a função de manter as fissuras fortemente ligadas. A figura 2-5 ilustra um PCCA.

Figura 2-5 - Esquema ilustrativo de um PCCA



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013, p. 10

O PCCA apresenta vantagem sobre os PCS e o PCADD pelo fato de não apresentar juntas transversais. Essas juntas são de difícil execução e manutenção, além da necessidade de selagem periódica. Esse tipo de

pavimento irá apresentar fissuras espaçadas regularmente no pavimento, porém unidas pelas armaduras. O aço de reforço no pavimento proporciona uma melhor distribuição de cargas. A *Federal Aviation Administration (2009)* cita que o dimensionamento da espessura desse tipo de pavimento é o mesmo que para um PCS, inclusive, os dados de entrada. O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2004) relata que não há registros de aplicação desse tipo de pavimento no Brasil.

2.1.1.4. *Pavimento de concreto estruturalmente armado*

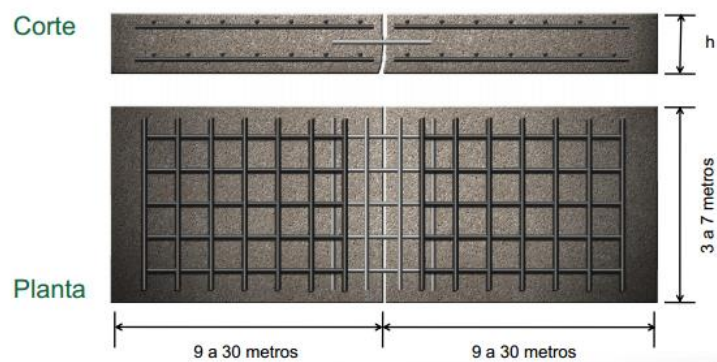
O pavimento de concreto estruturalmente armado (PCA) se difere do PCS pelo fato de que é o aço que resiste aos esforços e não mais o concreto. O PCA possui armadura na parte inferior do pavimento que resiste aos momentos fletores causados, principalmente, pelo tráfego e armadura na parte superior que resiste aos esforços de retração e empenamento. As placas do PCA são, geralmente, duas ou três vezes superior às dimensões das placas do PCS.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2004), as vantagens do PCA são a redução da espessura da placa e a redução da quantidade de juntas que, conseqüentemente, reduz custos com manutenção.

Balbo (2009) explica que a resistência do concreto no PCA é projetada em termos de durabilidade, ou seja, o concreto deve resistir às intempéries, as quais ficará exposto durante sua vida útil. Os esforços atuantes são absorvidos pela armadura.

No dimensionamento do PCA, é realizado o levantamento das tensões atuantes e as posições de atuação. Então, a placa é armada nesses locais aumentando a eficiência do pavimento (OLIVEIRA, 2000). A placa pode ter grandes dimensões, desde que exista taxa de armadura compatível com os esforços atuantes. A figura 2-6 ilustra um PCA.

Figura 2-6 - Esquema ilustrativo de um PCA



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013, p. 11

2.1.1.5. *Pavimento de concreto protendido*

Os pavimentos de concreto protendido (PCP) compreendem de um concreto com armaduras convencionais e cordoalhas ou somente cordoalhas para protensão. São utilizados, principalmente, para área de tráfegos pesados. Ao realizar a protensão do pavimento, são criadas tensões de compressão no interior do concreto. Assim, uma tensão de tração só irá atuar no pavimento após vencer a compressão imposta pela protensão. Essa técnica permite que os PCP tenham espessuras reduzidas com relação aos outros tipos de pavimentos (BALBO, 2009).

Balbo (2009) enfatiza que diferente do PCA, onde o concreto é projetado apenas para cumprir com o critério de durabilidade, o PCP necessita de um concreto com resistência elevada para suportar as tensões de compressão impostas pela protensão. A placa comprimida se torna, praticamente, impermeável e sem trincas. As juntas podem ter espaçamentos de 150 metros. A desvantagem desse pavimento é que a execução é mais sofisticada e necessita de equipamentos e pessoal especializado.

2.2. Comportamento Termomecânico dos pavimentos de concreto

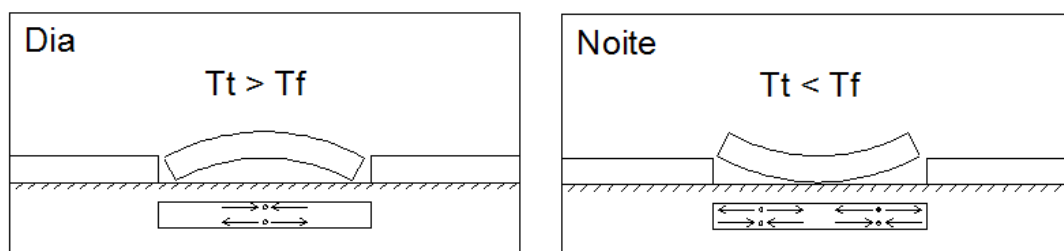
2.2.1. Mecanismos de transferência de calor

A transferência de calor entre o meio e um corpo existe quando há diferença de temperatura entre eles, ou seja, um gradiente térmico. Nesse processo, a transferência ou o fluxo de calor tem como objetivo atingir o equilíbrio térmico entre o meio e o corpo. O equilíbrio térmico é alcançado quando o meio e o corpo apresentarem as mesmas temperaturas.

No caso de pavimentos, a área superficial em relação ao volume total é grande, dessa forma, há uma intensa troca calorífera com o meio. Então, a temperatura do pavimento é amplamente influenciada pelas fontes de calor externas. Autores, como Severi (2002) e Balbo (2009), investigaram a influência das tensões térmicas nas deformações do pavimento e concluíram que as temperaturas do meio devem ser consideradas como um limitante para os projetos de pavimentos de concreto.

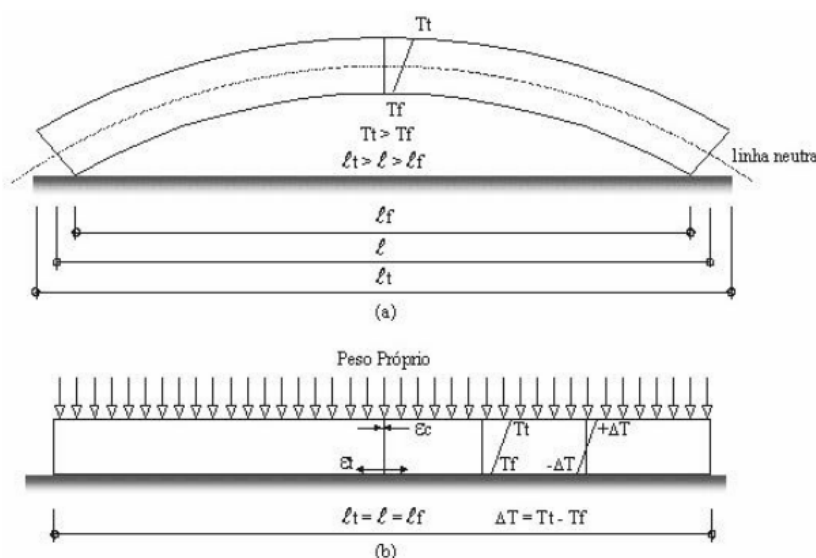
A curvatura do empenamento do pavimento de concreto varia ao longo de um dia. Durante o período diurno, onde a temperatura da superfície do pavimento é maior que a temperatura do fundo, ou seja, o gradiente térmico é positivo, há uma expansão do topo e uma contração do fundo. O peso próprio do pavimento atua no sentido de restringir essas deformações, então, tensões de compressão são induzidas no topo do pavimento e tensões de tração no fundo, como mostram as figuras 2-7 e 2-8. No período noturno, a situação se inverte. O topo irá apresentar menor temperatura do que o fundo, ou seja, o gradiente térmico é negativo, então, haverá tensões de tração no topo e de compressão no fundo, como mostra a figura 2-7.

Figura 2-7 - Empenamento diurno e noturno de placas de concreto



Fonte: Severi, 2002, p. 8

Figura 2-8 - Empenamento diurno e ação do peso próprio da placa de concreto



Fonte: Severi, 2002, p. 8

Além da variação de temperatura diária, outros fatores influenciam a temperatura da superfície do pavimento. Dentre esses fatores, podem ser citados a velocidade do vento, a radiação solar e, para o caso de pátios de aeronaves, o calor irradiado da turbina das aeronaves. O calor das fontes é transmitido ao pavimento por meio de três processos: convecção, radiação e condução, os quais serão apresentados neste tópico. A equação que governa a transmissão de calor, considerando os três processos apresentados, é a equação de Fourier, a qual também será explicada neste tópico.

2.2.1.1. Transmissão de calor por convecção

O processo de transmissão de calor através de movimentos de um fluido é chamado de convecção. Os movimentos desses fluidos são motivados por diferenças de densidade devido à diferença de temperatura ou por fatores externos (CALMON, 1995). Esses movimentos são designados por correntes dos fluidos (SANTOS, 2004).

É dito convecção *natural* quando o movimento dos fluidos é devido a diferença de densidade promovida pela diferença de temperatura no fluido. Porém, fatores externos, como o vento, podem também ocasionar movimentação dos fluidos, o qual é chamado de movimentação *forçada*. Para problemas térmicos

na presença de vento, serão observadas as correntes de ar atuando na superfície de concreto, ou seja, será observada a convecção forçada que depende, neste caso, diretamente da velocidade do vento (SANTOS, 2004).

Calmon (1995) enfatiza que o mecanismo de convecção é muito complexo, porque depende de diversos fatores como:

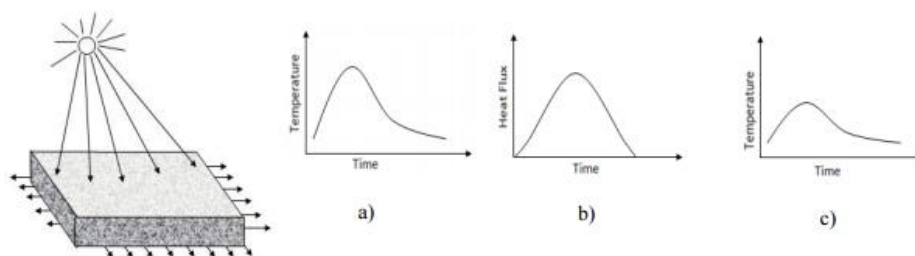
- Diferença de temperatura entre o fluido e o corpo;
- Velocidade de deslocamento do fluido;
- Densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido;
- Natureza, forma, rugosidade, dimensões e orientação do corpo.

2.2.1.2. *Transmissão de calor por radiação*

Radiação térmica é definida como a energia radiante emitida por um corpo, a qual depende de sua temperatura. O corpo, desde que não seja perfeitamente transparente, emite e absorve permanentemente radiação térmica de outros corpos (SILVEIRA, 1961 apud SANTOS, 2004).

Para os pavimentos de concreto, a principal fonte de radiação é o sol. Devido a sua extensa área superficial, os pavimentos de concreto são fortemente influenciados pelo ambiente onde são construídos. Dessa forma, durante o dia uma grande quantidade de energia calorífica é absorvida pelo pavimento de concreto devido à radiação solar, como mostra a figura 2-9. Contrariamente, durante o período noturno, não há mais radiação solar e, então, o pavimento perde energia calorífica já que a temperatura do meio é menor do que a temperatura do pavimento. Essa perda de energia é devida, em parte, a rerradiação emitida do pavimento para o ambiente (CALMON, 1995).

Figura 2-9 - a) Típica variação de temperatura diária; b) Típica variação do fluxo de calor devido à radiação solar durante o dia; c) Variação diária de temperatura no pavimento



Fonte: Karunarathne *et al.*, 2010, p. 2

A radiação térmica pode ser classificada em dois tipos: radiação de onda curta e radiação de onda larga. A radiação de onda curta possui comprimento de onda entre 0,25 e 3 μm e a radiação de onda larga comprimento de onda entre 6 e 60 μm . A radiação solar possui onda curta e é a principal fonte de radiação nos pavimentos de concreto. As radiações de onda larga são provenientes de outros corpos, resultado da rerradiação de sua própria energia calorífera armazenada.

Um projeto ideal de pavimentos de concreto, segundo Mirambell (1990, apud SEVERI, 2002) deve levar em consideração as condições do ambiente do local da construção, principalmente a radiação, variação da temperatura do ar e velocidade do vento. O autor concluiu em sua pesquisa que as tensões de origem térmica possuem mesma magnitude das tensões geradas pelo tráfego no pavimento.

2.2.1.3. *Transmissão de calor por condução*

Na transmissão de calor por condução, a energia calorífera é transmitida pelo meio material. É um processo característico dos corpos sólidos onde as moléculas com maior energia cinética de translação (maior temperatura) transmitem energia calorífera às moléculas com menor energia cinética de translação (menor temperatura). Esse processo precisa do meio material para acontecer, porém não há transferência de massa (CALMON, 1995).

Segundo Adkins e Merkley (1990, apud SEVERI, 2002), a única forma de transferência de calor no interior do concreto é a condução. A temperatura do topo da placa de concreto geralmente difere da temperatura do fundo da placa de concreto a qual está em contato com o solo. Essa diferença de temperatura

entre o topo e o fundo da placa cria um gradiente térmico ao longo da profundidade da placa. O gradiente térmico, então, induz a condução térmica da energia calorífera da região de maior temperatura para a região de menor temperatura no interior da massa de concreto.

2.2.2. Equação geral de transmissão de calor

Os pavimentos de concreto, devido à sua extensa área superficial, são fortemente influenciados pelo ambiente ao qual estão expostos. Ao longo do dia, ocorrem fluxos de calor entre o meio e a superfície do concreto através da convecção e radiação. Ao receber energia calorífera, há um aumento da temperatura superficial da placa e, assim, através da condução, essa energia calorífera é transmitida para o interior da massa de concreto. Os processos de transmissão de calor atuam simultaneamente e, por isso, devem ser modelados por uma única equação.

Do teorema da conservação de energia em uma superfície fechada S , que envolve um volume V , o fluxo de calor que sai da mesma em um incremento infinitesimal de tempo dt , deve ser igual ao calor gerado em seu interior menos o acumulado por unidade de tempo devido à elevação de temperatura T (vetor de temperatura), de acordo com a equação 2-1.

$$\iint_S \vec{q} \cdot \vec{n} \cdot dS = \iiint_V \dot{q} \cdot dV - \iiint_V \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV \quad 2-1$$

Operando, obtém-se:

$$\text{div}(-k\nabla T) - \dot{q} + \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad 2-2$$

Onde T é o vetor temperatura, $\dot{q}$ é o calor gerado por unidade de volume e unidade de tempo, ρ é a densidade do material, c é o calor específico e k é a condutividade térmica do material. A equação 2-2 é a equação para condução de calor em um meio anisotrópico e regime transitório.

A análise dos pavimentos de concreto nesse trabalho é realizada na fase de operação, dessa forma, será utilizada a simplificação de que a hidratação do

cimento foi concluída e, então, não há geração interna de calor. Assim, o calor gerado, $\dot{q}$, é nulo na equação 2-2.

Outras hipóteses simplificadoras utilizadas para aplicação dessa fórmula em pavimentos de concreto são: Meio contínuo e homogêneo, isotropia térmica, homogeneidade térmica e permanência térmica (GONZÁLEZ, 1981 apud CALMON, 1995). Além disso, a densidade e o calor específico são considerados como campos escalares constantes e, a condutividade térmica como campo tensorial de segunda ordem isotrópico e constante. Então, utilizando as hipóteses simplificadoras acima, tem-se a equação geral de Fourier (2-3), com geração de calor nula.

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad 2-3$$

Onde T é o vetor temperatura, t é o tempo, ρ é a densidade do material, c é o calor específico e k é a condutividade térmica do material.

2.2.3. Parâmetros Térmicos

Anteriormente, foram discutidos os mecanismos de transmissão de calor entre o ambiente e o pavimento de concreto. A transmissão de calor, após as hipóteses simplificadoras adotadas, é governada pela equação geral de Fourier (2.3) que necessita da definição das condições iniciais de contorno do problema, que por sua vez, dependem do meio onde o pavimento está inserido.

São chamados parâmetros térmicos aqueles que influenciam na temperatura do pavimento, que neste caso, são a temperatura ambiente, a velocidade do vento e a radiação solar.

2.2.3.1. *Temperatura ambiente*

A influência das variações diárias e anuais da temperatura ambiente no comportamento dos pavimentos de concreto foi verificada pela primeira vez nos trabalhos pioneiros de Westergaard (1927 apud SEVERI 2002) após verificação de fissuras no pavimento antes do mesmo ser liberado ao tráfego devido ao empenamento térmico. O tema foi estudado por diversos autores como Severi (2002), Mackiewicz (2014), Nam, Yeon e Behring (2014), Kim,

Park e Jeong (2013), Tsubokawa, Mizukami e Saitou (2011) e Belshe et al. (2011), os quais verificaram que as tensões de origem térmica representam uma parcela significativa em relação as tensões totais nos pavimentos de concreto. No Brasil, a pesquisa pioneira de Severi (2002), com orientação do pesquisador 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. Dessa forma, é importante que o ambiente no qual o pavimento será inserido seja estudado para possibilitar a previsão das temperaturas e gradientes térmicos para que sejam considerados no dimensionamento combinados com o carregamento devido ao tráfego.

O autor Agullo (1991) descreve a temperatura ambiente diária a partir de uma função senoidal dependente da temperatura máxima e mínima diária e os horários que ocorrem. As equações 2-4 e 2-5 apresentam a formulação do autor.

$$T = A \operatorname{sen} \left(2\pi \cdot \frac{t-b_1}{2b_2} \right) + B \quad 2-4$$

$$T = A \operatorname{sen} \left(2\pi \cdot \frac{t+12-b_1-b_2}{2(24-b_2)} \right) + B \quad 2-5$$

Onde:

$$A = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad 2-6$$

$$B = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad 2-7$$

$$b_1 = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} \quad 2-8$$

$$b_2 = h_{max} - h_{min} \quad 2-9$$

T_{max} = temperatura máxima que se alcança no dia

T_{min} = temperatura mínima que se alcança na hora

h_{max} = hora do dia que se alcança a temperatura máxima

h_{min} = hora do dia que se alcança a temperatura mínima

2.2.3.2. Velocidade do vento

A velocidade do vento é relacionada com a transmissão de calor por convecção, conhecida como transmissão forçada. A troca de calor entre a superfície do sólido e o ar é acelerada pelo vento (AGULLO, 1991).

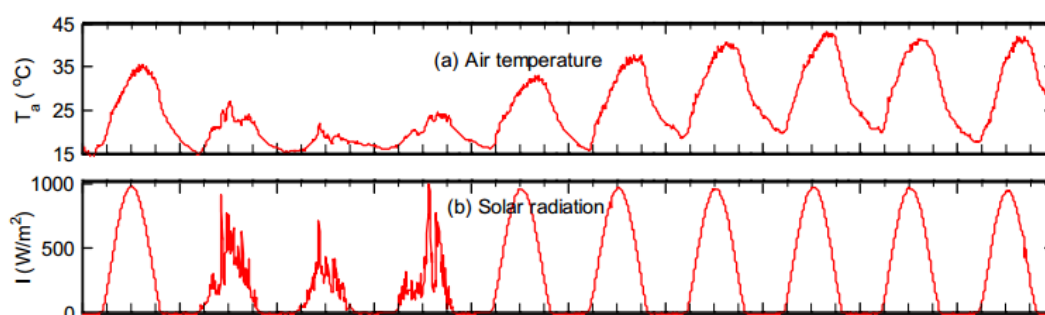
Barber (1957, apud SEVERI 2002) relacionou a velocidade do vento com a densidade do fluxo de calor em pavimentos de concreto. A partir da formulação de Barber, a velocidade do vento é diretamente proporcional à densidade do fluxo de calor no pavimento.

Para essa pesquisa, a velocidade do vento será constante em todas as análises e igual a 3m/s, de forma a incluir esse parâmetro na análise térmica do pavimento.

2.2.3.3. Radiação Solar

A radiação solar é uma das principais fontes de calor em um pavimento de concreto devido a sua grande área superficial exposta ao sol. A temperatura de superfícies de concreto aumenta proporcionalmente com o aumento da radiação solar durante o dia, como pode ser observado nos estudos de Qin (2016), Severi (2002) e Calmon (1995). O Sol é a principal fonte de radiação de onda curta e, por isso, não há incidência de radiação no período noturno. A figura 2-10 ilustra a relação entre a radiação solar e a temperatura ambiente.

Figura 2-10 - a) Temperatura do ar; b) Radiação solar



Fonte: Qin, 2016, p. 4

Nesse trabalho, a radiação solar será implementada de forma indireta através de um acréscimo de temperatura ambiente. Os dados de radiação solar do Brasil podem ser encontrados no Atlas Solarimétrico do Brasil (2000),

desenvolvido pelo departamento de energia nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

2.2.4. Propriedades térmicas do concreto

2.2.4.1. Condutividade térmica

Condutividade térmica é o fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material pela variação de uma unidade de temperatura. Em outras palavras, mede a facilidade que um material possui de conduzir calor. Mehta e Monteiro (2006) afirmam que a condutividade térmica do concreto é influenciada principalmente pelas características do agregado graúdo, mas também é influenciada pela umidade, densidade e a temperatura do concreto. A tabela 2-1 ilustra diferentes valores de condutividade térmica com diferentes agregados.

Tabela 2-1 - Variação da condutividade térmica com diferentes agregados graúdos

Tipo de agregado	Condutividade Térmica
	W/m.K
Quartzito	3,5
Dolomita	3,2
Calcário	2,6-3,3
Granito	2,6-2,7
Riolito	2,2
Basalto	1,9-2,2

Fonte: Mehta e Monteiro, 2006

Concretos com quartzos possuem maiores valores de condutividade térmica enquanto concretos com basalto possuem baixas condutividades térmicas. É importante notar na tabela 2-1 que a alteração do agregado no concreto acarreta grande mudança no valor da condutividade, o que implica também na distribuição de calor no pavimento de concreto.

Neville (1982, apud CALMON, 1995) relata que o grau de saturação do concreto pode variar a condutividade em até 10% e que quanto maior o grau de saturação, maior será o valor dessa propriedade.

2.2.4.2. Calor Específico

É a quantidade de energia necessária para elevar em uma unidade de temperatura uma unidade de massa do material. Liduário (2006), em sua pesquisa, mostra que o calor específico aumenta com a temperatura e com o grau de saturação, o que está relacionado com o alto calor específico da água. A tabela 2-2 ilustra a influência da temperatura, grau de saturação e massa unitária do concreto no calor específico.

Tabela 2-2 - Influência da massa específica, grau de saturação e temperatura do concreto no valor do calor específico

Agregado/dimensão máxima	Massa unitária do concreto (kg/m ³)	Condição da saturação	Calor específico do concreto (J/kg.K) Temperatura (°C)				
			20	30	40	50	60
Material Cerâmico Dmáx 38 mm	1918	sss	1315	1340	1361	1382	1403
		20%	827	853	882	907	932
Cascalho Dmáx 38 mm	2270	sss	1139	1247	1256	1264	1268
		20%	781	790	798	806	815
Gabro Dmáx 38 mm	2568	sss	1058	1075	1092	1163	1273
		20%	932	947	966	1042	1155

Fonte: Equipe Furnas, 1997 apud Liduário, 2006

Gambale et al. (2010) fizeram uma amostragem de 294 observações quanto ao calor específico para analisar a influência da litologia do agregado nessa propriedade. A tabela 2-3 apresenta os valores médios do calor específico para cada tipo de agregado utilizado no concreto. Após análise estatística, foi concluído que o tipo litológico do agregado não influenciou, significativamente, o calor específico.

Tabela 2-3 - Variação do calor específico com o tipo litológico do agregado

<i>Tipo Litológico do Agregado</i>	<i>Observações</i>	<i>Calor específico Médio (cal/g°C)</i>	<i>Desvio Padrão (cal/g°C)</i>
Anfítólio-Gnaiss	2	0,212	0,027
Gnaiss	50	0,223	0,021
Quartzito	14	0,227	0,024
Xisto	20	0,228	0,019
Calcáreo	8	0,229	0,019
Metagrauvaca	40	0,220	0,034
Siltito	4	0,226	0,025
Basalto	64	0,222	0,019
Diurito	4	0,221	0,027
Gabro	20	0,223	0,021
Granito	32	0,224	0,022
Granito-Gnaiss	2	0,192	0,021
Granodiorito	4	0,214	0,018
Fonolito	2	0,222	0,032
Cascalho	20	0,228	0,037
Material Cerâmico	6	0,248	0,061
Hematita	2	0,210	0,021
Total de observações	294	0,224	0,025

Fonte: Gambale et al, 2010

Calmon (1995), por sua vez, afirma que a maior influência no calor específico é devido à temperatura do ensaio e, que outros fatores, dentro de dosagens normais para o concreto, exercem influência praticamente nula nessa propriedade.

2.2.4.3. Coeficiente de expansão térmica

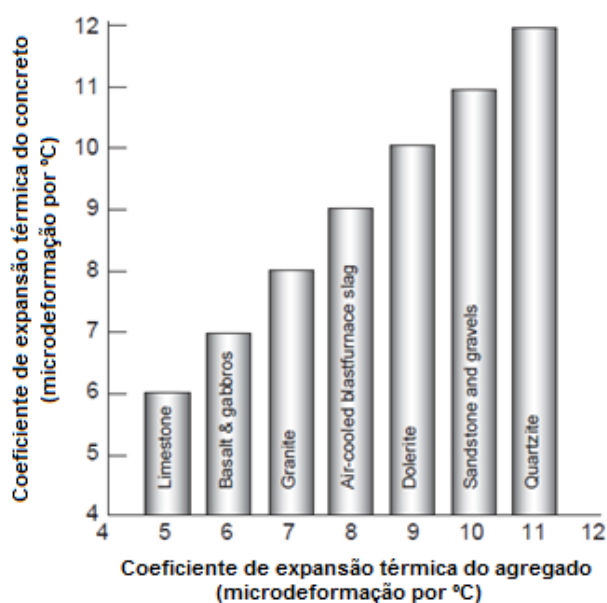
O coeficiente de expansão térmica, também conhecido como coeficiente de dilatação térmica, é definido como a variação de uma unidade de comprimento por uma unidade de temperatura. Autores como Calmon (1995), Gambale et al (2010) e Mehta e Monteiro (2006) concordam que essa propriedade é influenciada, principalmente, pelo tipo de agregado gráudo utilizado no concreto. A tabela 2-4 ilustra a variação do coeficiente de expansão térmicas em diversas barragens brasileiras e a figura 2-11 mostra a relação entre o coeficiente de expansão térmica do concreto e do agregado.

Tabela 2-4 - Variação do coeficiente de expansão térmica utilizado em diversas barragens brasileiras

Barragem	Tipo de agregado utilizado no concreto	Coeficiente de expansão térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Itumbiara	Areia natural	12,48
Balsas Mineiro	Cascalho natural (quartzo)	11,99
Tucuruí	Metagrauvaque	10,7
Itumbiara	gnaisse de anfibolito	10,27
Tucuruí	Basalto	9,77
Itumbiara	Basalto	9,05
Itaipu	Basalto	8,42

Fonte: Pacelli et al., 1982 apud Calmon, 1995

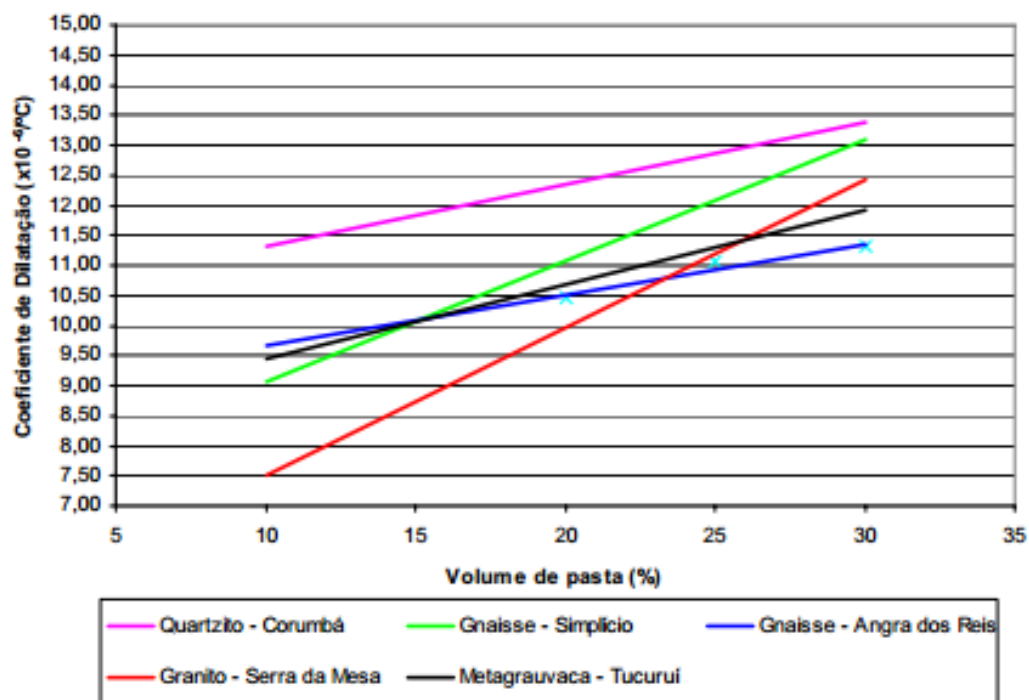
Figura 2-11 - Relação entre o coeficiente de expansão térmica do agregado e do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro, 2006

Liduario (2006) observa que é importante que o coeficiente de expansão térmica do concreto seja próximo ao valor do agregado para que ambos tenham uma deformação semelhante com a variação de temperatura. Essa prática minimiza a fissuração do concreto. A figura 2-12 compara o coeficiente de dilatação térmica de diversos agregados para diversas porcentagens de pasta de cimento.

Figura 2-12 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a variação do tipo de agregado e a porcentagem em volume de pasta de cimento



Fonte: Liduário, 2006

Essa propriedade torna-se muito importante principalmente para concretos de grandes volumes, pois a variação volumétrica somada à restrição do movimento resulta em altas tensões internas, as quais podem promover a fissuração do concreto, diminuindo a vida útil do material.

2.2.5. Propriedades físicas e mecânicas do concreto

2.2.5.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é influenciada, principalmente, pela porosidade e pela zona de transição intersticial do concreto, os quais estão interligados por diversos fatores como a proporção do traço do concreto e adensamento.

O primeiro fator a se considerar é a relação água/cimento utilizada no traço do concreto. Em geral, um aumento da relação a/c induz a redução da resistência à compressão do concreto. Outro fator importante, é o grau de hidratação do cimento que aumenta com o tempo, então, a resistência à compressão do concreto também aumenta com o tempo. A figura 2-13 apresenta a relação

entre a porosidade e a resistência à compressão do concreto enquanto a figura 2-14 compara a resistência à compressão de amostras com diferentes relações a/c e de acordo com a idade do concreto.

Figura 2-13 - Relação entre porosidade e resistência à compressão do concreto

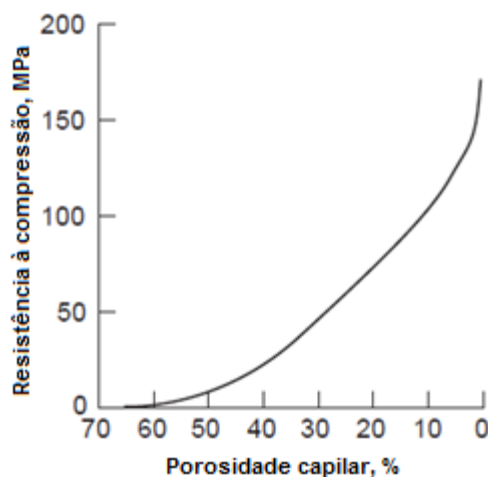
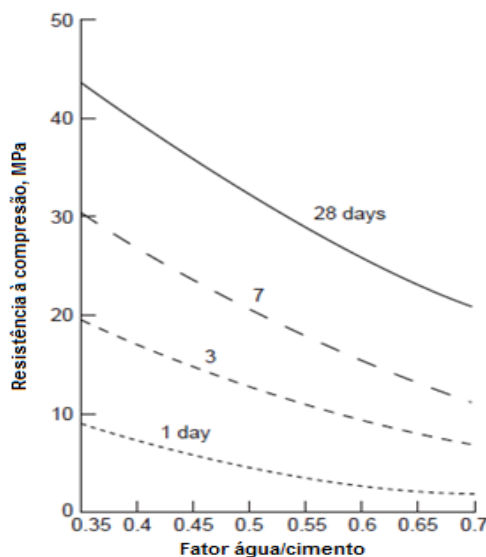


Figura 2-14 - Comparação da resistência à compressão com a variação da relação a/c e da idade do concreto



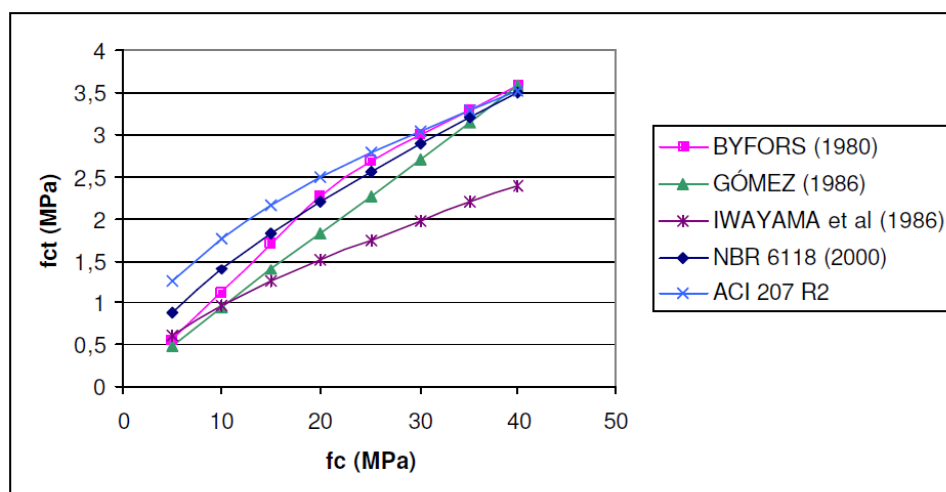
Os materiais componentes do traço também exercem influência na resistência à compressão. O tipo de cimento interfere na resistência do concreto nas primeiras idades devido ao grau de hidratação. Cimentos com maior área específica possuem maior velocidade de hidratação e, conseqüentemente, maior resistência inicial, em contrapartida, liberam mais energia o que não é indicado para concreto massa, por exemplo. Outro componente importante são os agregados, principalmente no que diz respeito à zona de transição

intersticial entre o agregado e a pasta de cimento. Agregados com superfície rugosa tendem a produzir concretos com maior resistência já que possuem ligação mais forte entre o agregado e a pasta de cimento. Agregados bem graduados também são responsáveis pelo aumento de resistência, pois promovem uma melhor compacidade e diminuição dos vazios do concreto. (MEHTA E MONTEIRO, 2006)

2.2.5.2. Resistência à tração

Os mesmos fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto são responsáveis pela variação da resistência à tração, já que as duas propriedades são correlacionadas e é comum encontrar na literatura autores que formularam equações que envolvem as duas variáveis. Santos (2004) analisou diversas equações sugeridas na literatura e as comparou no gráfico da figura 2-15.

Figura 2-15 - Resistência à tração em função da resistência à compressão por diversas equações propostas na literatura



Fonte: Santos, 2004

2.2.5.3. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é obtido através da inclinação da curva tensão-deformação do concreto sobre efeito de uma força uniaxial. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 6118:2014), o módulo de elasticidade depende do tipo de agregado utilizado no concreto e está relacionado com resistência à compressão do concreto e, quando não forem

realizados ensaios, o módulo de elasticidade poderá ser obtido através das fórmulas 2-10 e 2-11.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;} \quad (2-10)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa;} \quad (2-11)$$

sendo,

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss

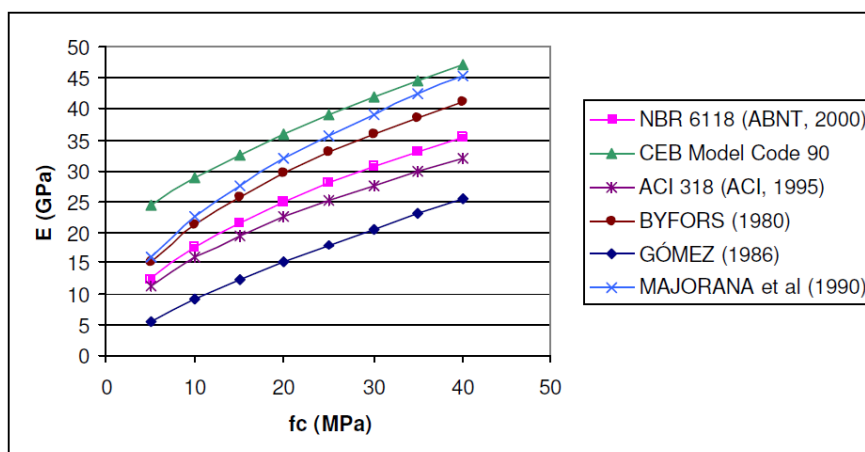
$\alpha_E = 0,9$ para calcário

$\alpha_E = 0,7$ para arenito

Mehta e Monteiro (2006) também dissertam sobre a influência dos agregados no módulo de elasticidade. Os autores atribuem a porosidade como principal característica do agregado que interfere nessa propriedade, pois a porosidade determina a rigidez do agregado e, conseqüentemente, a rigidez do concreto. Agregados densos, como o basalto, possuem maior módulo de elasticidade e, quanto maior a proporção de agregados densos no traço, maior será o módulo de elasticidade do concreto.

Os fatores que influenciam o módulo de elasticidade são semelhantes e, por isso, na literatura, é possível encontrar diversas relações entre essas duas propriedades, como mostra a figura 2-16.

Figura 2-16 - Relações entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão propostas por diversos autores na literatura



Fonte: Santos, 2004

2.2.5.4. *Coeficiente de Poisson*

Para um material sujeito a uma força axial, o coeficiente de Poisson é definido como a relação entre a deformação lateral pela deformação longitudinal desse material. ACI Committee 207 (1987, apud CALMON, 1995), após análise de vários estudos térmicos e tensionais, observaram que os autores adotaram valores de coeficiente de Poisson entre 0,16 e 0,20. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 6118:2014) sugere que a adoção do coeficiente de Poisson pode ser considerado igual a 0,20 desde que as tensões de compressão sejam menores do que a metade da resistência à compressão e do que as tensões de tração sejam menores do que a resistência à tração do concreto.

2.2.6. Estudos Teóricos Clássicos

Os estudos teóricos acerca do empenamento térmico em pavimentos de concreto foram iniciados em 1926 com a publicação do artigo escrito por Westergaard. Nesse tópico, serão apresentados os estudos clássicos de Westergaard (1927), bem como os estudos de Bradbury (1938) e Barber (1957).

2.2.6.1. *Soluções de Westergaard*

Westergaard 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. Nos primeiros trabalhos sobre o tema, em 1926 e 1927, Westergaard realizou análises em pavimentos de concreto sobre fundações elásticas considerando as seguintes hipóteses:

- as dimensões de placas seriam semi-infinitas;
- total contato entre a placa e o subleito (sem diferencial de temperatura através da espessura da placa);
- único painel de placa (sem transferência de carga);
- camada única (sem base);
- fundação modelada pela hipótese de Winkler;
- roda simples;

- considerar o peso próprio da placa;
- aplicabilidade do princípio de superposição de efeitos no que diz respeito a adição de tensões oriundas de cargas e de gradientes térmicos;
- variação linear de temperatura através da espessura da placa;
- resposta da placa sob condições noturnas como reflexo do comportamento sob condições diurnas.

Westergaard (1927, apud SEVERI, 2002) analisou as placas após terem sido liberadas para o tráfego. Assim, analisou a ação conjunta dos efeitos térmicos e do tráfego no empenamento do pavimento. Para o tráfego, analisou três posições da roda: na metade da borda (longitudinal ou transversal), no canto e no centro da placa. Em relação ao efeito térmico, analisou as variações sazonais de temperatura (variações mais lentas e gradiente linear ao longo da profundidade) e variações diárias de temperatura (mais rápidas).

De acordo com Westergaard (1927, apud SEVERI, 2002), a variação de temperatura faz o concreto expandir-se com o aumento e contrair-se com a diminuição em ambas as direções longitudinal e transversal. Essa tendência de expansão e contração é combatida pelo atrito entre a placa e o subleito, gerando tensões no concreto.

Se o subleito restringe a contração, seriam induzidas tensões de tração na flexão no concreto, alongando a placa na direção transversal e contraindo na direção longitudinal. Porém, se ocorrer expansão da placa, tensões transversais de compressão e tensões longitudinais de tração são geradas em ambas as direções.

Em uma de suas análises, considerando a temperatura do topo da placa superior à temperatura do fundo, e, que essa variação seja linear ao longo da profundidade do pavimento, Westergaard (1927, apud SEVERI, 2002) propôs as seguintes equações para o cálculo das deformações nas direções x e y:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) - \alpha\Delta T \quad 2-10$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) - \alpha\Delta T \quad 2-11$$

Onde:

x, y = direções planas perpendiculares;

σ_x, σ_y = tensões de tração na flexão nas direções x e y , respectivamente;

ϵ_x, ϵ_y = deformações nas direções x e y , respectivamente;

E = módulo de elasticidade do concreto;

μ = coeficiente de Poisson do concreto;

α = coeficiente de expansão térmica do concreto;

ΔT = gradiente térmico linear entre topo e fundo da placa.

Na posição central, foi considerado que o atrito da placa com o subleito fosse suficiente para impedir a deformação de ambas as direções, então, ϵ_x e ϵ_y seriam nulas, logo:

$$\sigma_y = \sigma_x = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\mu} \quad 2-12$$

Já na posição de borda (ao longo do eixo x) próxima ao centro, considerou-se o atrito suficiente para impedir a movimentação na direção x , ou seja, $\epsilon_x = 0$. Dessa forma, a tensão perpendicular à borda também seria nula ($\sigma_y = 0$), logo:

$$\sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad 2-13$$

Westergaard (1927, apud SEVERI, 2002) considerou que as tensões, devido aos efeitos térmicos nas bordas e no centro da placa, poderiam ser somadas às tensões devidas ao tráfego. Não foram analisadas as tensões de origem térmica nos cantos da placa, porque o autor enfatizou que essas tensões não seriam a principal causa de quebra dos cantos da placa.

2.2.6.2. Soluções de Bradbury

Baseado nos resultados de Westergaard, Bradbury propôs, em 1938, soluções para o caso de placas finitas nas direções x e y . Para um ponto no centro da placa, na direção x (considerada a direção do tráfego) e a tensão na direção y são respectivamente:

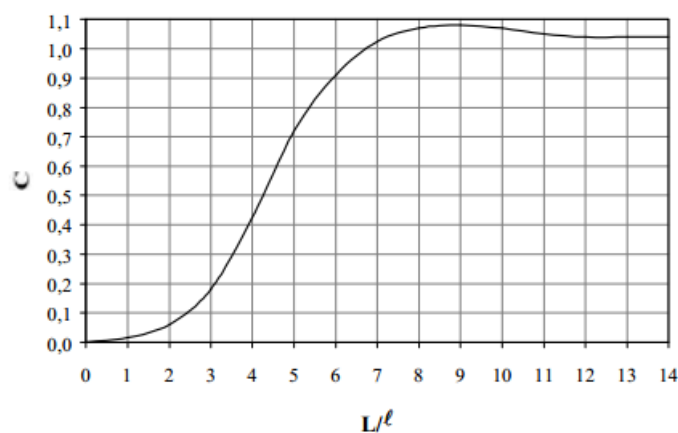
$$\sigma_x = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)} \cdot (C_x + \mu \cdot C_y) \quad 2-14$$

$$\sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu^2)} \cdot (C_y + \mu \cdot C_x) \quad 2-15$$

onde C_x e C_y são conhecidos como “coeficientes de Bradbury”.

Os coeficientes C_x e C_y são coeficientes de correção e podem ser obtidos através do ábaco específico criado por Bradbury (Figura 2-17), o qual relaciona o comprimento da placa com seu raio de rigidez relativo (l).

Figura 2-17 - Coeficientes de Bradbury



Fonte: Bradbury, 1938 apud Severi, 2002, p. 19

Para pontos localizados em uma das bordas livres, a tensão (x ou y dependendo da borda) é dada por:

$$\sigma = \frac{C.E.\alpha.\Delta T}{2} \quad 2-16$$

2.2.6.3. Soluções de Barber

Barber (1957, apud SEVERI, 2002) relacionou os seguintes parâmetros térmicos: temperatura do pavimento, velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação e radiação solar. Para a temperatura do ar igual a $T = T_m + T_v \cdot \text{sen } 0,262 \cdot t$, a temperatura do pavimento, na profundidade z e em um período de 24 horas, seria:

$$T = T_m + T_v \cdot \left[\frac{H^{-z.C}}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}} \right] \cdot \text{sen} \left[0,262 \cdot t - (z.C) - \arctg \left(\frac{C}{H+C} \right) \right] \quad 2-17$$

Onde,

T = temperatura do pavimento à profundidade z (°F);

T_m = temperatura efetiva média do ar junto à superfície (°F);

T_v = variação máxima de temperatura do ar em relação à média T_m (°F);

t = tempo a partir do início de um ciclo, ou seja, ao nascer do sol (horas);

z = profundidade abaixo da superfície (pés);

$$H = \frac{h}{\lambda} \quad 2-18$$

h = coeficiente de transmissão térmica superficial (BTUxpés quadrados⁻¹x°F⁻¹);

λ = condutividade térmica (BTUxpés quadrados⁻¹xh⁻¹x°F);

$$C = \left(\frac{0,131}{\frac{\lambda}{s\rho}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2-19$$

s = calor específico (BTU/lbx°F);

ρ = massa específica do material (lb/pés cúbicos);

No caso de transmissão forçada, foi considerado que a média da irradiação de calor observada na superfície deve ser incluída. Então, para uma velocidade do vento (v_v) em mph, a densidade do fluxo de calor é dada por:

$$d_f = 6,35 + 2,11 \cdot v_v^{\frac{3}{4}} \quad 2-20$$

Considerando também a radiação solar (figura 2-18), a temperatura efetiva do ar é dada por:

$$T_E = T_{ar} + \frac{R_s \cdot I}{h} \quad 2-21$$

Onde:

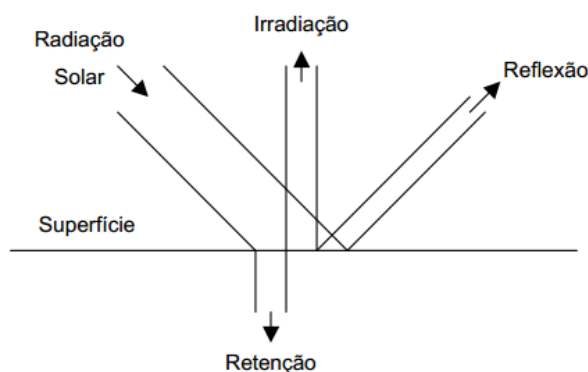
T_E = temperatura efetiva do ar (°F);

T_{ar} = temperatura média do ar (°F);

I = radiação solar (BTU por pés quadrados por hora);

R_s = coeficiente de absorção superficial da radiação solar;

Figura 2-18 - Distribuição da insolação



Fonte: Barber, 1957 apud Severi, 2002, p. 21

Continuando a teoria, Barber (1957, apud SEVERI, 2002) considerou que 1/3 da contribuição da temperatura efetiva do ar é perdida na forma de irradiação solar devido à reflexão. Dessa forma, a contribuição real da irradiação solar (R) na temperatura efetiva é dada por:

$$R = 0,67. R_s \quad 2-22$$

Portanto, a temperatura máxima no pavimento ($T_{m\acute{a}x}$) e a variação máxima da temperatura são:

$$T_{m\acute{a}x} = T_{ar} + R \quad 2-23$$

$$T_v = 0,5. T_R + 3. R \quad 2-24$$

Onde T_R é a variação diária de temperatura do ar ($^{\circ}F$).

Tem-se então que a máxima temperatura na superfície do pavimento, ou seja, $z = 0$ e a função seno igual a 1, será:

$$T_m = T_{ar} + R + F(0,5. T_R + 3. R) \quad 2-25$$

Onde,

$$F = \frac{H}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}} = \frac{H/C}{\sqrt{(H/C+1)^2 + 1}} \quad 2-26$$

H/C pode ser obtido da tabela 2-5 abaixo.

Tabela 2-5 - H/C em função de F

H/C	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
F	0,447	0,557	0,633	0,686	0,727	0,759	0,784	0,804	0,822

Fonte: Barber, 1957 apud Severi, 2002

Barber (1957, apud SEVERI, 2002) concluiu que seu estudo permite a correlação entre a temperatura do pavimento e da temperatura do ambiente o qual está inserido. Bastando para isso conhecer os dados meteorológicos do local e as propriedades térmicas do material utilizado.

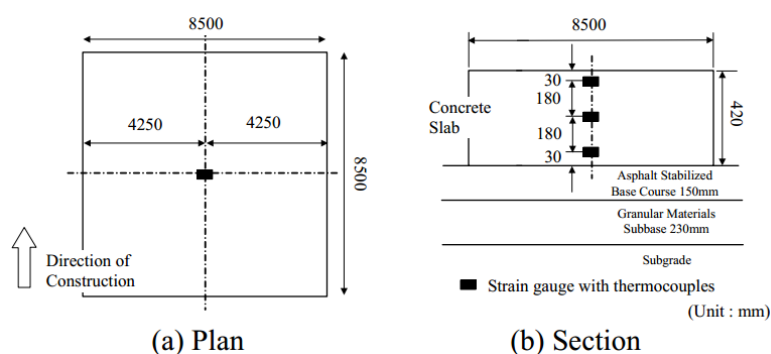
2.3. Pesquisas realizadas na área de análise termomecânica em pavimentos de concreto de cimento Portland

2.3.1. Estudo de Tsubokawa *et al.* (2011)

Nos estudos realizados por Tsubokawa *et al.* (2011), foram investigadas as relações entre a espessura e a distribuição não linear de temperatura com as tensões térmicas nos pavimentos de concreto de aeroportos. A tensão térmica pode ser dividida em três componentes: tensão axial, empenamento e tensões internas. A tensão axial é muito inferior às outras duas tensões e por isso foi desprezada no estudo de Tsubokawa *et al.* (2011).

Um pavimento de concreto experimental de 42cm de espessura foi construído e as tensões e temperaturas no pavimento foram medidas a cada 1 hora durante 1 ano, como mostra a figura 2-19.

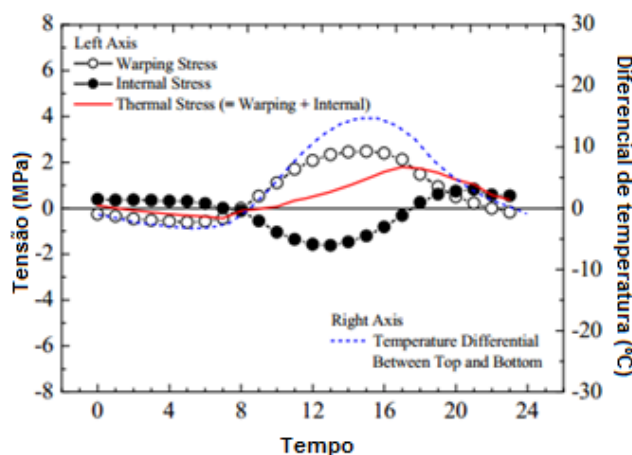
Figura 2-19 - Planta baixa (a) e seção transversal (b) do pavimento de concreto experimento



Fonte: Tsubokawa et al., 2011, p. 3

Como resultado das medições, foi possível observar a evolução da tensão térmica durante um dia de verão. Nota-se pela figura 2-20 que a tensão de empenamento atua no sentido oposto da tensão interna e que o pico da tensão térmica ocorre poucas horas após a máxima variação entre a temperatura de topo e de fundo do pavimento.

Figura 2-20 - Mudança diária na tensão térmica do pavimento

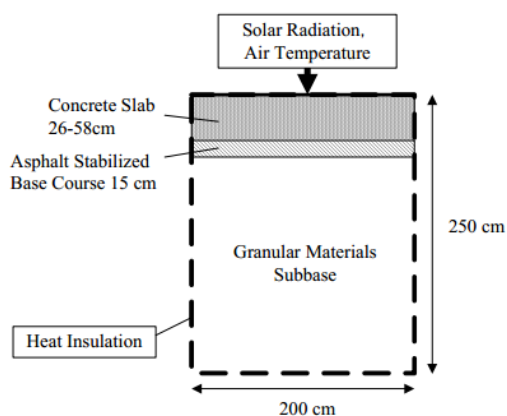


Fonte: Tsubokawa et al., 2011, p. 5

Uma modelagem numérica 2D utilizando elementos finitos foi utilizada para simulação da distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento. O modelo utilizado pode ser visualizado na figura 2-21. Foram testadas profundidades entre 26-58cm e verificou-se que a partir de 40cm de profundidade a diferença de temperatura entre o topo e o fundo do pavimento é praticamente a mesma, porém, a não linearidade da distribuição aumenta com o aumento da espessura, conforme pode ser observado na figura 2-22. Como

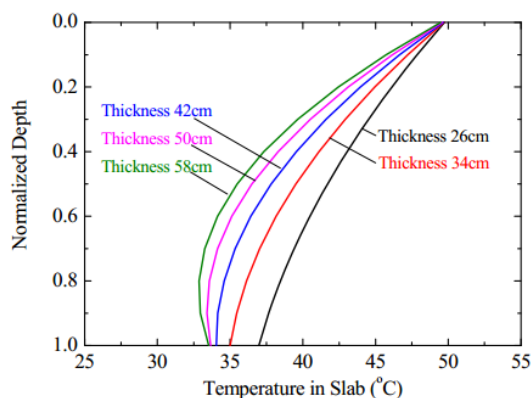
as tensões internas aumentam com a não linearidade da distribuição de temperatura e as tensões internas representam uma parcela negativa na tensão térmica total, isso significa que a tensão térmica diminui com o aumento da espessura do pavimento.

Figura 2-21 - Seção transversal do modelo numérico



Fonte: Tsubokawa *et al.*, 2011, p. 6

Figura 2-22 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento



Fonte: Tsubokawa *et al.*, 2011, p. 6

Tsubokawa *et al.* (2011) conclui que a tensão térmica é inversamente proporcional à espessura do pavimento e sugeriu um coeficiente β para o cálculo da tensão térmica no fundo do pavimento. A fórmula para o cálculo da tensão térmica no fundo da placa (equação 2-21) é idêntica à fórmula proposta por Westergaard, exceto pelo coeficiente β . A figura 2-23 mostra a relação entre o coeficiente β e a espessura do pavimento.

$$\sigma = \beta \frac{E\alpha\theta}{2(1-\mu)} \quad 2-21$$

Onde,

σ = tensão térmica (MPa)

E = módulo de elasticidade do concreto;

μ = coeficiente de Poisson do concreto;

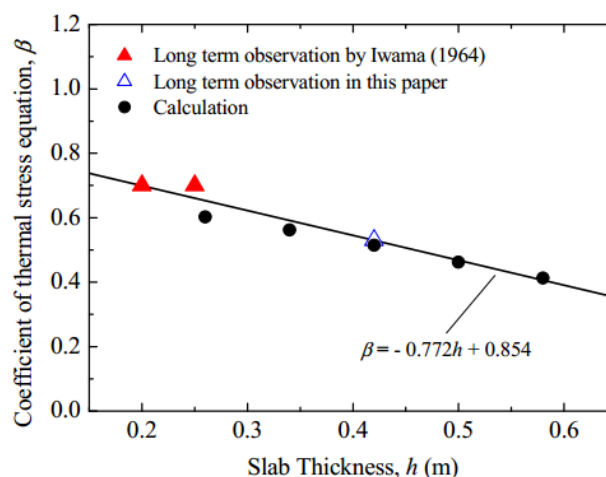
α = coeficiente de expansão térmica do concreto;

θ = gradiente térmico linear entre topo e fundo da placa;

β = coeficiente dependente da espessura do pavimento;

$\beta = -0,772h + 0,584$; h = espessura do pavimento.

Figura 2-23 - Relação entre o coeficiente de tensão térmica e a espessura do pavimento



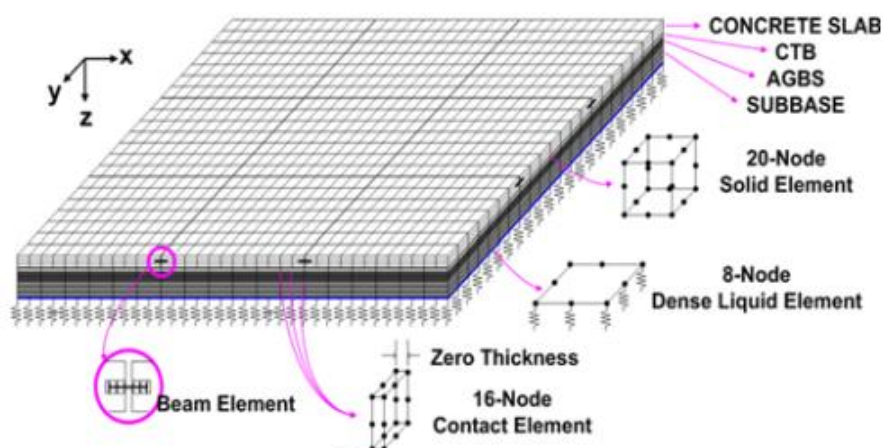
Fonte: Tsubokawa *et al.*, 2011, p. 7

2.3.2. Estudo de Kim, Park e Jeong (2013)

Os autores Kim, Park e Jeong (2013) estudaram a influência da temperatura no comportamento mecânico do pavimento de concreto do aeroporto em Kentucky, Estados Unidos. O objetivo do estudo é ilustrar a diferença nas tensões totais encontradas no pavimento considerando ou não o gradiente de temperatura entre o topo e o fundo das placas de concreto.

Análises utilizando o método dos elementos finitos através do software EverFE 2.25 foram realizadas considerando diversas combinações de carregamento. O modelo numérico foi definido com 9 placas de concreto de 6 x 6m e 43cm de espessura com uma base tratada com cimento, uma base com pedra britada e a sub-base. O modelo e os elementos utilizados na modelagem podem ser visualizados na figura 2-24.

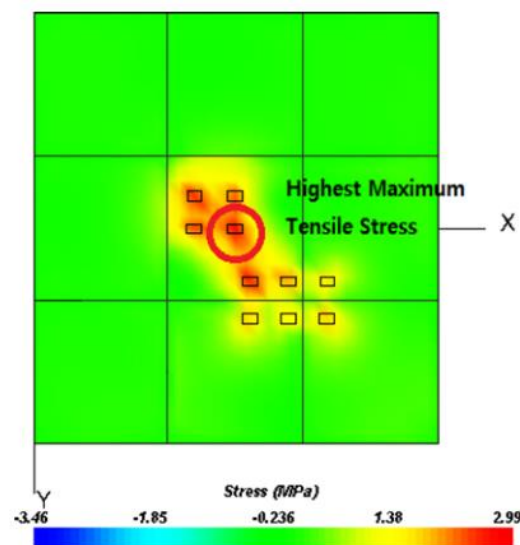
Figura 2-24 - Modelo numérico em elementos finitos



Fonte: Kim; Park; Jeong, 2013, p. 3

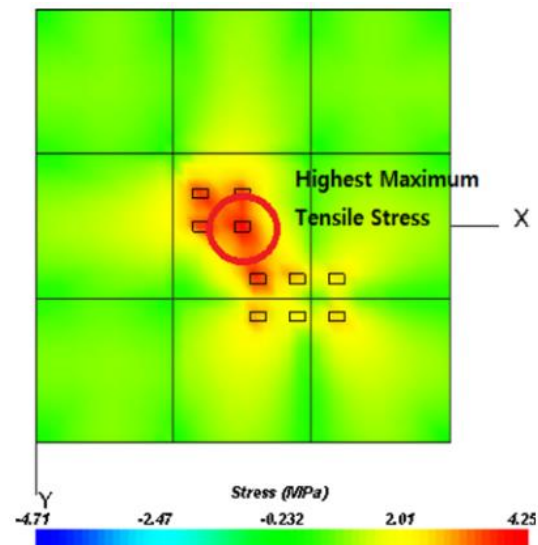
Para o carregamento devido ao tráfego, o Airbus A380 foi considerado na análise por se tratar da aeronave com maior peso de *takeoff* com aproximadamente 600.000kg. O gradiente de temperatura utilizado no pavimento foi de $\pm 0,33^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, baseado em outros estudos. As figuras 2-25 e 2-26 mostram a diferença nos resultados quando somente o tráfego é considerado e quando o ambos tráfego e gradiente de temperatura são considerados. A figura 2-27 mostra um gráfico que contém as máximas tensões de tração nas diferentes combinações de carga consideradas no estudo, observa-se que as maiores tensões são alcançadas nas combinações de tráfego com o gradiente térmico.

Figura 2-25 – Diagrama de tensões somente com o carregamento devido ao tráfego



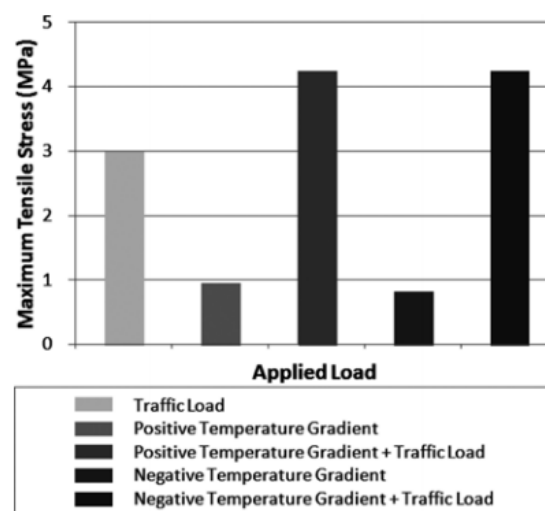
Fonte: Kim; Park; Jeong, 2013, P. 5

Figura 2-26 - Diagrama de tensões com o gradiente de temperatura e o tráfego considerados



Fonte: Kim; Park; Jeong, 2013, P. 5

Figura 2-27 - Máximas tensões de tração para diferentes combinações de carregamento



Fonte: Kim; Park; Jeong, 2013, P. 6

É importante ressaltar que os autores Kim, Park e Jeong (2013) utilizaram apenas o gradiente térmico de $0,33^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ no pavimento. Não foi realizado um estudo das condições ambientes do aeroporto para a determinação do gradiente térmico. O gradiente térmico considerado é linear, porém, outras

pesquisas como a de Tsubokawa et al. (2011) já relataram a influência de um gradiente não linear de temperatura.

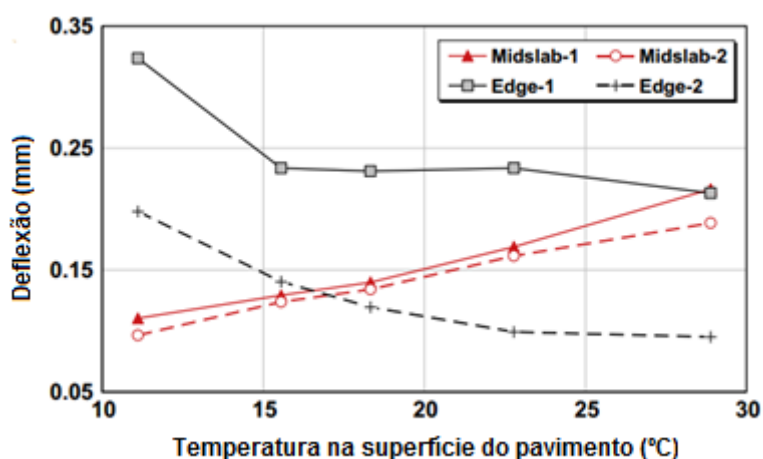
2.3.3. Estudo de Nam, Yeon e Behring (2014)

Esse estudo conduzido pelos autores Nam, Yeon e Behring (2014) também investigou a influência da temperatura no comportamento do pavimento de concreto em aeroporto. A pesquisa contém a medição em campo das deflexões em uma parte do pavimento do aeroporto em Austin, Texas nos Estados Unidos além de investigação numérica utilizando o método dos elementos finitos. Esse estudo se diferencia dos demais pelo foco nas deflexões ao invés das tensões nas placas de concreto.

A pesquisa abrange muitos objetivos, sendo os que melhor contribuem para essa dissertação: as medições em campo das deflexões de um pavimento de concreto em uso e a relação dos resultados com a variação de temperatura diária e o efeito da espessura do pavimento no empenamento da placa.

As deflexões foram monitoradas através de um Deflectômetro Dinâmico ao longo da profundidade da placa de um trecho do pavimento. A figura 2-28 mostra a relação das medições de deflexão no centro do vão e nas juntas das placas com a temperatura na superfície do pavimento. Pode-se inferir desse gráfico que a deflexão no centro da placa aumenta e nas bordas diminui na medida em que se aumenta temperatura no pavimento. Os autores Nam, Yeon e Behring (2014) explicam que durante as primeiras horas do dia o fundo da placa está mais quente que o topo da placa, então ocorre a curvatura côncava e a borda sobre uma deflexão para cima. Na medida em que as horas se passam, a superfície do pavimento é aquecida pela radiação solar, dessa forma, o gradiente de temperatura entre o topo da placa e fundo diminui, fazendo com que a deflexão nas bordas diminua e no centro aumente.

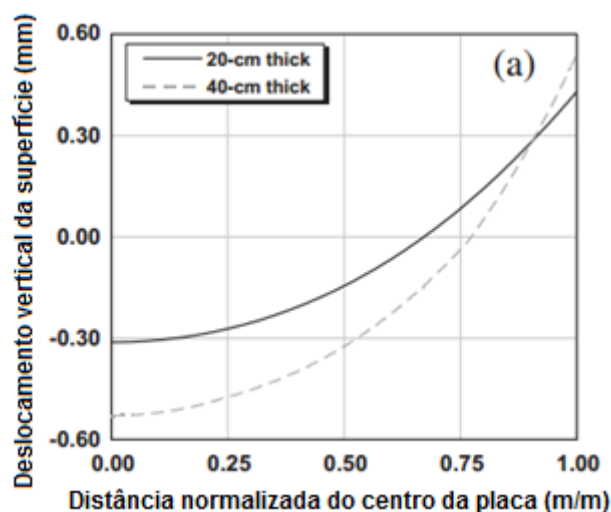
Figura 2-28 - Deflexão x Temperatura na superfície do pavimento



Fonte: Nam; Yeon; Behring, 2014, p. 4

Acerca da relação da espessura do pavimento com o empenamento da placa, os autores Nam, Yeon e Behring (2014) concluíram que a placa mais espessa apresenta maior variação de deflexão. O fenômeno é explicado, segundo os autores, pela baixa condutividade térmica do concreto que em maiores espessuras provoca maiores gradientes de temperatura entre topo e fundo da placa. A diferença de deflexão entre as espessuras de 20 cm e 40 cm pode ser observada na figura 2-31.

Figura 2-29 - Deslocamento vertical da placa para diferentes espessuras às 8:00h



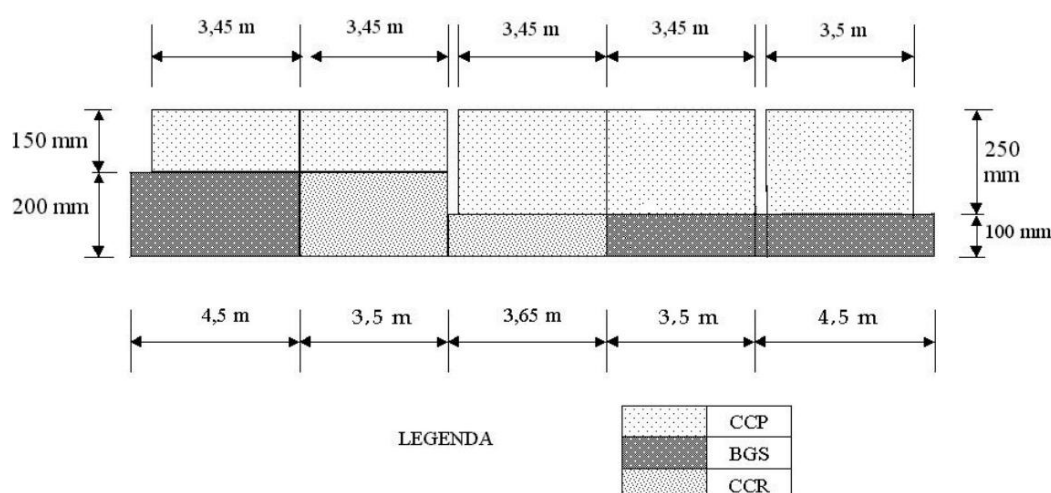
Fonte: Nam; Yeon; Behring, 2014, p. 8

2.3.4. Estudos de Severi e Balbo (2000; 2002)

Os autores Severi e Balbo realizaram um extensivo estudo sobre a influência das condições climáticas de países tropicais nos pavimentos de concreto. Os estudos resultaram na publicação de vários artigos nacionais e internacionais, entre eles alguns citados nessa qualificação (SEVERI e BALBO, 2002; BALBO e SEVERI, 2002; BALBO *et al.*, 2000) e a tese de doutorado de Andrea Severi (SEVERI, 2002). Nas publicações, foram propostos modelos de previsão de diferenciais térmicos em pavimentos de concreto simples baseados na comparação de dados coletados, experimentalmente, com fatores climáticos como temperatura ambiente, velocidade do vento, umidade e radiação solar.

Uma pista experimental foi construída no *campus* da Cidade Universitária em São Paulo durante o ano de 1999. A pista possui 15 placas de concreto de cimento Portland moldadas *in loco* dividida em cinco seções com diferentes características. Parâmetros como espessura e tipo de base foram modificados para cada seção da pista experimental, como mostra a figura 2-30. Foram utilizadas bases granulares em brita graduada simples (BGS) e base em concreto compactado com rolo (CCR) (BALBO *et al.*, 2000).

Figura 2-30 - Seções da pista experimental



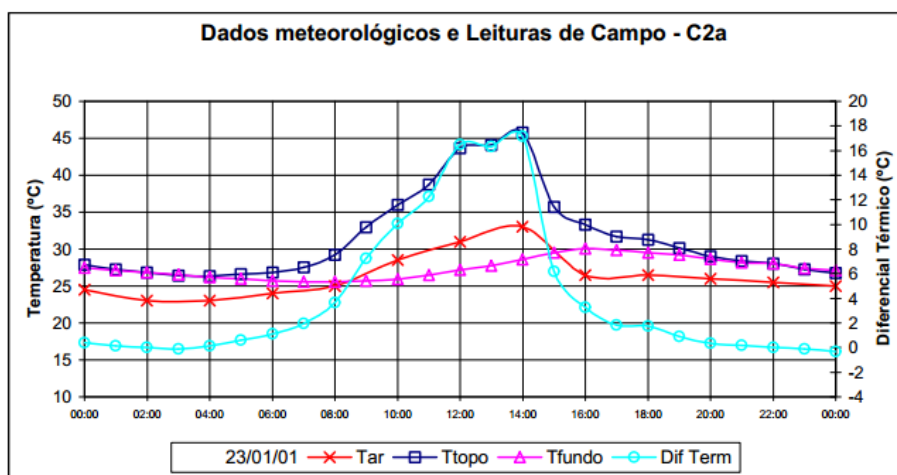
Fonte: BALBO *et al.*, 2000, p. 3

Para a coleta de dados, foram instalados medidores de deformação e temperatura. Os medidores de deformação são do tipo *strain gages* e os de temperatura são termorresistências do tipo PT-100. Os medidores foram instalados em locais estratégicos com previsão de maiores deformações. Além

disso, foram fornecidos diariamente pelo Centro Tecnológico de Hidráulica, no *campus* da USP, dados meteorológicos como variações de temperatura e umidade atmosférica, velocidade e direção de ventos e radiação solar e dados pluviométricos. A coleta de dados da pista experimental foi realizada com intervalos de 24h, sete dias por semana, com início em outubro do ano de 1999 (BALBO et al., 2000).

A tese de doutorado de Severi (2002) faz um descritivo dos dados coletados na pista experimental em termos de temperaturas e diferenciais térmicos observados (figura 2-31), valores extremos obtidos, descrição dos efeitos específicos do clima, não linearidade dos diferenciais térmicos, entre outras análises. Entre os resultados destacam-se o diferencial térmico encontrado durante dias de verão superiores a 15°C e durante dias de inverno de 10°C . A pesquisa mostra que os diferenciais térmicos são mais críticos durante o dia e, na maioria dos casos, positivos e não lineares (BALBO E SEVERI, 2002).

Figura 2-31 - Gráfico com dados meteorológicos e leituras de campo



Fonte: Severi, 2002, p. 138

Como resultados, foram desenvolvidos modelos para a previsão de temperatura máxima de topo e diferencial térmico máximo. Os resultados foram comparados com o modelo apresentado por Kuo (apud SEVERI, 2002) para climas temperados. Os resultados apresentaram uma boa concordância entre os modelos para as estações frias, porém, para as estações quentes foi concluído que o modelo de Kuo subestima os diferenciais térmicos. Portanto, o estudo de temperaturas para o clima tropical foi importante para que as

diferenças entre os climas sejam evidenciadas e levadas em consideração no momento da escolha do modelo a ser utilizado no dimensionamento de pavimentos de concreto. Entre os modelos propostos por Severi (2002), destacam-se as equações para previsão de temperatura de topo no verão e no inverno (equações 2.22 e 2.23) e para previsão do diferencial térmico máximo no verão e no inverno (equações 2.24 e 2.25).

Temperatura máxima de topo na primavera/verão:

$$T_{T,m\acute{a}x} = 11,94 + 1,01. NHI + 0,92. T_{ar} - 0.03. H \quad 2.22$$

Onde:

$T_{T,m\acute{a}x}$: temperatura de topo máxima (°C);

NHI : número de horas de insolação (h);

T_{ar} : temperatura atmosférica (°C);

H : umidade relativa do ar (%).

Temperatura máxima de topo no outono/inverno:

$$T_{T,m\acute{a}x} = 14,3 + 0,2. NHI + 0,75. T_{ar} - 0.07. H \quad 2.23$$

Diferencial térmico máximo na primavera/verão:

$$DT+ = -18,83 + 0,542. T_{t,m\acute{a}x} + 0,037. H \quad 2.24$$

Onde:

DT+ = Diferencial térmico máximo (°C)

Diferencial térmico máximo no outono/inverno:

$$DT+ = -6,534 + 0,509. T_{t,m\acute{a}x} + 0,0013. H \quad 2.25$$

2.3.5. Termografia aplicada à construção civil

A utilização da termografia na construção civil ainda é muito limitada, apesar das inúmeras aplicações possíveis. A termografia pode ser utilizada como ferramenta no diagnóstico de fissuras e de áreas degradadas em estruturas como edifícios, pontes, viadutos e barragens.

Através da variação de temperatura na superfície do material, a termografia auxilia na detecção de anomalias de maneira não destrutiva, rápida e à distância. Em muitos casos, o diagnóstico da manifestação patológica poderá necessitar de ensaios complementares. Mesmo com ensaios complementares, a termografia se mostra como um guia na definição da área de estudo e delimitação das áreas para realização de novos testes, o que torna o diagnóstico mais eficaz e rápido. Conhecida a área afetada, o reparo pode ser executado com mais exatidão, evitando deterioração de um componente sadio (BARREIRA, 2004). Na figura 2-32, uma região com umidade pode ser detectada na parede da edificação através da termografia. Com a delimitação da área afetada, o processo de diagnóstico e recuperação será facilitado.

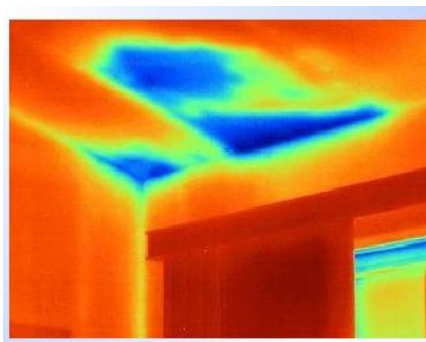
Figura 2-32 - Termografia de uma parede com umidade



Fonte: Barreira, 2004, p. 78

Outro exemplo de aplicação é na detecção de falhas no isolamento de uma parede. Como o revestimento é o mesmo em todo o trecho, a diferença de cores da termografia é resultante da diferença de temperatura na região, como pode ser observado na figura 2-33. A diferença de temperatura entre as regiões delimita as áreas onde o isolamento é deficiente ou não existe.

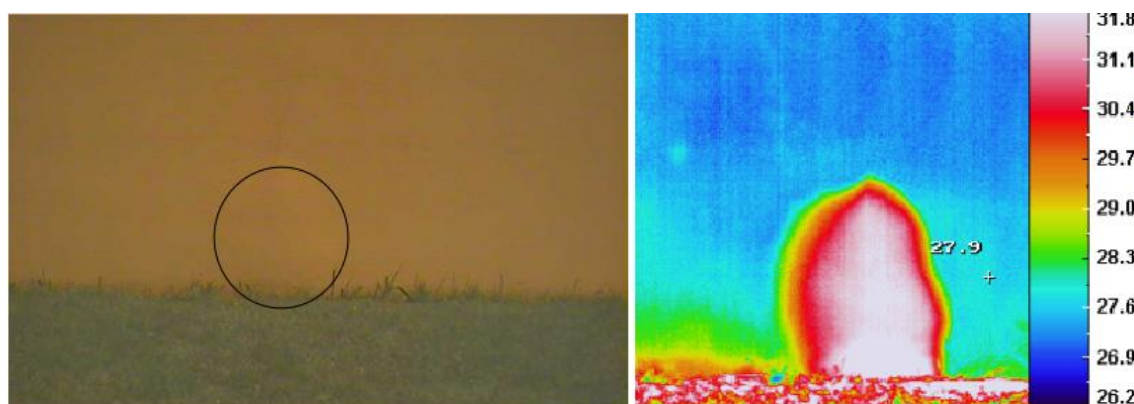
Figura 2-33 - Detecção de falhas no isolamento de uma parede



Fonte: Ingenheiro, 2018

A termografia também está sendo utilizada para detecção de manifestação patológicas em fachadas, como o destacamento em revestimentos de argamassa. O destacamento implica em uma perda significativa da capacidade do revestimento de proteger a fachada contra a água, além da redução da durabilidade desse revestimento. Um diagnóstico precoce dessa manifestação patológica é recomendável para que a evolução da anomalia seja interrompida e que o aspecto estético também seja protegido. A figura 2-34 mostra um exemplo de uma parede com destacamento com a imagem real e com um termograma. O destacamento não pode ser detectado através de olho nu, porém o termograma identifica a região com temperatura distinta, o que identifica a região com a manifestação patológica.

Figura 2-34 - Fachada salmão com destacamento - imagem real e termografia

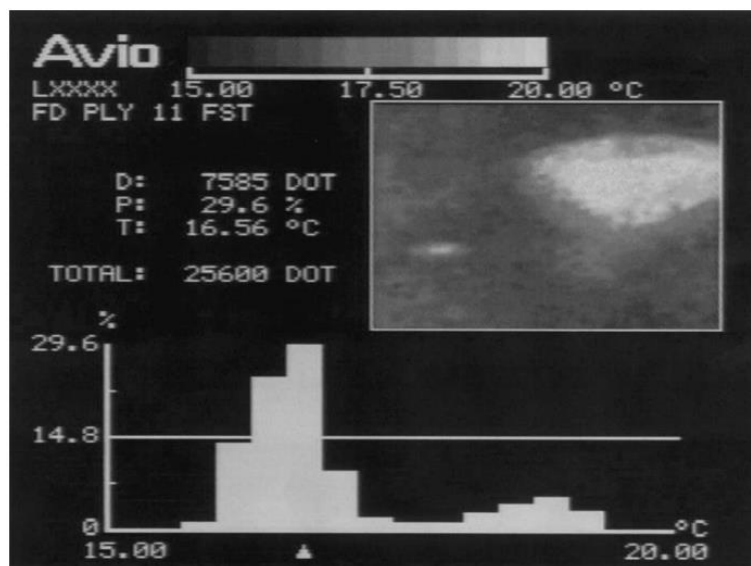


Fonte: Silva, 2012, p. 70

Em aeroportos, existem estudos como o de Moropoulou *et al.* (2001), o qual utiliza a termografia infravermelha para detecção de delaminações nos pavimentos asfálticos. Delaminações causam uma diferença de fluxo de calor

no material o que resulta em uma diferença de temperatura superficial. A técnica permite a investigação rápida de grandes áreas através de método não destrutivo. A figura 2-35 mostra um termograma do Aeroporto Internacional de Atenas do estudo de Moropoulou *et al.* (2001), o qual identifica uma região com temperatura superior às demais que corresponde a uma região delaminada.

Figura 2-35 - Termograma de um trecho de pavimento no Aeroporto Internacional de Atenas



Fonte: Moropoulou *et al.*, 2001, p. 331

CAPÍTULO 3

MODELAGEM NUMÉRICA

3. MODELAGEM NUMÉRICA

3.1. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um dos métodos mais indicados para calcular a distribuição de temperaturas em materiais sólidos, principalmente porque além dos parâmetros térmicos e mecânicos do material, a variação do tempo pode ser incorporada a análise térmica (chamada de análise transiente), aproximando a solução da realidade (MEHTA E MONTEIRO, 2006). Além da distribuição de temperaturas no material, o MEF também será utilizado para o cálculo da distribuição das tensões e deslocamentos resultantes dos carregamentos aplicados.

O MEF é amplamente utilizado no meio acadêmico para a modelagem numérica de problemas de engenharia. O método possibilita a solução de problemas termo tensionais cujos resultados se mostram satisfatórios quando verificados através de medições reais. Autores como Calmon (1995), Santos (2004), Agullo (1991), Sheibany e Ghaemian (2006) e Moreira e Calmon (2016) aplicaram o MEF na solução da análise térmica e tensional de barragens submetidas às solicitações ambientais e obtiveram resultados concordantes com os dados reais das barragens estudadas.

Este trabalho utiliza os programas computacionais ANSYS 15.0 (2014) e EverFE 2.23 (2003) para as análises utilizando o MEF. O ANSYS é utilizado para solução do problema de distribuição de temperaturas no pavimento de concreto, pois permite ao usuário a implementação da análise transiente de temperaturas. Para isso, utiliza-se o ambiente de simulação ANSYS Multiphysics que contém interface gráfica (GUI, Graphical User Interface), permitindo ao usuário a criação do modelo de maneira interativa através do teclado e mouse para acesso aos comandos. O ANSYS também possui o diferencial da linguagem de programação APDL (ANSYS Parametric Design Language) a qual facilita a organização das análises, criação do modelo e geração de resultados através de um arquivo de texto. O arquivo de texto é então lido pelo ANSYS Multiphysics e o usuário pode interagir com o modelo criado. A resolução com o uso de códigos mostra-se vantajosa na medida em que facilita a modificação dos parâmetros implementados e a criação de diversos modelos, análises e condições de contorno. Com isso, espera-se como resposta da

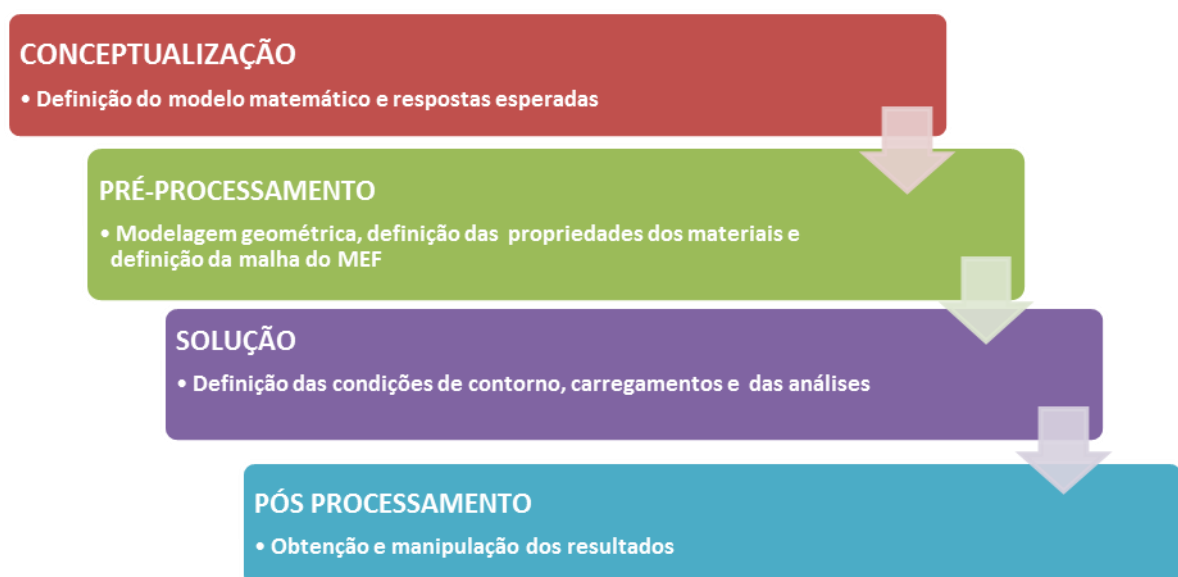
análise térmica utilizando o ANSYS a identificação dos gradientes críticos de temperatura no pavimento de concreto.

Para as análises estruturais do pavimento, esse trabalho utiliza o software EverFE 2.23 (2003) desenvolvido pela Universidade de Maine, nos Estados Unidos da América. O programa foi desenvolvido especificamente para a simulação das respostas dos pavimentos de concreto às cargas de eixos e efeitos ambientais. O EverFE (2003) possui interface gráfica de fácil utilização e permite a modelagem de juntas, barras de ligação, barras de transferência, cargas axiais de eixos e efeitos ambientais através de gradientes de temperatura. O programa consegue modelar gradientes lineares, bilineares e trilineares de temperatura ao longo da profundidade do pavimento. Como resultado, o programa fornece as distribuições de tensões e deslocamentos e também modela a deformada do pavimento.

3.2. Etapas para análise utilizando os softwares ANSYS e EverFE

De acordo com Codrington (2014), a análise usando os métodos numéricos pode ser dividida em quatro etapas principais, de acordo com o fluxograma abaixo (Figura 3-1).

Figura 3-1 - Fluxograma simplificado das etapas da resolução do MEF



Fonte: Autor

3.2.1. Conceptualização

A conceptualização consiste na definição de um modelo matemático que represente o real problema físico, porém simplificando a estrutura ao máximo a fim de facilitar a modelagem e diminuir o esforço computacional. No ANSYS serão modeladas as bases, sub-bases e as juntas do pavimento, não será necessária a modelagem das barras de ligação e barras de transferência uma vez que esta etapa tem como objetivo apenas a investigação da distribuição de temperaturas. No EverFE (2003) serão modeladas as bases, sub-bases, juntas do pavimento, barras de ligação e barras de transferência já que o objetivo nesta etapa é a avaliação das tensões e deslocamentos atuantes e a transferência de cargas entre as placas do pavimento.

3.2.1.1. *Questões a serem respondidas com as análises*

O objetivo dessa pesquisa é a avaliação do comportamento do pavimento devido à combinação das solicitações de carregamento axial devido ao tráfego e das solicitações ambientais. As análises poderão responder as questões abaixo listadas:

- Quais são os gradientes críticos de temperatura no pavimento?
- Quais períodos do ano em que atuam os gradientes críticos?
- Qual a combinação de carregamento mais desfavorável ao pavimento?
- Quais as tensões de tração máximas atuantes? Essas tensões ultrapassam a resistência à tração do concreto?

3.2.2. Pré-Processamento

Nessa etapa procede a definição do modelo geométrico. No primeiro momento é definido o número de dimensões do modelo, que varia de uma dimensão (elementos de barra) a três dimensões (elementos sólidos). A partir da definição são modelados os pontos, linhas e volumes conforme modelo geométrico.

Também são definidos os elementos e as propriedades dos materiais. A escolha do elemento depende do número de variáveis da análise. Existem elementos com um grau de liberdade apenas por nó e outros com até seis graus de liberdade por nó. Cada grau de liberdade é uma variável do problema e quanto maior o número de graus de liberdade maior é o trabalho computacional para a resolução do problema. Definidas a geometria, os elementos e as propriedades dos materiais, procede com a geração da malha. O aspecto de maior importância na malha é o tamanho dos

elementos. Em geral, quanto menor o tamanho dos elementos, mais precisa será solução numérica até certo limite onde o tamanho dos elementos não afetará o resultado final. É importante que a malha não tenha influência nos resultados, então, é necessária uma verificação da independência da malha nos resultados finais.

3.2.3. Solução

A etapa da solução envolve a definição dos carregamentos, das condições de contorno e das análises a serem executadas. Os carregamentos podem ser estruturais como força concentrada e carregamento distribuído e, também, pode ser térmico como fluxo de calor. Uma atenção especial deve ser dada às condições de contorno do problema. Modelos sem restrições suficientes podem não encontrar solução ou que essas soluções sejam distorcidas de modo que não representem a realidade. A definição das análises depende do objetivo do estudo. Podem ser realizadas análises estruturais, térmicas, estática, transientes, entre outros tipos.

3.2.4. Pós-processamento

O pós-processamento envolve a obtenção dos resultados gerados pela solução do problema pelo programa. Conforme a análise realizada, o programa fornece resultados de tensões nos nós, deslocamentos, momentos máximos, temperatura e etc. A obtenção dos resultados pode ser através de tabelas definidas pelo usuário e, também, por diagramas de cores, os quais representam a distribuição dos resultados encontrados em cada nó da malha.

3.3. Análise térmica

A influência das variações diárias e anuais da temperatura ambiente no comportamento dos pavimentos de concreto foi verificada pela primeira vez nos trabalhos pioneiros de Westergaard (1927 apud SEVERI, 2002) após verificação de fissuras no pavimento antes do mesmo ser liberado ao tráfego devido ao empenamento térmico. O tema foi estudado por diversos autores como, Mackiewicz (2014), Nam, Yeon e Behring (2014), Kim, Park e Jeong (2013), Tsubokawa, Mizukami e Saitou (2011), Belshe Et al. (2011) e Severi (2002), os quais verificaram que as tensões de origem térmica representam uma parcela significativa em relação as tensões totais nos pavimentos de concreto. 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. Dessa forma, é importante que o ambiente no qual o pavimento será inserido seja estudado para possibilitar a previsão das temperaturas e gradientes térmicos para que sejam considerados no dimensionamento, combinados com o carregamento devido ao tráfego de aeronaves nos pátios dos aeroportos.

No estudo térmico do pavimento, foram consideradas as variações da temperatura diária por mês de cada cidade estudada e da radiação solar incidente na superfície do pavimento como fontes de calor.

3.3.1. Temperatura ambiente

O autor Agullo (1991) descreve a temperatura ambiente diária a partir 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 3-1 representa a formulação do autor para a temperatura ambiente diária e as equações 3-2 a 3-5 representam os parâmetros utilizados na equação 1.

$$T = A \operatorname{sen} \left(2\pi \cdot \frac{t - b_1}{2b_2} \right) + B \quad (3 - 1)$$

Onde:

$$A = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (3 - 2)$$

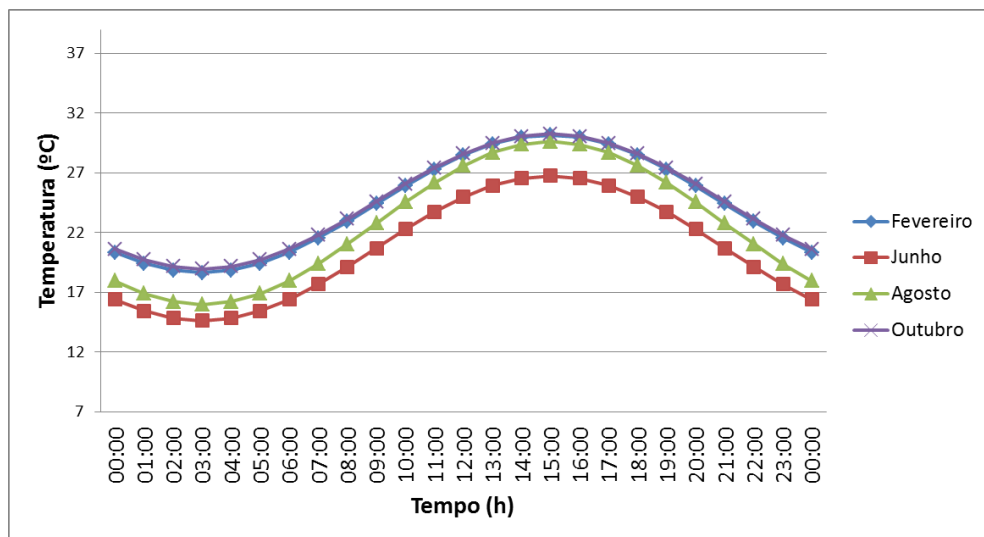
$$B = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3 - 3)$$

$$b_1 = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} \quad (3 - 4)$$

$$b_2 = h_{max} - h_{min} \quad (3 - 5)$$

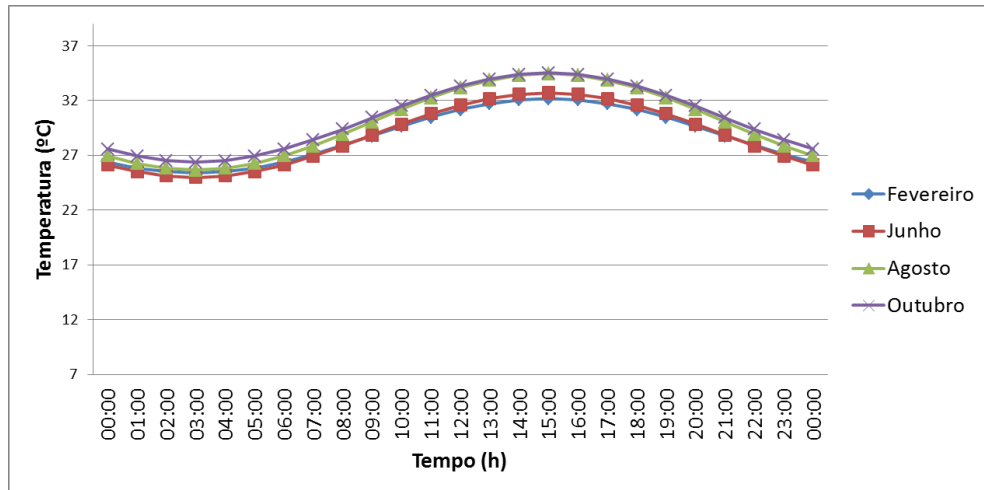
A equação (3-1) foi aplicada às capitais objetos dessa pesquisa, a saber, Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina. As temperaturas máximas e mínimas médias mensais foram coletadas no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016). As figuras 3-2 a 3-6 ilustram a distribuição diária de temperatura dos meses de fevereiro, junho, agosto e outubro das cinco capitais brasileiras.

Figura 3-2 - Distribuição diária de temperatura em Brasília



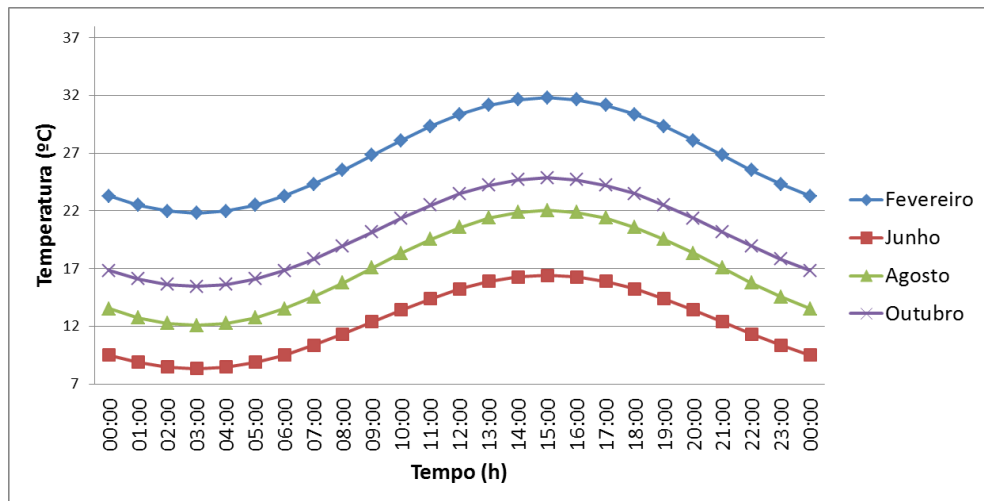
Fonte: Autor

Figura 3-3 - Distribuição diária de temperatura em Manaus



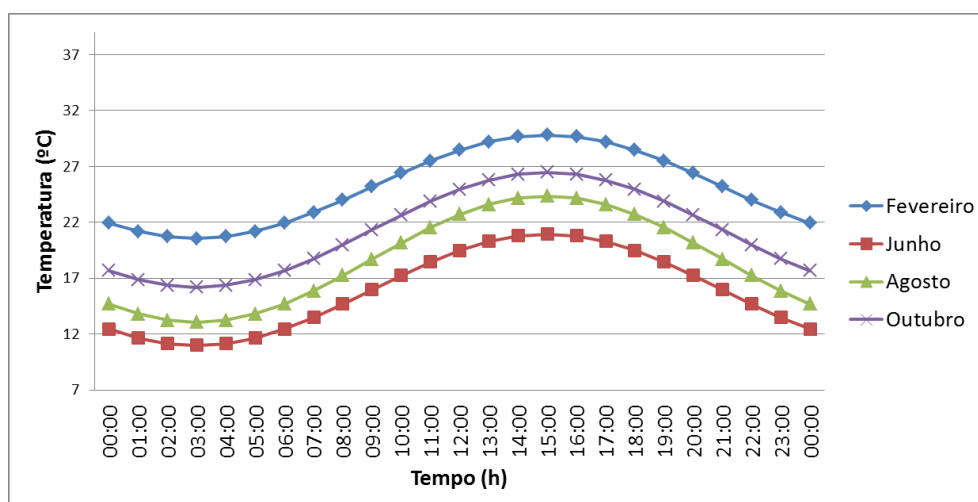
Fonte: Autor

Figura 3-4 - Distribuição diária de temperatura em Porto Alegre



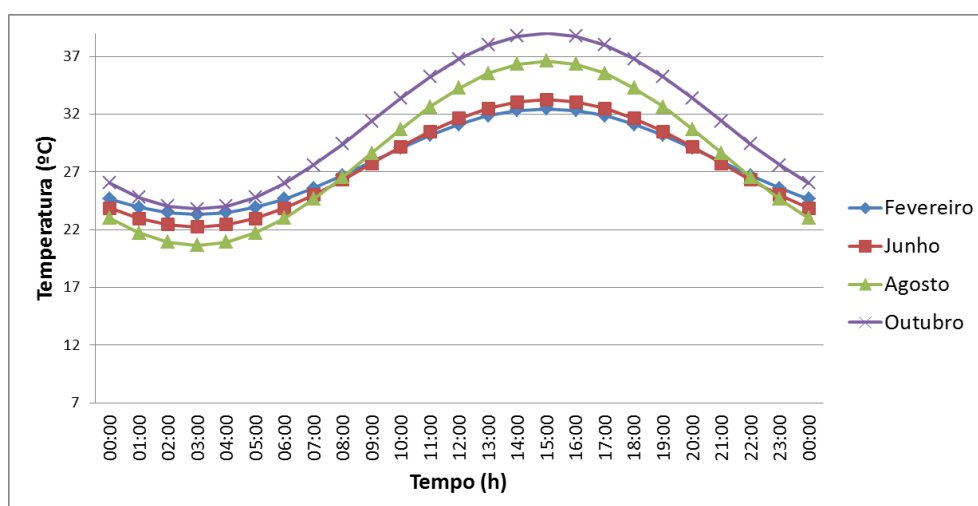
Fonte: Autor

Figura 3-5 - Distribuição diária de temperatura em São Paulo



Fonte: Autor

Figura 3-6 - Distribuição diária de temperatura em Teresina



Fonte: Autor

As maiores amplitudes térmicas encontradas foram no município de Teresina no mês de agosto com 15,96°C de diferença entre a máxima e a mínima temperatura diária. Brasília também apresentou uma amplitude térmica considerável de 13,85°C no mês de julho. As menores amplitudes térmicas diárias foram observadas em Manaus, a mínima foi de 6,40°C no mês de março. A tabela 3-1 apresenta os valores de temperaturas máximas médias e mínimas médias, mensais, da série histórica de cada cidade, as quais foram retiradas do INMET (2016).

Tabela 3-1 - Temperaturas máximas e mínimas consideradas nas análises

	Brasília		Manaus		Porto Alegre		São Paulo		Teresina	
Mês	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Janeiro	27,11	18,56	33,55	26,72	32,02	21,33	27,93	19,16	34,38	23,35
Fevereiro	30,17	18,64	32,19	25,38	31,81	21,81	29,82	20,56	32,47	23,31
Março	29,32	18,96	31,85	25,45	27,83	19,49	28,55	19,20	32,52	23,08
Abril	29,70	17,96	32,26	25,30	27,12	19,25	29,46	18,97	32,60	23,04
Maiο	28,91	16,65	32,46	25,81	19,61	12,25	22,89	14,28	32,69	22,99
Junho	26,76	14,63	32,71	24,99	16,41	8,32	20,94	10,98	33,24	22,24
Julho	28,53	14,68	33,44	25,14	20,08	10,42	23,94	12,55	34,15	21,75
Agosto	29,61	15,96	34,45	25,66	22,04	12,07	24,34	13,04	36,61	20,65
Setembro	31,63	18,31	33,50	25,56	22,06	12,40	24,69	14,27	38,30	22,67
Outubro	30,25	18,95	34,50	26,37	24,85	15,45	26,46	16,17	39,03	23,79
Novembro	27,96	18,40	33,89	25,90	27,54	15,86	26,52	16,40	38,74	24,48
Dezembro	28,79	18,26	31,39	24,78	30,95	19,97	29,68	18,27	38,62	24,83
Obs.: Temperaturas máximas e mínimas em °C										

Fonte: Autor

3.3.2. Radiação Solar

O Atlas Solarimétrico do Brasil (2000) tem por objetivo aprimorar a base de dados sobre o recurso solar disponível no Brasil. O banco de dados e as cartas elaboradas fornecem a distribuição espacial e temporal necessárias para dar o suporte básico às atividades que se desenvolvem no campo da tecnologia solar. Para esse estudo, os dados de radiação solar global diária ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$) e o valor da insolação diária (h) de cada capital foram retirados das cartas disponibilizadas no atlas solarimétrico. É importante citar que para o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), o número de horas de insolação em um dia significa a quantidade de horas em que a superfície ficou submetida a uma radiação solar direta que supera um limiar de $120 \text{ W}/\text{m}^2$. Na tabela 3-2 estão apresentados os valores de radiação solar global e insolação diárias utilizadas para os cinco municípios estudados.

Tabela 3-2 - Valores de radiação solar global diária e insolação diária por município e por mês

Mês	Brasília		Manaus		Porto Alegre		São Paulo		Teresina	
	Rad. Solar Global	Insolação	Rad. Solar Global	Insolação	Rad. Solar Global	Insolação	Rad. Solar Global	Insolação	Rad. Solar Global	Insolação
Janeiro	16	5	14	3	22	8	16	5	16	5
Fevereiro	18	5	14	3	18	7	16	5	16	5
Março	18	6	14	3	16	6	14	5	16	5
Abril	16	7	14	3	12	6	14	5	16	6
Maio	16	7	14	4	10	5	10	5	18	7
Junho	14	8	16	6	8	4	10	5	18	8
Julho	16	8	16	6	8	5	12	6	18	9
Agosto	18	8	18	7	10	4	12	6	20	9
Setembro	18	7	18	5	12	5	12	4	20	9
Outubro	18	6	18	5	16	6	16	4	20	8
Novembro	16	5	16	5	18	7	16	5	18	7
Dezembro	16	4	14	4	22	7	16	4	16	6
Obs.: Radiação Solar Global diária (MJ/m ² .dia) e Insolação diária (h)										

Fonte: Autor

Nota-se pela tabela que, dentre as capitais estudadas, Porto Alegre se destaca pelo alto índice de radiação solar nos meses de janeiro e dezembro, 22 MJ/m².dia e pelo baixo índice de radiação nos meses de junho e julho com o valor de 8 MJ/m².dia, os quais são os dois valores extremos do conjunto de dados. Quanto à insolação diária, Teresina possui o maior número de horas de insolação em um dia com 9h nos meses de julho, agosto e setembro. Em contrapartida, Manaus apresentou o menor valor de insolação diária, 3h apenas nos meses de janeiro a abril.

3.3.3. Calor emitido pelas turbinas das aeronaves

Foi levantada uma hipótese ao longo da pesquisa de que o calor emitido pelas turbinas dos aviões, quando estacionado no pátio de aeronaves, aumenta a temperatura da superfície do pavimento, e, portanto, poderia ser considerado como uma condição de contorno do problema. Na bibliografia, não há registros acerca desse tema.

Com o objetivo de verificar em campo as temperaturas do pavimento de concreto em um pátio com aeronaves estacionadas logo após aterrissagem, foi solicitado à INFRAERO, a qual gerencia as operações do aeroporto Eurico de Aguiar Salles em

Vitória-ES, autorização para medição em campo das temperaturas do pavimento de concreto.

A autorização foi concedida e a visita técnica foi agendada para o dia 19/07/2017 com o acompanhamento de técnicos da INFRAERO, para que o acesso aos aviões pudesse ser liberado.

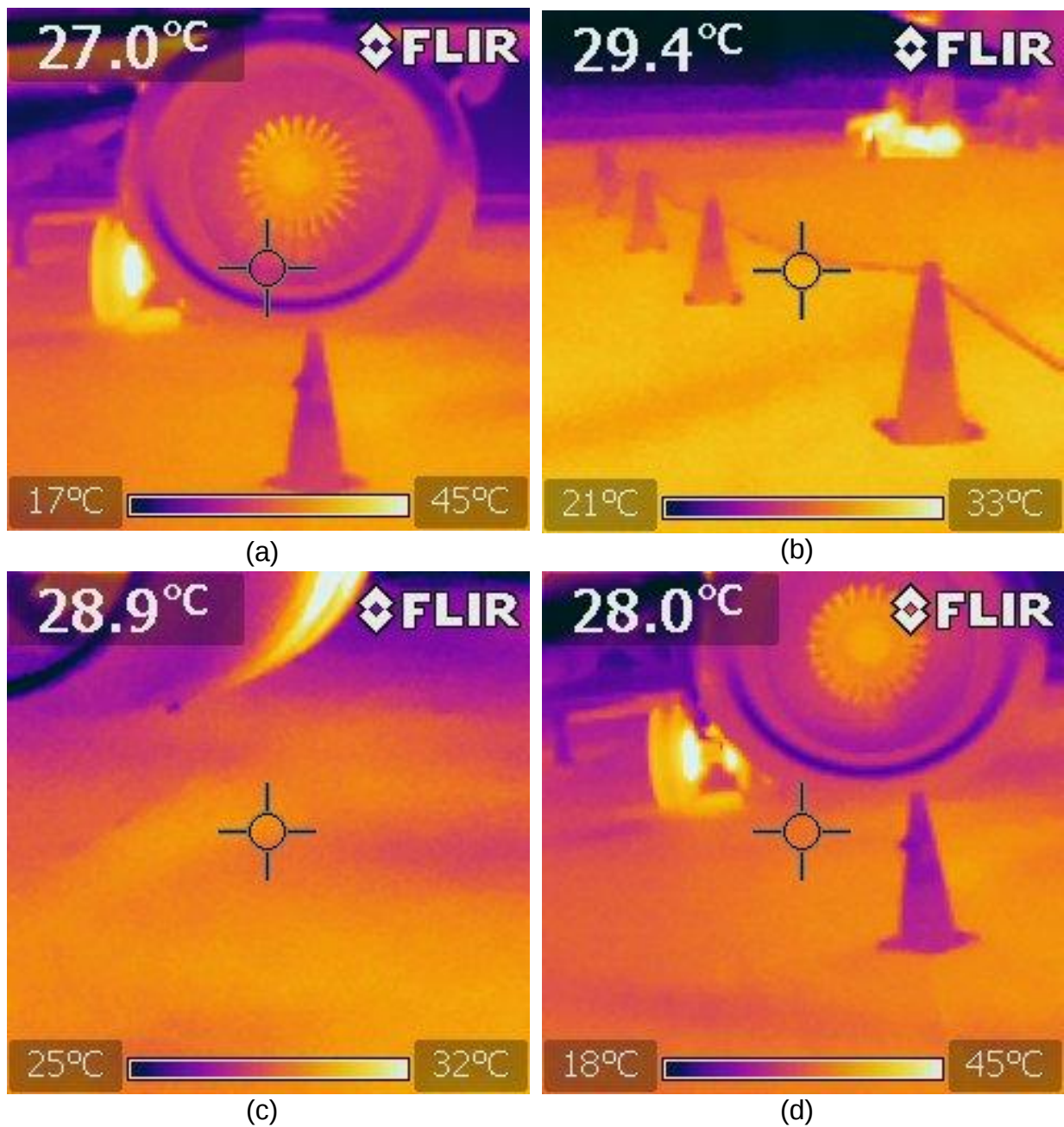
Para as medições de temperatura, foi utilizado um termógrafo, modelo FLIR i7, o qual foi disponibilizado pelo Departamento de Física da UFES. O equipamento é de fácil manuseio e fornece imagens térmicas em escala de cores e também aponta a temperatura exata do foco, como pode ser observado na figura 3-7, a qual é um registro do dia 19/07/2017, no aeroporto Eurico de Aguiar Salles.

Figura 3-7 - Termógrafo FLIR i7 em uso no dia 19/07/2017



A visita técnica no aeroporto iniciou-se por volta das 13:00h e finalizou-se às 18:00h da tarde. Foram feitas várias termografias da turbina e do pavimento logo após estacionamento da aeronave para desembarque dos passageiros. As figuras 3-8 e 3-9 mostram alguns dos registros realizados.

Figura 3-8 – Termografias registradas a partir do horário de 14:27h: (a) Turbina da aeronave; (b) Pavimento de concreto abaixo da asa da aeronave; (c) Pavimento abaixo da Turbina; (d) Pavimento abaixo da Turbina

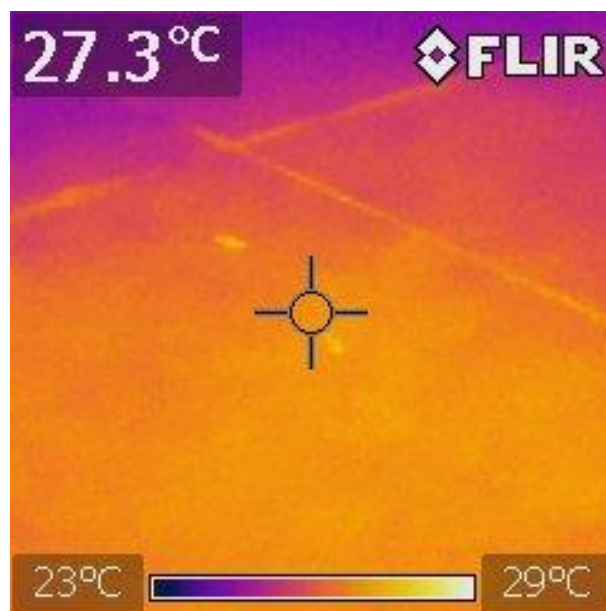


Fonte: Autor

Figura 3-9 – Termografias registradas antes e depois do estacionamento de uma aeronave. (a) Foto real do local de estacionamento; (b) Termografia do pavimento antes da chegada da aeronave; (c) Termografia do momento da chegada da aeronave; (d) Turbina da aeronave; (e) e (f) pavimento abaixo da turbina da aeronave



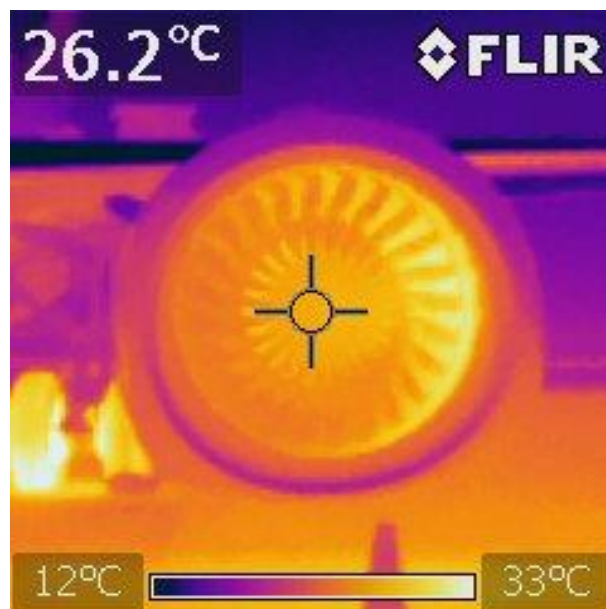
(a)



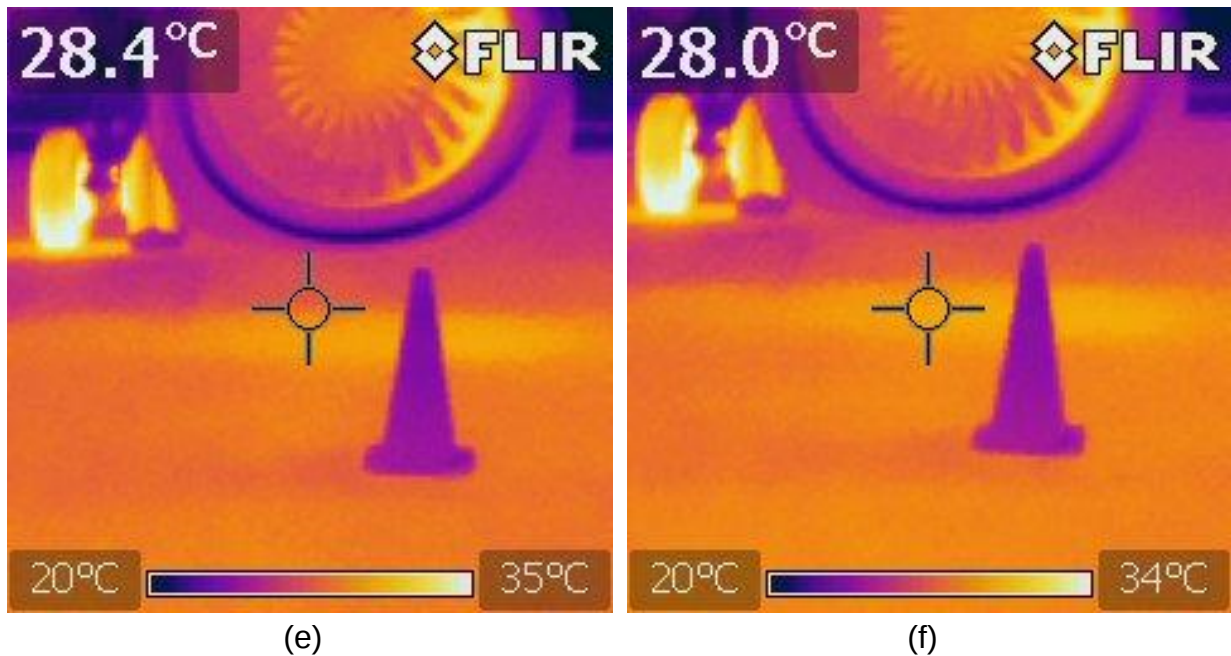
(b)



(c)



(d)



Fonte: Autor

Como pode ser observada nas figuras 3-8 e 3-9, a turbina não apresenta temperaturas muito elevadas quando a aeronave se encontra estacionada no pátio, atingindo no máximo 33°C no seu interior e a casa casca da turbina apresenta temperaturas ainda mais baixas. Também pelas imagens, é possível observar que a temperatura do pavimento na região das turbinas praticamente não varia após o estacionamento da aeronave, passando de 27,3°C antes da chegada da aeronave (figura 3-9 - (b)) para 28,4°C após chegada da aeronave (figura 3-9 – (e)).

Portanto, após inspeção em campo, é possível concluir que a hipótese levantada acerca do aumento de temperatura do pavimento devido ao calor emitido pelas turbinas das aeronaves não é verdadeira, sendo assim, esse fator não será considerado uma condição de contorno desse trabalho.

3.3.4. Modelo Numérico

O software ANSYS®/Multiphysic, Versão 15.0 (2014) foi utilizado para a modelagem em elementos finitos de uma seção de um pavimento de concreto hipotético. O elemento escolhido foi o PLANE 77. O modelo geométrico consiste em uma seção de um pavimento de concreto hipotético. A seção transversal da placa de concreto com 6m de comprimento é composta 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 modelo foi concebido em duas dimensões com uma malha quadrada de comprimento igual a 0,05m, totalizando 7843 nós e 2520 elementos. As

propriedades térmicas e mecânicas são provenientes da tese de Calmon (1995), as quais variam em função do agregado graúdo mais utilizado nos concretos de cada região. A tabela 3-3 contém o resumo das propriedades dos materiais considerados nas simulações.

Tabela 3-3 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico

Cidade	Agregado	Densidade (kg/m³)	E (MPa)*	Coef. de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /°C)	Condutividade Térmica (W/m.°C)	Coef. de Poisson
Brasília	Calcário	2400,00	27605,22	10,00	2,5	0,20
Manaus	Seixo Rolado	2400,00	34966,61	10,00	2,50	0,20
Porto Alegre	Basalto	2400,00	36806,96	9,00	1,70	0,20
São Paulo	Granito	2400,00	30672,46	12,00	3,50	0,20
Teresina	Granito	2400,00	30672,46	10,00	2,50	0,20
* $E = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$, sendo o $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)						

Fonte: Autor

Foi realizada uma análise transiente por um período de um ano, com *time-step* de uma hora. No total foram 8760 *time-steps*. As condições de contorno variaram a cada mês do ano através de leitura de arquivo .txt com os valores. Para cada município, foi gerado um arquivo .txt contendo as temperaturas de cada *time-step* ao longo da profundidade do pavimento. 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.

3.3.5. Carregamento e condições de contorno

3.3.5.1. Temperatura Ambiente

O efeito ambiental foi considerado na análise transiente. Foi definida uma equação para cada mês do ano (equação 3-1), variando as temperaturas máximas e mínimas médias de cada mês. Com os dados de cada município, foram gerados em uma planilha do Excel os valores de temperatura durante o dia em cada mês do ano.

Esses valores foram introduzidos em um único arquivo .txt contendo a variação de temperatura ao longo do dia de todos os dias do ano, resultado em um arquivo com 8760 valores. Esse arquivo é lido pela rotina do ANSYS® a cada *time-step*.

3.2.1.1. Radiação Solar

O cálculo do aumento de temperatura em uma superfície devido a radiação solar é de difícil implementação numérica, já que o problema passa a ser tratado com não-linear. Nessa pesquisa, a radiação foi implementada como um aumento da temperatura ambiente, o qual é uma técnica difundida por diversos autores como Moreira e Calmon (2016) e Kordun (2015). Esse aumento de temperatura foi definido pela norma Russa DBN V.1.2-2:2006 através da equação 3-6.

$$\Delta T = 0,05 \cdot S_{max} \cdot k \cdot k_1 \quad (3-6)$$

Onde:

S_{max} : Valor máximo da radiação solar total W/m²

k: valor de acordo com orientação superfície definida pela tabela 11.4 da norma – no caso dos pavimentos de concreto: k = 1,0 (vertical)

k_1 : valor de acordo com o material de construção definido pela tabela 11.5 da norma – no caso dos pavimentos: Concreto com espessura variando entre 15 a 39cm: $k_1 = 0,4$

A fórmula (3-6) foi implementada para cada município de acordo com o procedimento descrito a seguir:

- a) Foram calculadas as radiações correspondentes a cada hora de insolação durante o dia, em cada mês do ano a partir da fórmula 3-7.

$$S_{max} = I(t) = \frac{2W}{T_0} \text{sen}^2 \left(\frac{\pi \cdot t}{T_0} \right) \quad (3-7)$$

Onde:

I(t) = Intensidade de radiação solar

W = radiação global diária

T_0 = Insolação diária (h)

- b) A partir do cálculo de S_{max} , foram calculados os ΔT para cada hora de insolação pela fórmula 3-6. O ΔT calculado é considerado o aumento máximo de temperatura devido à radiação solar.

- c) Os valores de ΔT são somados aos valores da temperatura diária nos horários de insolação solar, sendo que o maior ΔT foi considerado no horário de 12:00h.

A equação 3-7 foi baseada na função senoidal 3-8 (equação 6, Emerson, 1973 apud Calmon, 1995) para a intensidade de radiação solar ($I(t)$) variando no tempo (t) sendo a (W) e insolação (T_0) as variáveis independentes. Essa função foi escolhida, pois o acréscimo de temperatura será proporcional ao aumento da intensidade de radiação solar no dia.

$$I(t) = \frac{2W}{T_0} \text{sen}^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right) \quad (3-8)$$

Os valores do acréscimo de temperatura devido a radiação solar foram somados aos valores de temperatura ambiente diários e também fazem parte do arquivo .txt mencionado no item anterior, o qual é lido na rotina do ANSYS® a cada *time-step*.

O coeficiente de transmissão de calor por convecção (h_c) expresso em W/m^2K foi calculado pela expressão de Kehlbeck (equação 3-9) apresentada em Agullo (1991) e também utilizada na pesquisa de Moreira e Calmon (2016). Na equação, “ v ” representa a velocidade do vento (m/s), a qual foi considerada igual a 3,0 m/s nessa pesquisa.

$$h_c = 3,83v + 4,7 \quad (3-9)$$

Nessa pesquisa, foi considerado que o coeficiente de convecção é constante e igual a 58176 $W/m^2.h.^{\circ}C$.

3.3. Análise termo tensional

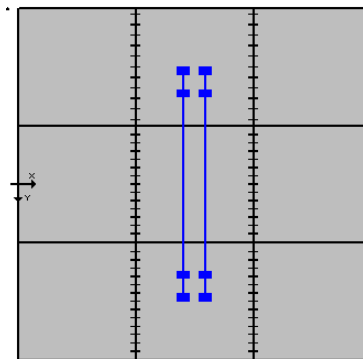
Para as análises termomecânicas do pavimento, essa pesquisa utilizou o software EverFE 2.23 (2003) desenvolvido pela Universidade de Maine, nos Estados Unidos da América. O programa foi desenvolvido, especificamente, para a simulação das respostas dos pavimentos de concreto às cargas de eixos e efeitos ambientais. O EverFE (2003) possui interface gráfica de fácil utilização e permite a modelagem de juntas, barras de ligação, barras de transferência, cargas axiais de eixos e efeitos ambientais através dos gradientes de temperatura. O programa pode modelar gradientes de temperatura lineares, bilineares e trilineares ao longo da profundidade

do pavimento. Como resultado, o programa fornece as distribuições de tensões e deslocamentos e também modela a deformada do pavimento.

3.3.1. Modelo Numérico

O modelo utilizado é composto de nove placas, divididas em 3 linhas e 3 colunas, com dimensões de 4,5x4,5m, 5,5x5,5m e 7,5x7,5m 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 3-3. 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 3-10 ilustra a configuração das placas, barras de transferência e o carregamento devido ao tráfego.

Figura 3-10 - Planta baixa do modelo utilizado na análise termo tensional



Fonte: Autor

3.3.2. 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. O software calcula as pré-deformações devido ao efeito do gradiente térmico. Essas pré-deformações são convertidas em forças nos nós, através da integração dos elementos e depois subtraídas das deformações totais durante o cálculo das tensões internas. Para esse artigo, o gradiente térmico é o resultado da análise térmica devido ao efeito ambiental do clima das capitais Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Temperaturas e diferenciais térmicos observados nas cinco regiões brasileiras

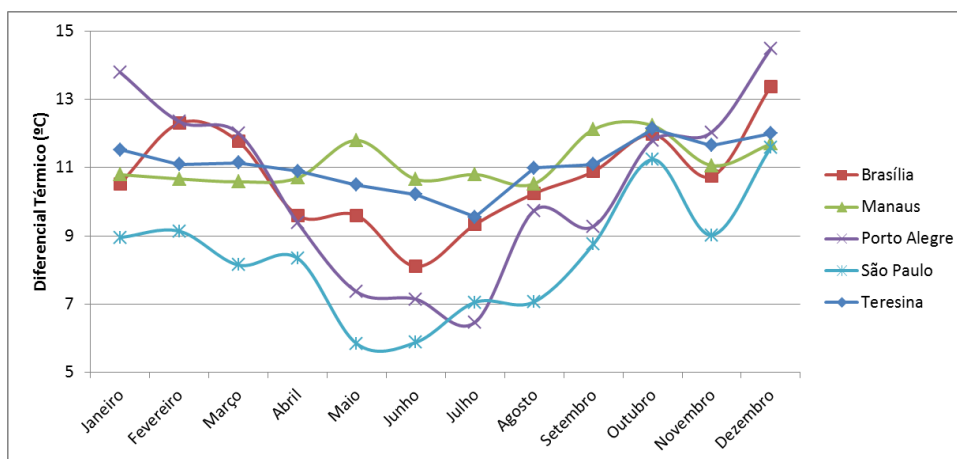
O objetivo da análise térmica é a verificação dos gradientes de temperaturas que ocorrem no pavimento devido às condições ambientais locais. Essa pesquisa considerou as temperaturas máximas e mínimas e a radiação solar diária, por mês, dos municípios de Brasília, Manaus, Porto Alegre, São Paulo e Teresina, os quais representam as cinco regiões brasileiras centro-oeste, norte, sul, sudeste e nordeste, respectivamente.

A rotina do ANSYS® gerou um arquivo .txt contendo as temperaturas ao longo da profundidade do pavimento de cada *time-step*. Foi considerado o dia 14 de cada mês como o dia típico, pois em meados de cada mês os resultados já haviam convergido.

4.1.1. Diferenciais térmicos observados ao longo do ano

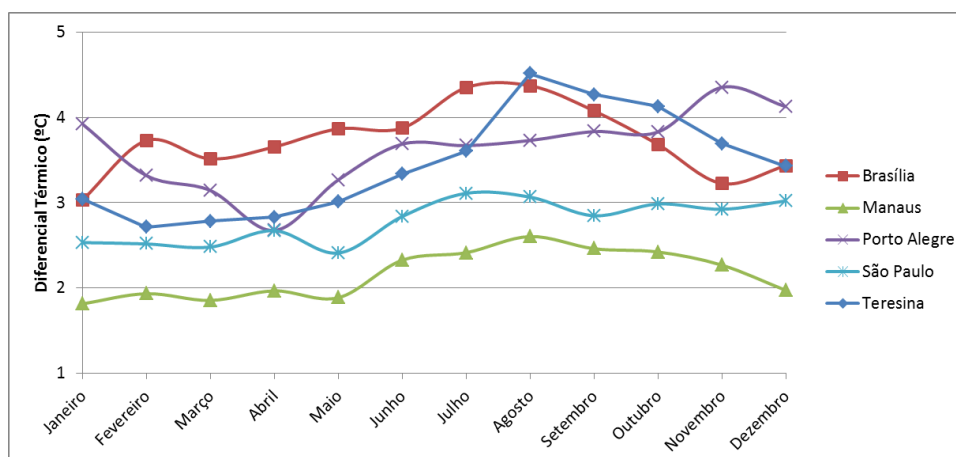
Foram comparados o diferencial térmico entre topo e fundo do pavimento de todas as regiões ao longo do ano. Os dados da figura 4-1 representam os maiores diferenciais térmicos positivos encontrados, enquanto que na figura 4-2 os diferenciais térmicos negativos foram representados.

Figura 4-1 - Diferenciais térmicos positivos observados ao longo de um ano



Fonte: Autor

Figura 4-2 - Diferenciais térmicos negativos observados ao longo do ano



Fonte: Autor

Na figura 4-1, é possível observar que os maiores diferenciais térmicos positivos encontrados ocorrem na primavera/verão, independente da região do país. Também se observa, um comportamento semelhante no inverno, o qual comporta os menores gradientes positivos. Já na figura 4-2, observa-se que o diferencial negativo possui pouca variação ao longo do ano, comparado ao gradiente positivo. O comportamento dos diferenciais térmicos positivos é semelhante ao comportamento da temperatura ambiente ao longo do ano (item 3.3.1). Observa-se baixa variação mensal em Manaus e Teresina da temperatura ambiente e isso se refletiu nos diferenciais térmicos, os quais tiveram uma variação máxima ao longo do ano de 1,70°C e 2,59°C, respectivamente. Contrariamente, em Brasília, Porto Alegre e São Paulo há grande variação da temperatura anualmente, assim como os diferenciais térmicos com variação máxima de 5,28°C, 8,02°C e 5,75°C, respectivamente.

A tabela 4-1 contém os valores críticos de temperaturas e diferenciais e a figura 4-3 compara os máximos diferenciais térmicos positivos e negativos de cada cidade estudada.

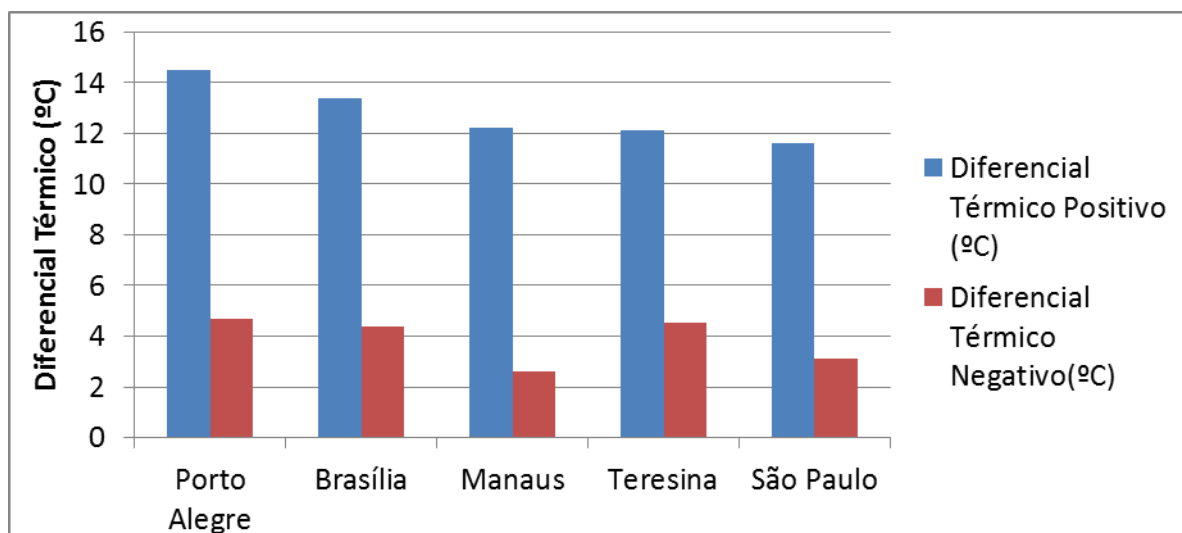
Tabela 4-1 - Diferenciais térmicos e temperaturas críticas encontradas

Diferencial Térmico Positivo (Temp. topo > Temp. fundo)					
Cidade	Diferencial Térmico Positivo (°C)	Dia	Horário	Temp. Topo (°C)	Temp. Fundo (°C)
Porto Alegre	14,48	14/12/2017	13:00	42,34	27,86
Brasília	13,39	14/12/2017	13:00	38,82	25,43
Manaus	12,23	14/10/2017	13:00	44,37	32,14
Teresina	12,14	14/10/2017	13:00	44,91	32,77
São Paulo	11,59	14/12/2017	13:00	37,87	26,28

Diferencial Térmico Negativo (Temp. topo < Temp. fundo)					
Cidade	Diferencial Térmico Negativo(°C)	Dia	Horário	Temp. Topo (°C)	Temp. Fundo (°C)
Brasília	4,37	14/08/2017	03:00	21,46	25,83
Manaus	2,60	14/08/2017	03:00	29,30	31,90
Porto Alegre	4,67	14/11/2017	03:00	20,23	24,90
São Paulo	3,11	14/07/2017	03:00	17,50	20,61
Teresina	4,51	14/08/2017	03:00	26,63	31,14

Fonte: Autor

Figura 4-3 - Máximos diferenciais térmicos encontrados



Fonte: Autor

O maior gradiente térmico positivo foi encontrado na cidade de Porto Alegre, 14,48°C, no mês de dezembro, ou seja, na primavera/verão, no horário de 13:00h. As outras cidades apresentaram o gradiente térmico máximo positivo em outubro e dezembro, também nas estações primavera/verão. A cidade com menor gradiente

térmico positivo foi São Paulo com 11,59°C de diferença de temperatura entre topo e fundo do pavimento. Quanto ao diferencial térmico negativo, os valores máximos encontrados não diferem consideravelmente, a diferença entre o maior gradiente térmico negativo (Teresina) e o menor (Manaus) é de 1,91°C. O mês de ocorrência também não apresentou um padrão como ocorreu com os valores de gradiente máximo positivo, Porto Alegre, por exemplo, teve seu diferencial máximo na primavera enquanto São Paulo, no inverno.

Com os resultados encontrados, é possível associar a magnitude dos diferenciais térmicos com a condutividade térmica considerada para cada cidade em função do agregado graúdo mais utilizado, comparando os resultados da tabela 4-1 com os dados da tabela 3-3, percebe-se que o maior diferencial térmico positivo, 14,48°C em Porto Alegre, corresponde ao menor valor de condutividade térmica, 1,7W/m.°C, pois o agregado mais utilizado é o basalto. Além disso, o menor diferencial térmico, 11,59°C em São Paulo corresponde a maior condutividade térmica de 3,5W/m.°C, onde o agregado mais utilizado é o granito.

A influência da temperatura e da radiação solar pode ser melhor observada ao analisar a temperatura de topo do pavimento. Teresina, a qual possui as maiores médias mensais de temperatura entre as cidades analisadas, foi a cidade que apresentou a maior temperatura de topo.

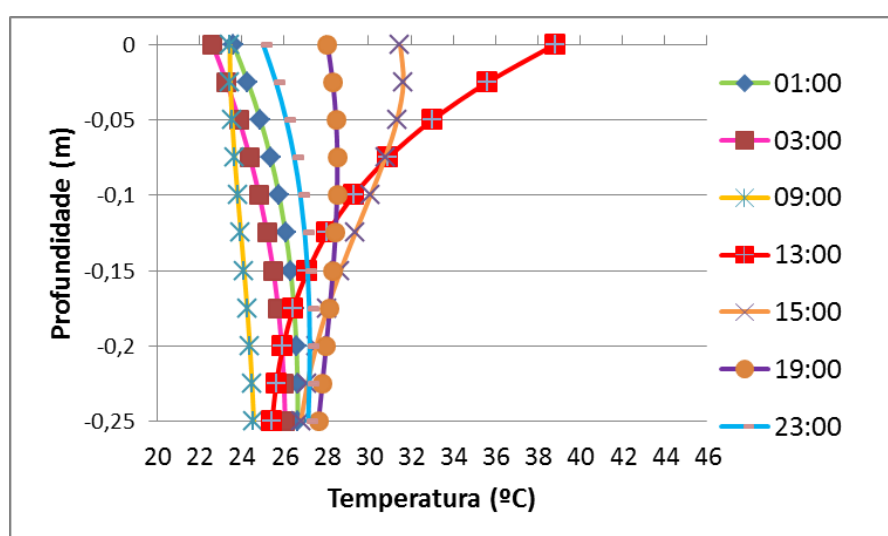
Portanto, ao passo que a temperatura ambiente e a radiação solar têm grande influência na temperatura da superfície do pavimento, a condutividade térmica desempenha papel fundamental no diferencial térmico da placa. Quanto maior a condutividade térmica, menor será o diferencial térmico, resultado que condiz com a tese de Calmon (1995).

Nota-se nas figuras 4-1, 4-2 e 4-3 e na tabela 4-1, que os resultados apresentam grande variação entre as regiões do país e entre as estações climáticas. Esse trabalho teve o enfoque maior na comparação entre as regiões do país do que entre as estações climáticas, já que o dimensionamento do pavimento deverá considerar a situação mais desfavorável para estar compreendido na zona de segurança.

4.1.2. Não linearidade dos diferenciais térmicos

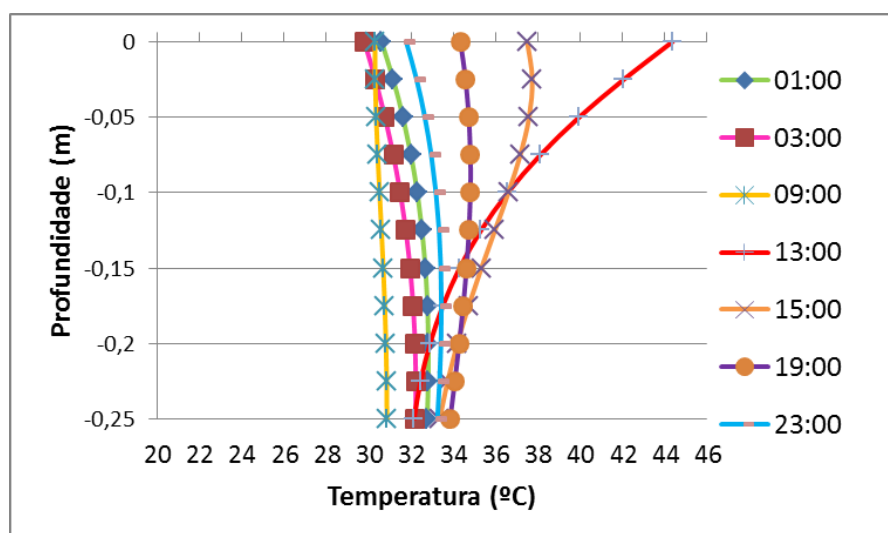
A rotina do ANSYS® gerou um arquivo de resultados .txt, o qual contém as temperaturas de cada 8760 *time-steps* nas seguintes cotas: 0,00m, -,025m, -0,05m, -0,075m, -0,10m, -0,125m, -0,15m, -0,175m, -0,2m, -0,225m, -0,25m. Então, foram plotados os gráficos das temperaturas encontradas em cada cota em vários horários do dia para a análise do comportamento da temperatura no pavimento ao longo da profundidade. As figuras 4-4, 4-5, 4-6, 4-7 e 4-8 ilustram os resultados encontrados para as cinco capitais estudadas.

Figura 4-4 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Brasília



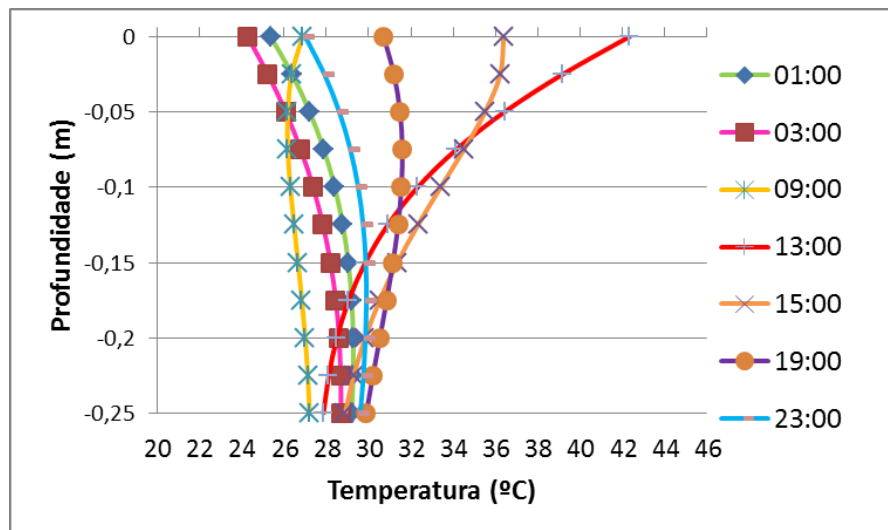
Fonte: Autor

Figura 4-5 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Manaus



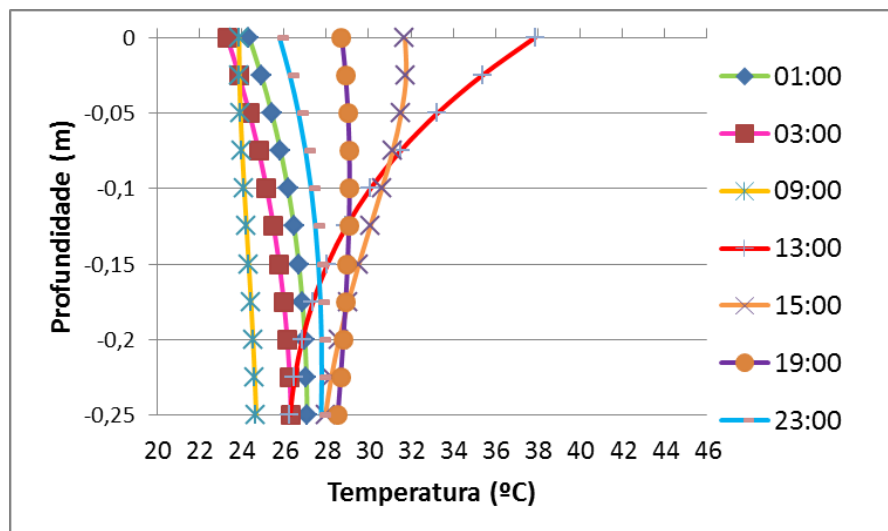
Fonte: Autor

Figura 4-6 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Porto Alegre



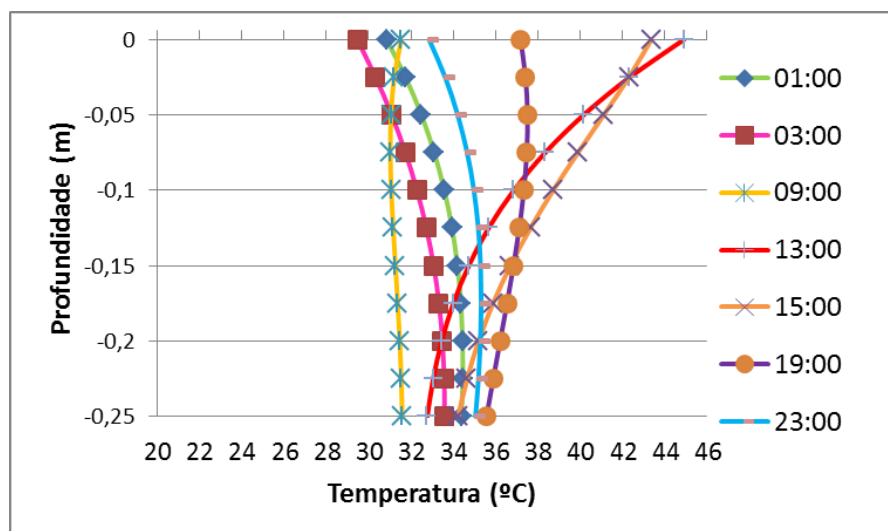
Fonte: Autor

Figura 4-7 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – São Paulo



Fonte: Autor

Figura 4-8 - Distribuição das temperaturas ao longo da profundidade da placa – Teresina



Fonte: Autor

Para todas as cidades estudadas, foi possível visualizar através dos gráficos que a distribuição de temperatura ao longo do pavimento tem comportamento não linear. Para as horas de maior incidência de radiação solar, entre 12:00h e 15:00h, a não linearidade aumenta do topo até, aproximadamente, metade da placa de concreto. Isso acontece como consequência da baixa condutividade térmica do concreto comparado a outros materiais. A temperatura do topo, nos horários de maior temperatura e incidência de radiação, sofre aumento considerável, porém, para as profundidades maiores que 0,15m, o aumento de temperatura é menos acentuado. Por exemplo, em Porto Alegre o topo do pavimento sofre variações de temperatura ao longo do dia superiores a 18°C, enquanto que no fundo do pavimento essa variação é de cerca de 2,7°C.

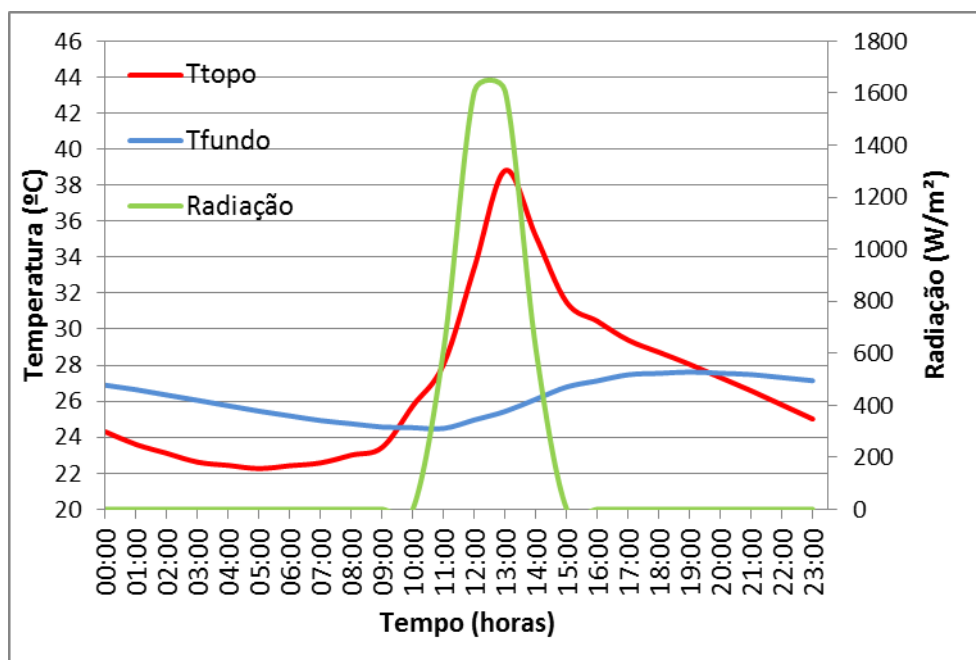
Na pesquisa de Severi (2002) e Tsubokawa et al. (2011), a não linearidade da distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento também foi observada. Além disso, Severi (2002) também constatou para a cidade de São Paulo, através de medições em campo, que a não linearidade é mais acentuada na parte superior da placa nos horários mais quentes do dia.

4.1.3. Temperaturas no topo e no fundo do pavimento ao longo do dia

A radiação tem grande influência no aumento de temperatura do pavimento. De forma a visualizar essa influência ao longo do dia, foram plotados os gráficos contendo a temperatura do topo e a temperatura do fundo do pavimento no eixo principal e a radiação incidente dos dias de maior gradiente térmico para as cinco regiões.

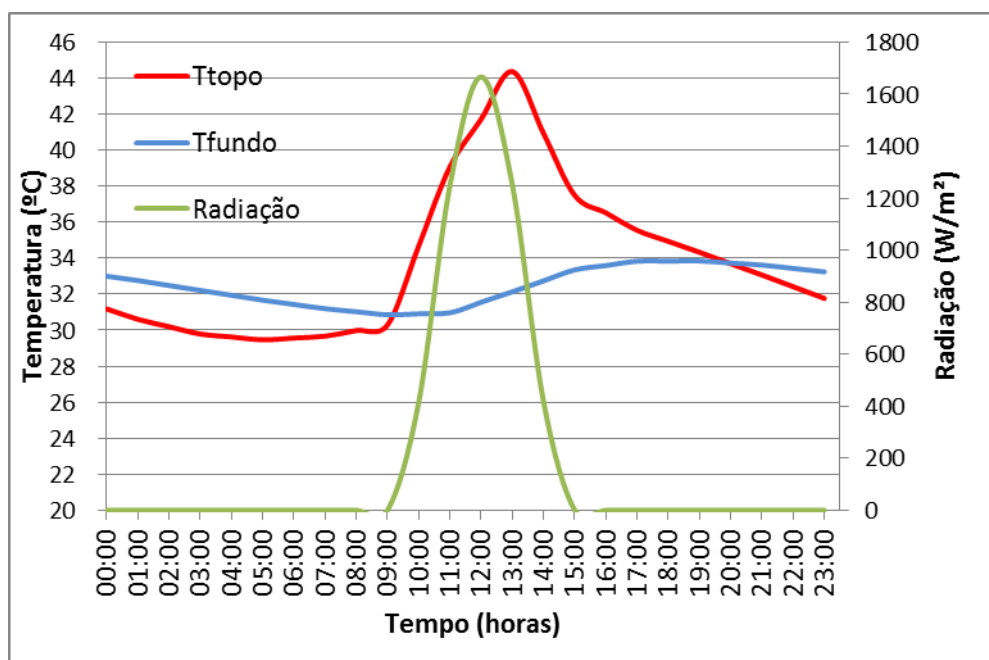
As figuras 4-9 a 4-13 ilustram a variação diária de temperatura na superfície e no fundo do pavimento e a variação diária de radiação implementada na análise para os meses de maior diferencial térmico. O gradiente de temperatura do pavimento permanece negativo durante a madrugada e as primeiras horas da manhã, após esse horário, o gradiente alterna de negativo para positivo e permanece positivo até o início da noite, quando novamente se inverte de positivo para 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. Durante o dia, a superfície do pavimento é aquecida pela radiação solar, porém, devido ao baixo coeficiente de condutividade do concreto, a temperatura do fundo do pavimento demanda maior tempo para aumentar, dessa forma, tem-se no período diurno um diferencial térmico positivo. De maneira oposta, durante o período noturno, não há incidência de radiação solar, então a temperatura na superfície do pavimento irá diminuir, porém, a temperatura no fundo do pavimento demanda mais tempo para o resfriamento, assim, tem-se o diferencial térmico negativo.

Figura 4-9 - Brasília: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro



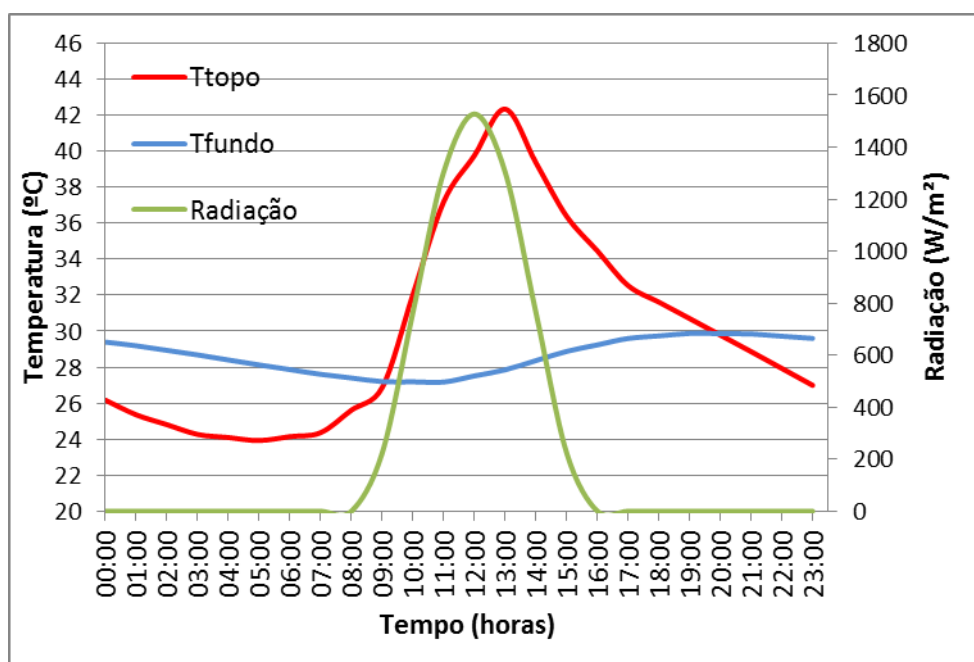
Fonte: Autor

Figura 4-10 - Manaus: Comportamento das temperaturas e radiação em outubro



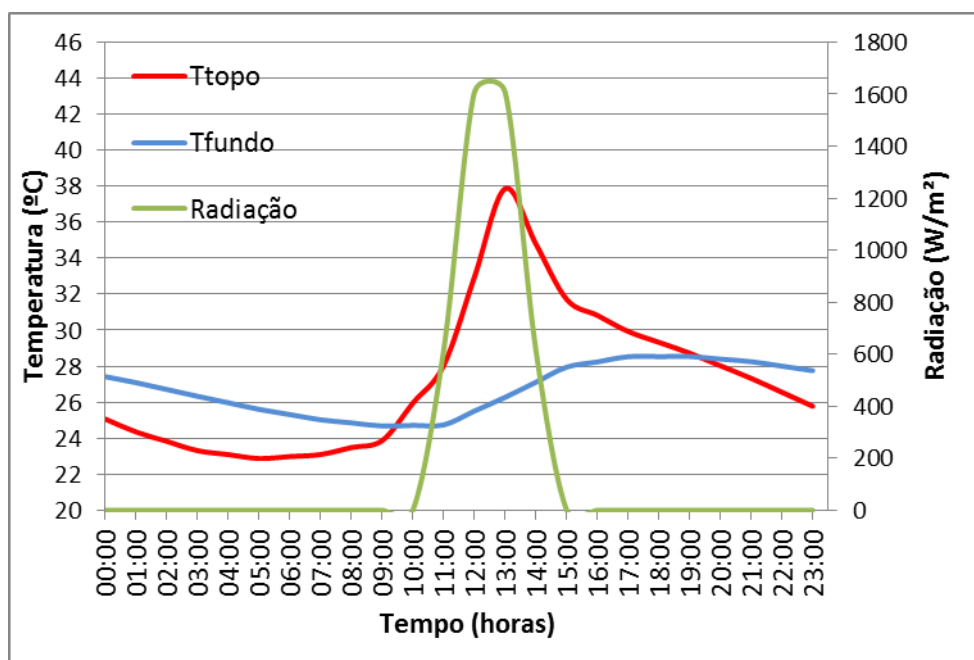
Fonte: Autor

Figura 4-11 – Porto Alegre: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro



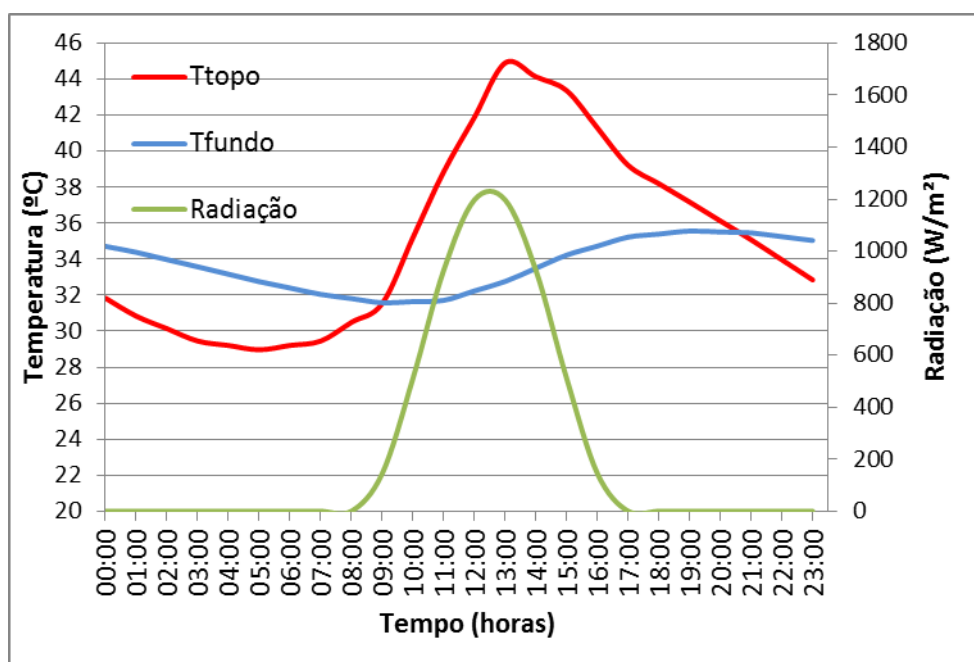
Fonte: Autor

Figura 4-12 – São Paulo: Comportamento das temperaturas e radiação em dezembro



Fonte: Autor

Figura 4-13 - Teresina: Comportamento das temperaturas e radiação em outubro



Fonte: Autor

Nota-se um comportamento semelhante nas cinco regiões brasileiras quanto à variação da temperatura na placa de concreto. Durante o período de 24 horas, ocorrem duas inversões de temperatura entre o topo e o fundo do pavimento. A primeira ocorre às 9:00h em todas as cidades estudadas quando o diferencial térmico se inverte para positivo devido ao aquecimento da superfície do pavimento. Esse fato é devido ao aumento da temperatura ambiente e a radiação solar incidente. A outra inversão acontece entre às 19:00h e 20:00h, onde o gradiente térmico volta a ser negativo já que não há incidência de radiação solar e a temperatura ambiente é menor no período noturno.

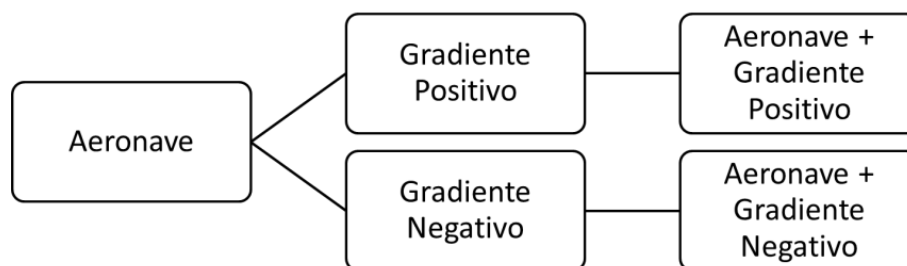
Nas figuras 4-9 a 4-13, também é possível observar que a maior temperatura na superfície do pavimento ocorre logo após a incidência do pico de radiação solar diária, o que mostra a influência desse parâmetro térmico no pavimento.

4.2. Comportamento tensional das placas nas cinco regiões brasileiras

A análise termomecânica tem como objetivo avaliar as máximas tensões no pavimento devido ao carregamento ambiental e ao tráfego de aeronaves. O carregamento devido às ações ambientais é implementado no EverFe através do gradiente térmico que, por sua vez, é positivo no período diurno e negativo no

período noturno. Nessa pesquisa, 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 4-14 contém o fluxograma dos carregamentos considerados nas análises.

Figura 4-14 - Fluxograma dos carregamentos considerados nas análises termo tensionais



Fonte: Autor

4.2.1. Carregamento devido somente ao peso próprio

A título de comparação, foi realizada uma análise em que o carregamento é devido somente com o peso próprio da aeronave e do pavimento. O diferencial térmico não foi considerado. Nas figuras 4-15 e 4-16, têm-se os resultados das tensões máximas para o topo e o fundo do pavimento, sendo as tensões de tração positivas e as de compressão negativas. Para o topo do pavimento, foi encontrada a tensão máxima de tração de 0,40MPa e para o fundo do pavimento de 3,58MPa.

Figura 4-15 – Somente peso próprio do pavimento e da aeronave - Tensões máximas no topo

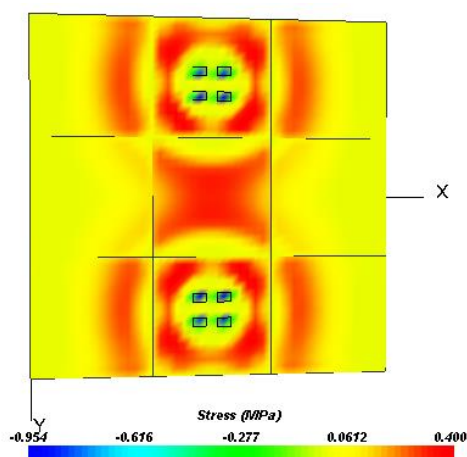
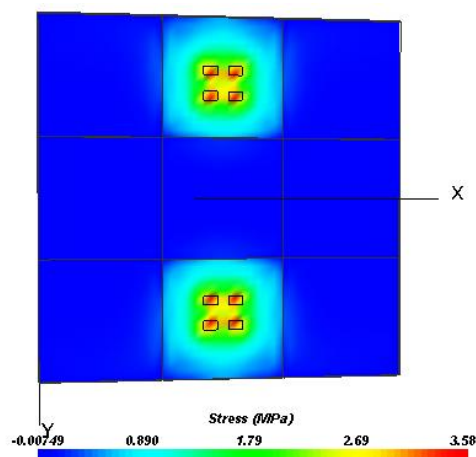


Figura 4-16 - Somente peso próprio do pavimento e da aeronave - Tensões máximas no fundo



Fonte: Autor

4.2.2. Carregamento devido ao peso próprio e ao diferencial térmico positivo

Com o objetivo de comparar as tensões máximas no pavimento nas regiões norte, nordeste, sul, sudeste e centro oeste foram feitas as análises no EverFe (2003) considerando o diferencial térmico máximo (Tabela 4-1) e as propriedades termomecânicas (Tabela 3-3) de cada cidade. Foram consideradas as placas com 25cm de espessura, 5,50m de comprimento e 5,50m de largura. Na tabela 4-2, são apresentados os valores encontrados na análise tensional.

Tabela 4-2 - Resumo das tensões e deslocamentos encontrados

Cidade	Máxima Tensão de Tração no Topo (MPa)	Máxima Tensão de Tração no Fundo (MPa)	Máximo Deslocamento (mm) (Dzz)
Somente Peso Próprio	0,40	3,58	-2,24
Brasília	1,12	5,63	-2,01
Manaus	1,36	6,25	-1,91
Porto Alegre	1,60	6,60	-1,87
São Paulo	1,37	6,08	-1,95
Teresina	1,12	5,78	-1,98

Fonte: Autor

Como os maiores diferenciais térmicos são positivos, a região tracionada se localiza no fundo do pavimento e, por isso, é que nessa região estão as máximas tensões de tração.

As maiores tensões estão localizadas nos eixos das rodas da aeronave, onde se encontra a combinação de carregamento mais crítica. A maior tensão de tração encontrada foi de 6,60MPa em Porto Alegre, quando considerou-se a combinação do carregamento térmico com o mecânico e, a menor em Brasília, 5,63MPa. Em comparação com a análise do item 4.2.1, quando o carregamento térmico não foi considerado, a máxima tensão de tração no fundo do pavimento passou de 3,58MPa para 6,60MPa (Porto Alegre), ou seja, um aumento de 84%.

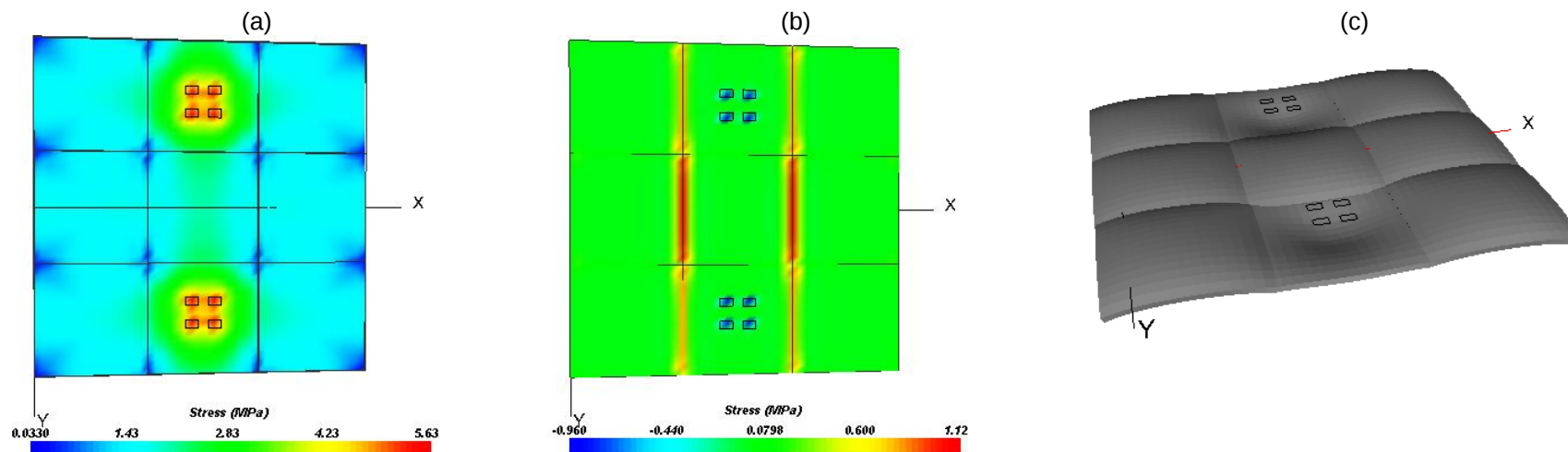
Também foram analisadas as tensões no topo do pavimento para o gradiente térmico positivo. Foi comprovado, então, a teoria do empenamento das placas, já que foram encontradas tensões de tração de magnitude muito inferior no topo do pavimento do que no fundo. A maior tensão de tração no topo foi em Porto Alegre com 1,60MPa e a menor em Teresina e Brasília, 1,12MPa.

Quanto aos deslocamentos, foi observado que na localidade das rodas da aeronave o deslocamento é positivo e nas placas que não possuem o carregamento da aeronave o deslocamento é negativo no centro da placa. O maior deslocamento positivo no eixo z foi observado em Brasília, com 2,01mm e o menor em Porto Alegre com 1,87mm. É interessante notar que com o diferencial térmico positivo, a curvatura do empenamento é para baixo, ou seja, o centro da placa se desloca para cima, por isso, o deslocamento máximo observado, com apenas o peso próprio considerado, foi maior do que quando incluiu-se a carga térmica, já que o deslocamento devido ao gradiente térmico positivo atua no sentido contrário do deslocamento devido ao peso próprio.

Nas figuras 4-17 a 4-21 estão apresentados os diagramas de cores com as máximas tensões no fundo do pavimento, no topo e a deformação, respectivamente, nos cinco municípios estudados.

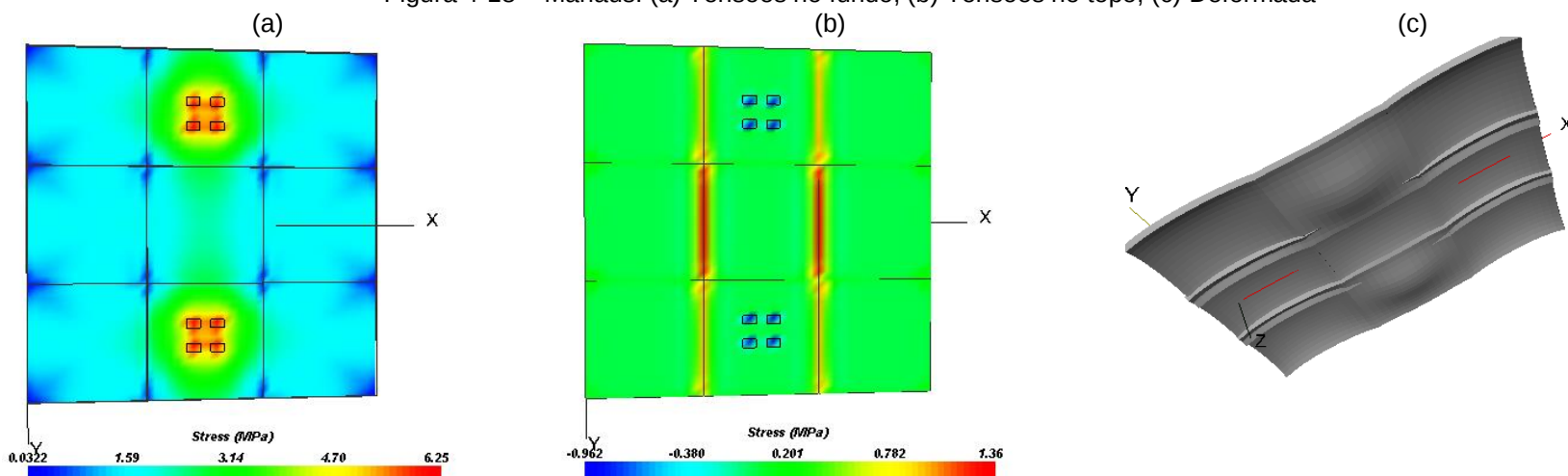
Pela deformada, pode-se aferir a curvatura para baixo devido ao gradiente positivo uma vez que o topo do pavimento está mais aquecido do que no fundo, ou seja, há uma dilatação do topo e uma contração do fundo, entretanto, também pode-se verificar que as maiores tensões de tração estão no fundo do pavimento devido a restrição do movimento de empenamento das placas de concreto.

Figura 4-17 – Brasília: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



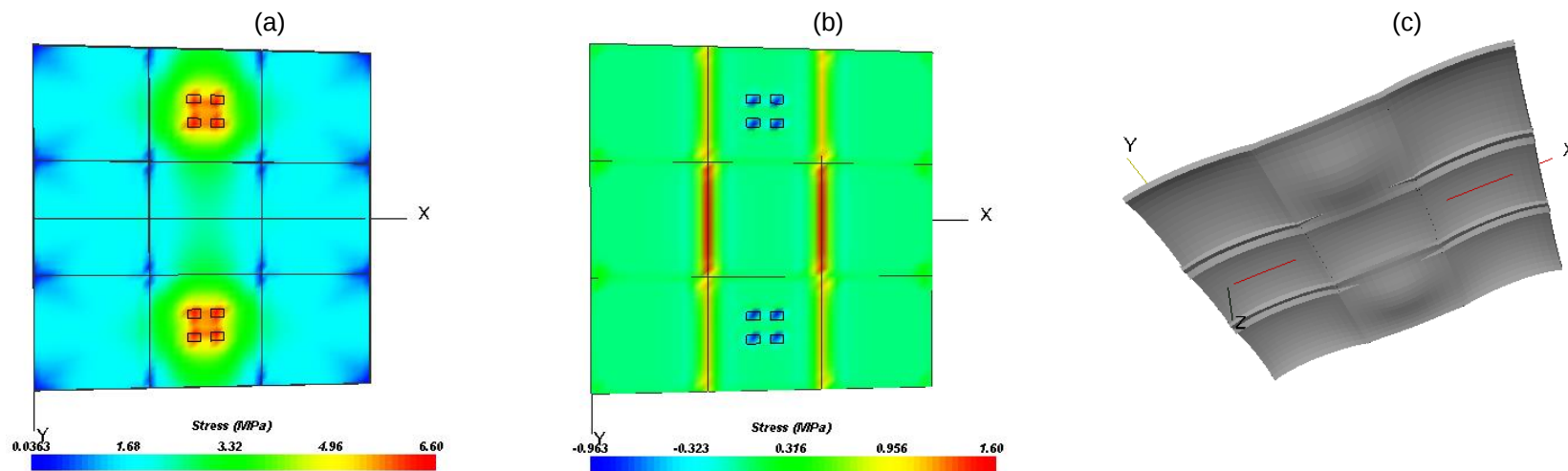
Fonte: Autor

Figura 4-18 – Manaus: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



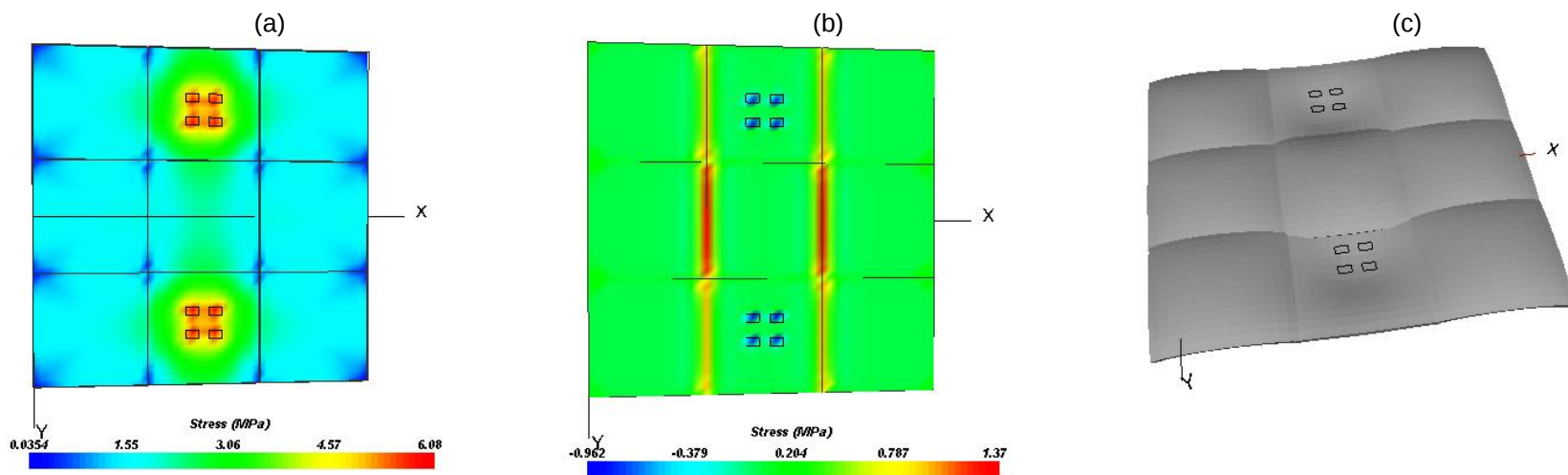
Fonte: Autor

Figura 4-19 – Porto Alegre: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



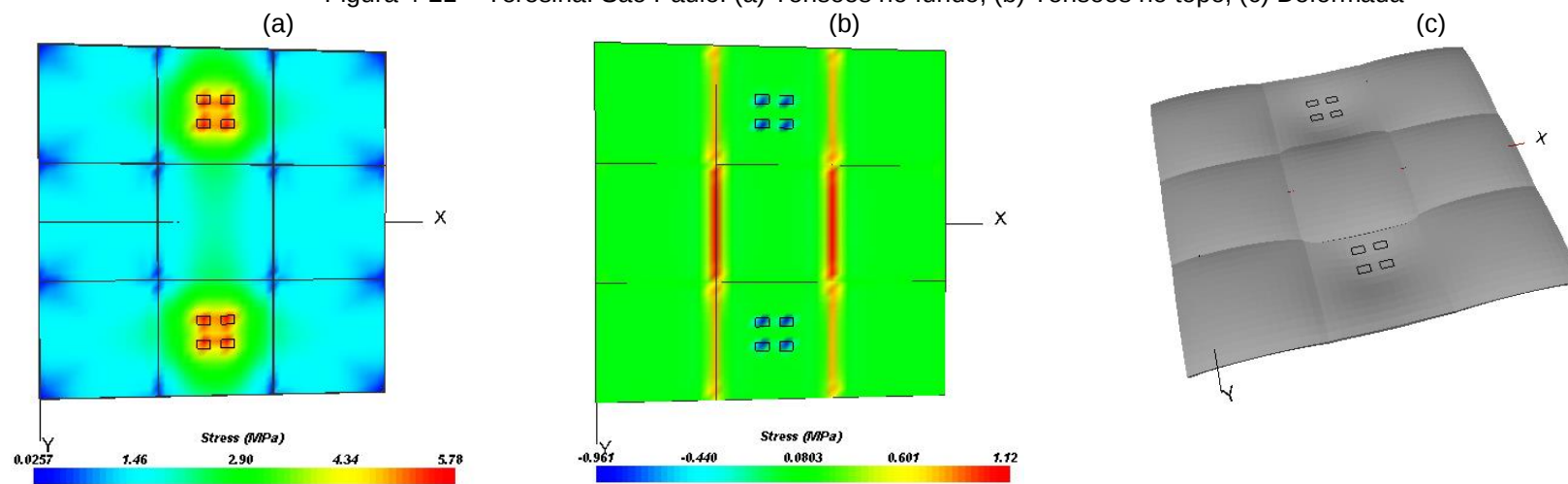
Fonte: Autor

Figura 4-20 – São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



Fonte: Autor

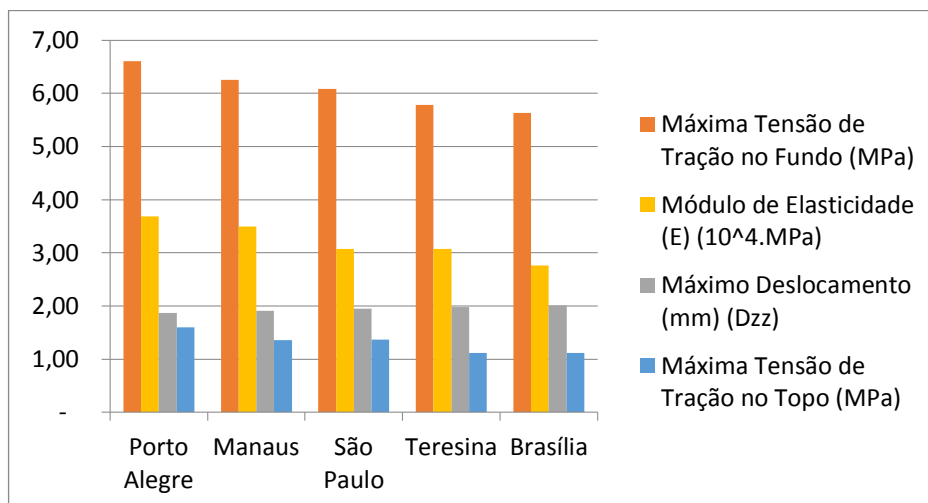
Figura 4-21 – Teresina: São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



Fonte: Autor

Outra conclusão possível para as análises tensionais é a relação entre as tensões encontradas com o módulo de elasticidade. Pelo gráfico apresentado na figura 4-22, nota-se que quanto maior o módulo de elasticidade, maior as tensões encontradas, tanto no fundo quanto no topo do pavimento, contudo, o deslocamento máximo decresce na medida em que o módulo de elasticidade aumenta.

Figura 4-22 - Comparação das tensões e deslocamentos encontrados com o módulo de elasticidade



Fonte: Autor

4.2.3. Carregamento devido ao peso próprio e ao diferencial térmico negativo

Os diferenciais térmicos negativos são de magnitude inferior comparados ao diferencial térmico positivo. Dentre as cidades estudadas, Porto Alegre apresentou o maior diferencial negativo com o valor de 4,67°C. Sendo as tensões de origem térmica proporcionais aos diferenciais térmicos. As análises tensionais também resultaram em tensões menores. A tabela 4-3 apresenta os valores das tensões encontradas e dos diferenciais térmicos negativos considerados.

Tabela 4-3 - Tensões no topo e no fundo devido aos diferenciais térmicos negativos

Cidade	Máxima Tensão de Tração no Topo (MPa)	Máxima Tensão de Tração no Fundo (MPa)	Diferencial térmico negativo
Porto Alegre	1,09	3,25	4,67
Teresina	1,01	3,01	4,51
Brasília	0,92	2,92	4,37
São Paulo	0,91	3,12	3,11
Manaus	0,84	3,46	2,60

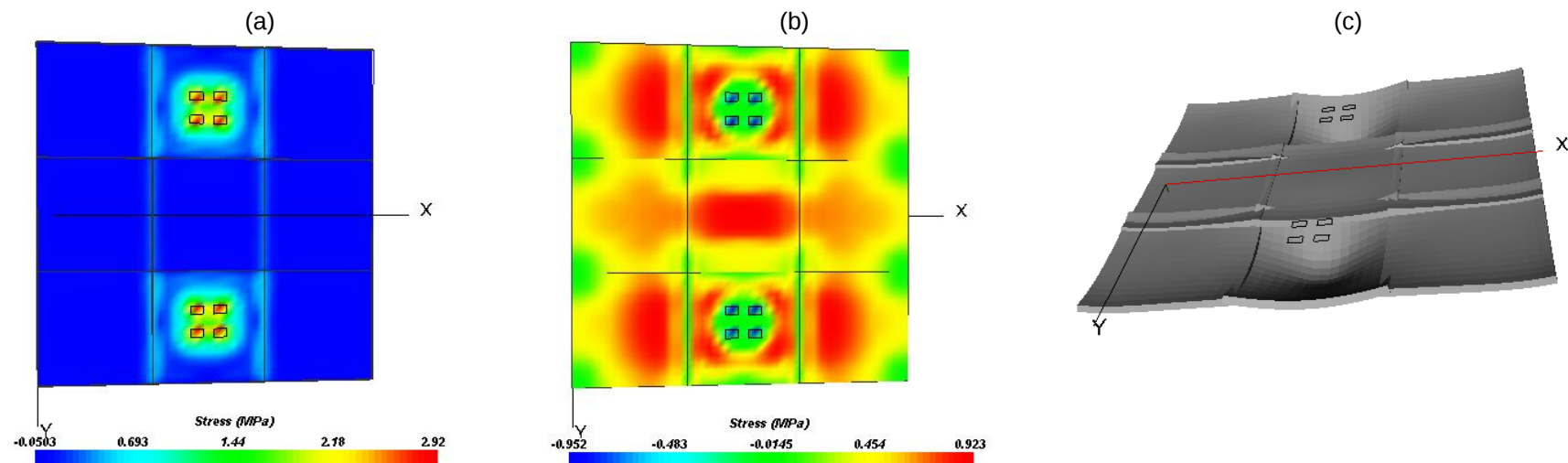
Fonte: Autor

Observa-se na tabela 4-3, que quanto maior o diferencial térmico negativo, maior a tensão máxima de tração no topo do pavimento, porém, não há grande variação das tensões encontradas.

As tensões máximas de tração encontradas no fundo do pavimento estão localizadas na região do contato das rodas da aeronave com o pavimento, ou seja, as tensões mecânicas estão predominando nesse caso e não as tensões térmicas, como podem ser observadas nas figuras 4-23 a 4-27. Vale ressaltar, que para as placas que não possuem carregamento mecânico, por exemplo, a placa da linha 2 e coluna 1 (placa 2x1), o fundo do pavimento se encontra comprimido, como esperado para os gradientes térmicos negativos.

Quando comparadas as tensões do fundo do pavimento para gradientes positivos e negativos, observa-se uma grande discrepância. Por exemplo, em Porto Alegre a tensão máxima no fundo do pavimento para o gradiente positivo foi de 6,60MPa e para o gradiente negativo de 3,25MPa. A explicação para esse comportamento é a orientação da curvatura do empenamento da placa. Para o gradiente positivo a curvatura é para baixo e devido às restrições do movimento as tensões térmicas de tração se encontram no fundo do pavimento. Essas tensões são somadas ao peso próprio da aeronave que também produz tensões de tração no fundo do pavimento, resultando em tensões de grande magnitude. Do contrário, para os gradientes negativos, a curvatura do empenamento é para cima, as tensões máximas de tração no topo e no fundo do pavimento é comprimido. Dessa forma, para o gradiente negativo, as tensões térmicas e mecânicas trabalham de maneira oposta, sendo que as tensões térmicas de compressão, diminuem a magnitude da tensão de tração devido o peso próprio da aeronave, resultando em tensões de tração de menor magnitude, quando comparadas a situação do gradiente térmico positivo.

Figura 4-23 – Brasília: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



Fonte: Autor

Figura 4-24 – Manaus: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada

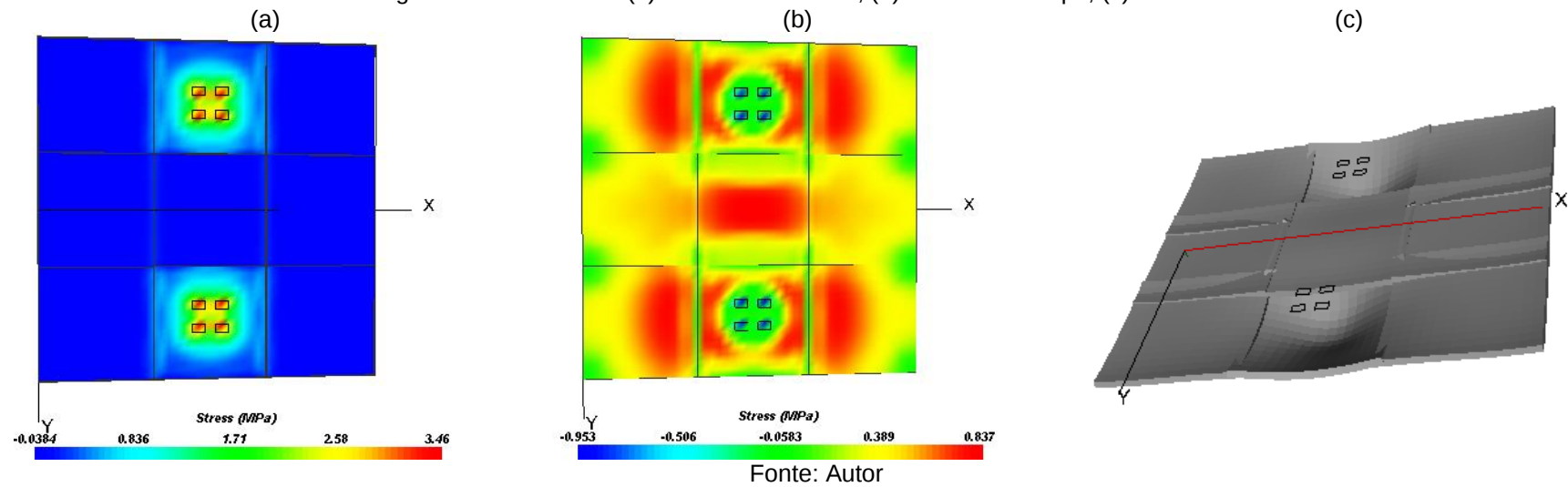
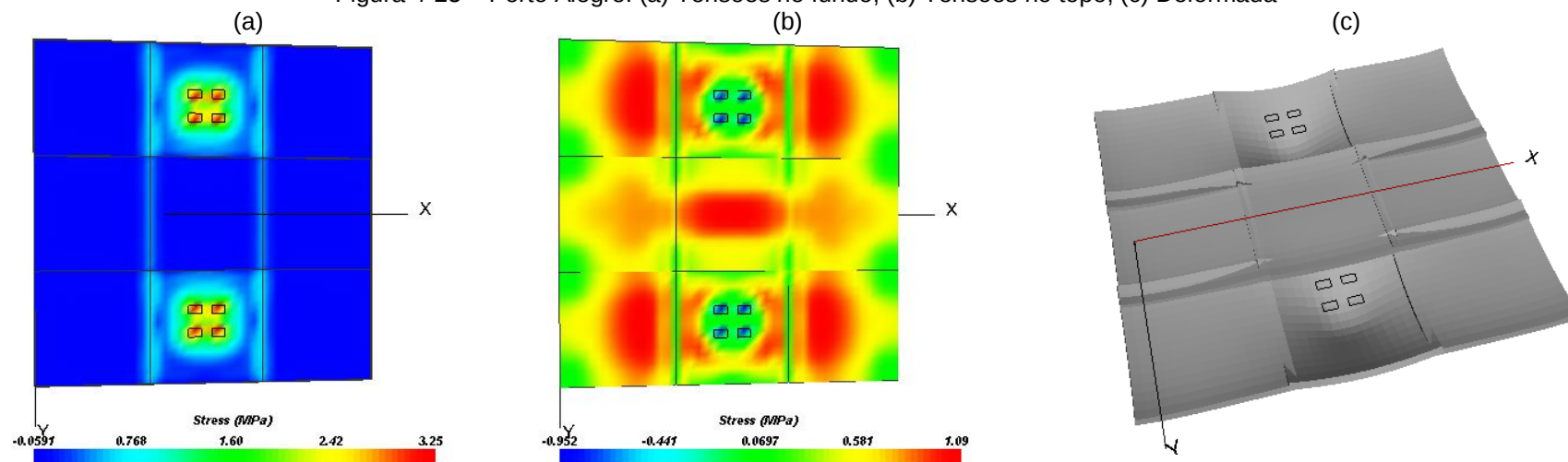
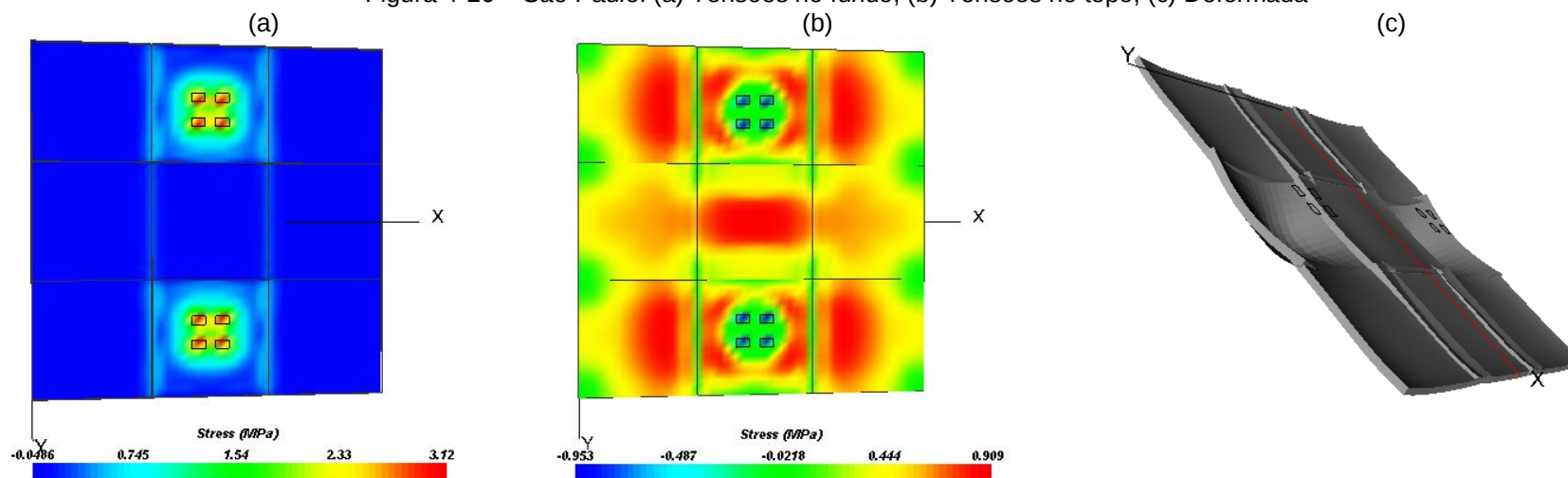


Figura 4-25 – Porto Alegre: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



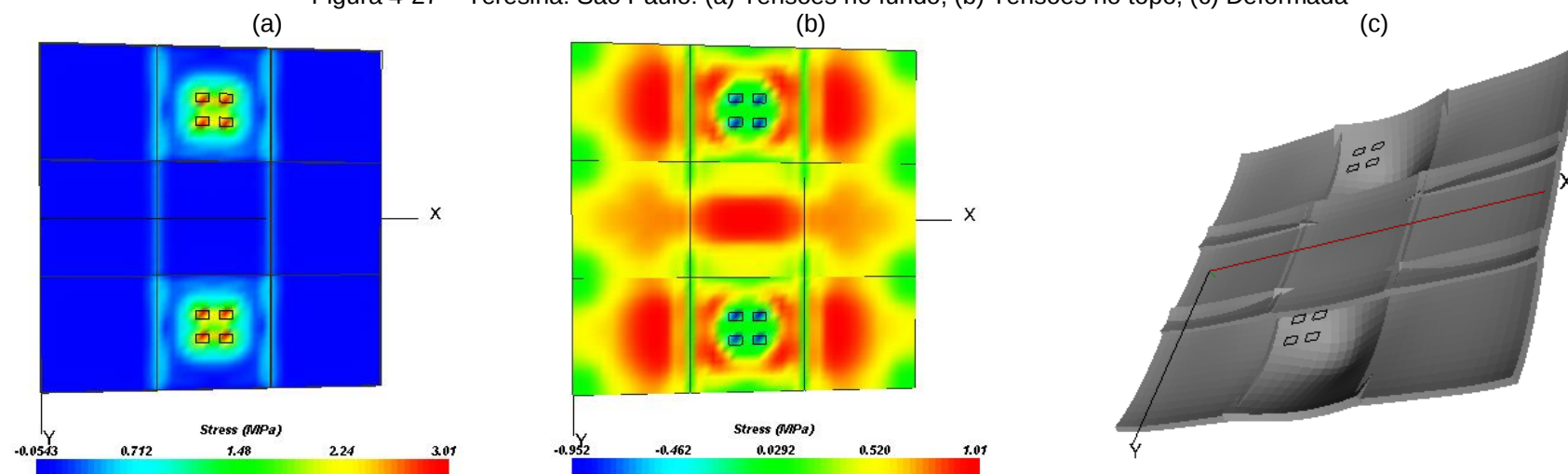
Fonte: Autor

Figura 4-26 – São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



Fonte: Autor

Figura 4-27 – Teresina: São Paulo: (a) Tensões no fundo; (b) Tensões no topo; (c) Deformada



Fonte: Autor

CAPÍTULO 5

ANÁLISES PARAMÉTRICAS

5. ANÁLISES PARAMÉTRICAS

5.1. Influência da temperatura ambiente e da radiação solar no diferencial térmico

Para a verificação da influência da temperatura ambiente e da radiação solar na diferença de temperatura entre o topo e o fundo do pavimento, foram realizadas as análises térmicas nas cinco regiões do Brasil considerando os parâmetros térmicos e geométricos descritos na tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Parâmetros utilizados nas análises

Descrição	Valor
Espessura da placa	25 cm
Densidade	2400 kg/m ³
Calor específico	1000 J/kg.°C
Condutividade Térmica	2,5 W/m.°C

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos para placas com 25cm de espessura e propriedades conforme descrito na tabela 5-1, foi realizada uma regressão múltipla considerando como variável dependente o diferencial térmico máximo positivo e como variáveis independentes, a temperatura máxima e o ΔT máximo calculado a partir da fórmula 3-6. Como resultado, foi obtida a equação 5-1, a qual obteve $R^2=0,99$ e o p -value igual a 0,01779 para a temperatura máxima e 0,00412 para ΔT . Portanto, as variáveis independentes possuem evidência moderada a muito forte em relação a variável dependente, o diferencial térmico positivo.

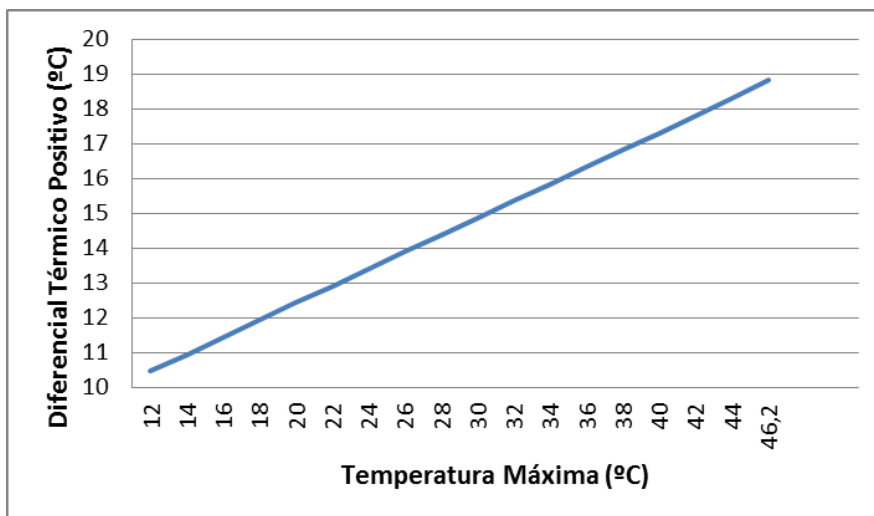
$$DT^+ = -0,25414 + 0,46294.\Delta T + 0,24451.TempMáx \quad (5-1)$$

Os parâmetros temperatura máxima e ΔT foram escolhidos por serem disponibilizados em bases de dados conhecidas como o INMET e o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000). A temperatura máxima é obtida por cidade e por mês e o ΔT é facilmente calculado a partir da radiação solar global diária e do número de horas de insolação, como mostrado anteriormente.

A figura 5-1 abaixo ilustra a variação do diferencial térmico em função da variação da temperatura máxima, mantendo o ΔT constante. O resultado obtido foi que as duas variáveis são diretamente proporcionais e que variando a temperatura máxima

diária em 285% (12°C a 46,2°), o diferencial térmico variou 79,96% (10,45°C a 18,82°C).

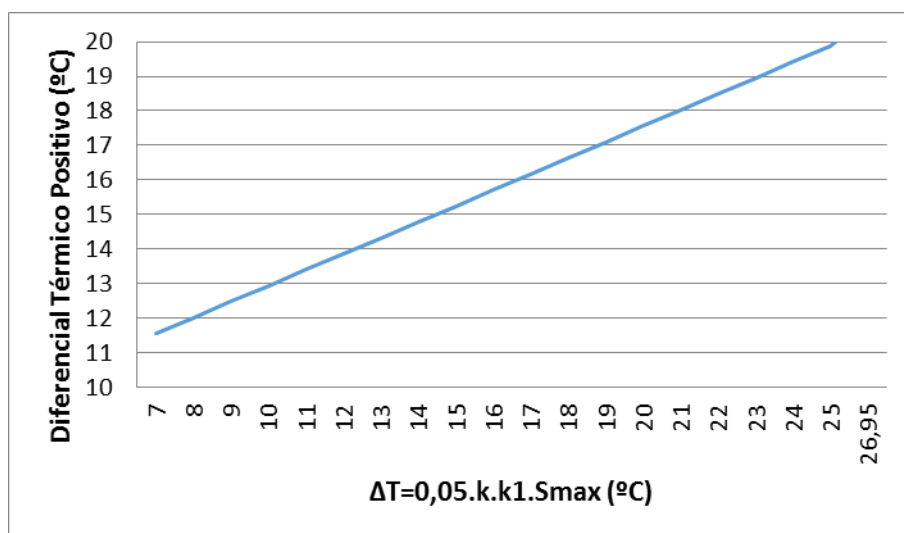
Figura 5-1 - Variação do diferencial térmico com a variação da temperatura máxima



Fonte: Autor

Já a figura 5-2 exibe a variação do diferencial térmico positivo com a variação do ΔT , mantendo a temperatura máxima diária constante. Como resultado, foi obtido que as duas variáveis são diretamente proporcionais e que a variação do ΔT em 285% (7°C a 26,95°C) representa um acréscimo no diferencial térmico de 80,003% (11,54°C a 20,78°C).

Figura 5-2 - Variação do diferencial térmico positivo com a variação do ΔT



Fonte: Autor

É importante esclarecer que o ΔT está diretamente relacionado à radiação solar global diária e ao número de horas de insolação. Sendo a radiação solar uma fonte de calor, quanto maior sua intensidade, maior será a quantidade de calor transferida ao pavimento. Nesse trabalho, como demonstrado anteriormente na equação 3-7, a radiação solar máxima incidente é diretamente proporcional à radiação global diária e inversamente proporcional ao número de horas de insolação. Quanto maior o número de horas de insolação, menor será a intensidade da radiação máxima, considerando o mesmo valor de radiação global diária, em face da maior distribuição da radiação global durante o dia. Vale enfatizar que para o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), o número de horas de insolação em um dia significa a quantidade de horas em que a superfície ficou submetida a uma radiação solar direta que supera um limiar de 120 W/m².

A intensidade de radiação máxima, revelada através do ΔT possui evidência muito forte em relação ao diferencial térmico positivo, enquanto a temperatura máxima possui evidência moderada. Dessa forma, a variável radiação solar deve ser levada em consideração no dimensionamento do pavimento não só porque está fortemente associada ao gradiente térmico, mas porque seu valor tem grande variação nas regiões brasileiras como demonstrado no item 3.3.2.

5.2. Variação dos parâmetros térmicos, mecânicos e geométricos considerando a cidade de Porto Alegre como referência

A cidade de Porto Alegre foi escolhida como referência nas análises paramétricas por ter apresentado as maiores tensões de tração em relação às outras cidades estudadas. Foram realizadas novas análises, variando um dos parâmetros para verificação de sua influência nas tensões e diferenciais térmicos. No total, foram doze análises em que os parâmetros serão variados de acordo com a tabela 5-2. Os valores de referência foram os utilizados para a cidade de Porto Alegre.

Tabela 5-2 - Variação dos parâmetros utilizados nas análises paramétricas

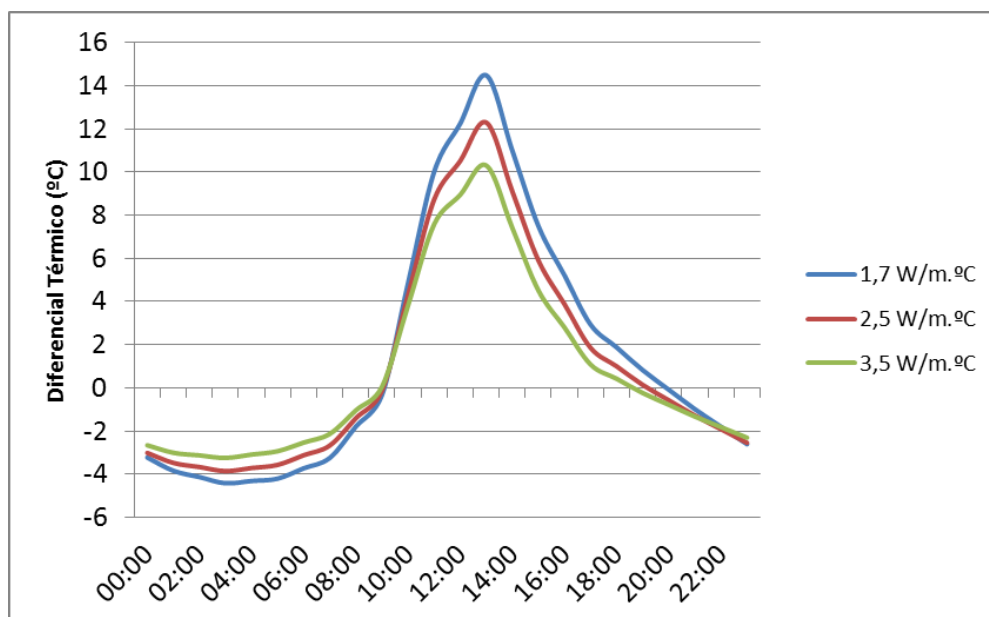
Parâmetro	Valor de referência	Valor 2	Valor 3
Condutividade Térmica (W/m.°C)	1,7	2,5	3,5
Módulo de Elasticidade (E) (MPa)	36806,96	30762,46	27605,22
Coeficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	9	10	12
Dimensão da placa (m)	5,5x5,5	4,5x4,5	7,5x7,5
Espessura da placa (cm)	25	15	35
Distribuição de temperatura na profundidade do pavimento	Linear	Bilinear	Trilinear

Fonte: Autor

5.2.1. Condutividade Térmica

O concreto é considerado um mau condutor térmico. De acordo com a tese de Calmon (1995), a condutividade térmica do concreto é dependente, principalmente, do agregado graúdo utilizado na mistura. Por exemplo, concretos que utilizam basalto como agregado graúdo possuem condutividade térmica baixa em torno de 1,7 W/m.°C, já concretos com granito, a condutividade pode chegar a 3,5 W/m.°C. Face a essa diversidade, foram escolhidos os seguintes valores de condutividade para comparação: 1,7 W/m.°C, 2,5 W/m.°C e 3,5 W/m.°C. Foram realizadas novas análises térmicas, alterando apenas o valor da condutividade. O gráfico da figura 5-3 ilustra as diferenças entre os diferenciais térmicos encontrados para as diferentes condutividades térmicas ao longo do dia 14/12, o qual apresentou o maior diferencial térmico.

Figura 5-3 - Diferenciais térmicos para diferentes condutividades térmicas



Fonte: Autor

Quanto maior a condutividade térmica, menor é o diferencial térmico encontrado na placa, já que o calor consegue ser transmitido para o fundo da placa em menor tempo. Na figura 5-3, pode-se observar que quando a condutividade térmica é de $1,7 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$, o diferencial térmico máximo foi de $14,48^{\circ}\text{C}$. Contudo, com a condutividade térmica de $3,5 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$, o diferencial térmico máximo decresceu para $10,31^{\circ}\text{C}$. Então, um acréscimo de 106% na condutividade térmica representa um decréscimo de 29% no diferencial térmico da placa. O mais importante para essa propriedade térmica é saber qual o agregado que será utilizado no concreto para que se possa estimar, através da bibliografia, um valor médio para a condutividade térmica.

Exemplificando, nessa pesquisa, foi considerado um concreto com basalto para Porto Alegre, se fosse considerado um concreto com granito com condutividade térmica de $3,5 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$, o gradiente final iria diminuir em 29%, o que consequentemente, acarretaria na diminuição das tensões no pavimento.

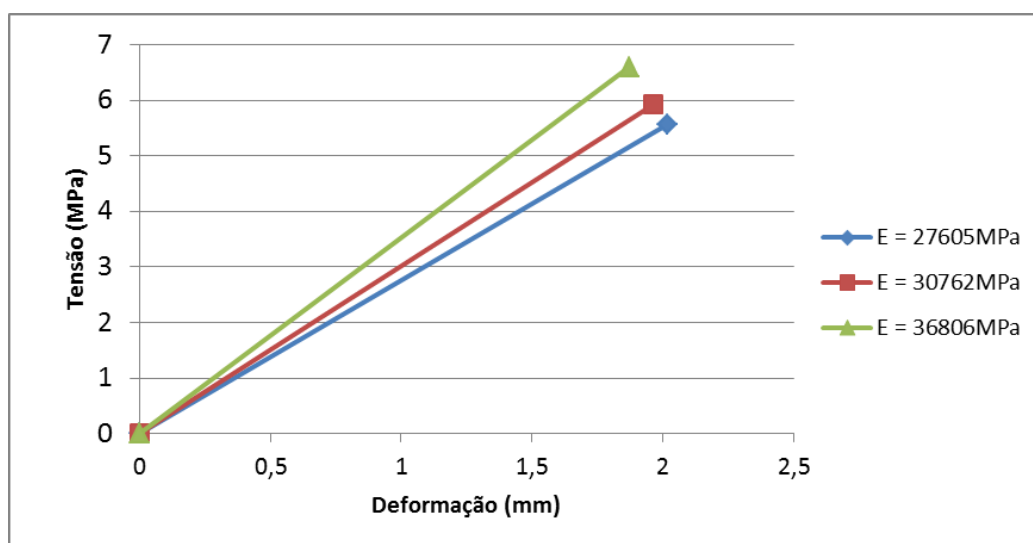
5.2.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi calculado a partir da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), no qual o coeficiente multiplicativo da equação depende do agregado graúdo utilizado no concreto. Mehta e Monteiro

(2006) também afirmam que o módulo de elasticidade depende do agregado graúdo utilizado e quanto mais denso for o agregado, maior será o módulo de elasticidade. Nessa pesquisa, para a cidade de Porto Alegre foi considerado o agregado basalto (pois é o mais utilizado na região), que é mais denso que o granito e o seixo rolado, por isso, Porto Alegre também obteve o maior módulo de elasticidade calculado de 36806MPa.

Foram calculados os módulos de elasticidade para cada agregado considerado e realizada a análise paramétrica para os valores da tabela 5-2. A figura 5-4 ilustra a relação entre tensão e deformação das análises.

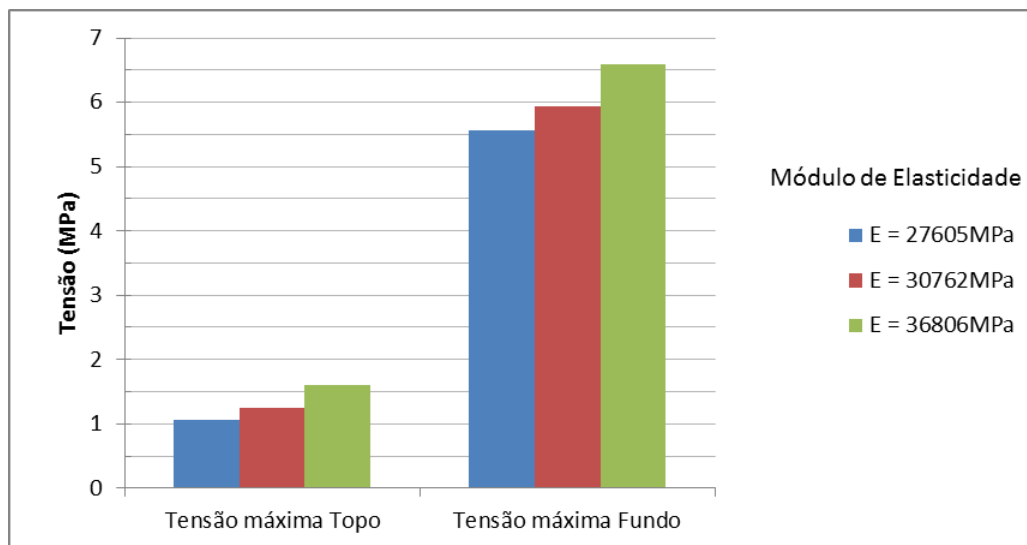
Figura 5-4 - Gráfico tensãoxdeformação da análise paramétrica com a variação do módulo de elasticidade – $E = 27605\text{MPa}$ (calcário), $E = 30762\text{MPa}$ (granito) e $E = 36806\text{MPa}$ (basalto)



Fonte: Autor

Observa-se na figura 5-4, que quanto maior o módulo de elasticidade, maior a tensão e menor a deformação do concreto. O resultado está condizente com a bibliografia. A figura 5-5 ilustra a variação das tensões no topo e no fundo do pavimento com a variação do módulo de elasticidade, confirmando o aumento das tensões proporcionalmente ao aumento do módulo de elasticidade.

Figura 5-5 - Máximas tensões no topo e no fundo do pavimento com a variação do módulo de elasticidade



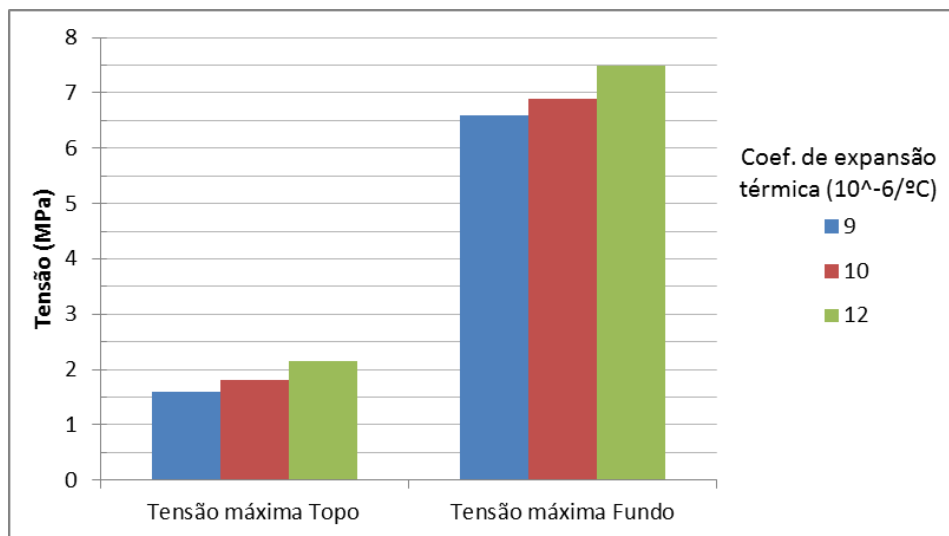
Fonte: Autor

Os resultados expõem que um acréscimo de 33% no módulo de elasticidade representou 18% na tensão máxima na placa, com isso, pode-se concluir que pequenas variações na estimativa do módulo de elasticidade irão acarretar em erros aceitáveis, porém, caso seja considerado um agregado diferente do projetado, a diferença nas tensões será expressiva, como ilustrado na figura 5-5. Portanto, o projetista deverá especificar o agregado a ser utilizado e também o fck desejado para que o módulo de elasticidade do concreto produzido seja o mais próximo possível do módulo considerado no cálculo das tensões.

5.2.3. Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é definido como a variação de uma unidade de comprimento pela variação de uma unidade de temperatura. Segundo Mehta e Monteiro (2006) e Calmon (1995), o coeficiente de expansão térmica do concreto está intimamente ligado ao tipo de agregado gráúdo utilizado. Então, a escolha do agregado é de fundamental importância para a definição do coeficiente de expansão térmica. A figura 5-6 ilustra a variação das tensões no pavimento de concreto com a variação do coeficiente de expansão térmica.

Figura 5-6 - Variação das tensões no topo e no fundo do pavimento com a variação do coeficiente de expansão térmica

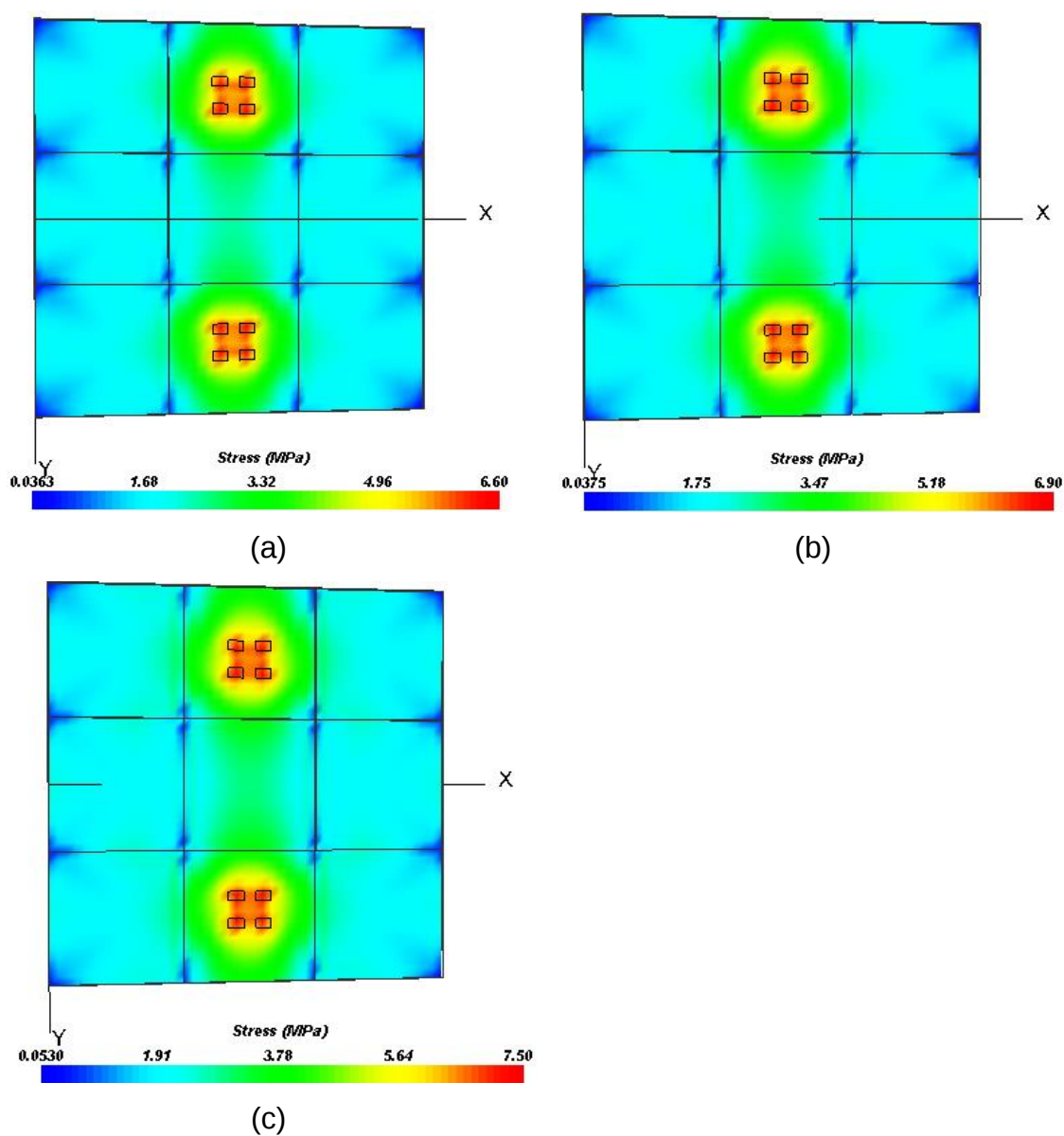


Fonte: Autor

Os resultados apontaram que um aumento de 33% no coeficiente de expansão térmica resultou em um aumento de 14% na tensão máxima no pavimento. Na prática, o mais importante é saber qual o agregado será utilizado no concreto para que o coeficiente de expansão térmica seja estimado através da bibliografia e, assim, esteja mais próximo da realidade.

A figura 5-7 ilustra a distribuição das tensões para os diferentes coeficientes de expansão térmica considerados. É importante notar a variação das tensões na placa da linha 2 e coluna 1 (placa 2x1), a qual praticamente não é afetada pelo carregamento da aeronave, ou seja, as tensões predominantes são de origem térmica. Para o coeficiente de $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a tensão máxima na placa 2x1 é de 2,09MPa e para o coeficiente de $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ é de 2,87MPa, ou seja, um aumento de 37%. Enquanto que para as tensões de origem mecânica essa propriedade não exerce tanta influência como demonstrado no parágrafo anterior, o contrário ocorre com tensões de origem térmica. Isso significa que quanto maior for o gradiente térmico da placa, maior será a influência dessa propriedade no valor das tensões de origem térmica. A seleção de agregados com baixos coeficientes poderá ser uma estratégia para diminuir o valor das tensões de origem térmica as quais representam uma parcela significativa das tensões totais.

Figura 5-7 - Distribuição das tensões para diferentes valores do coeficiente de expansão térmica – (a): $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; (b): $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; (c): $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;

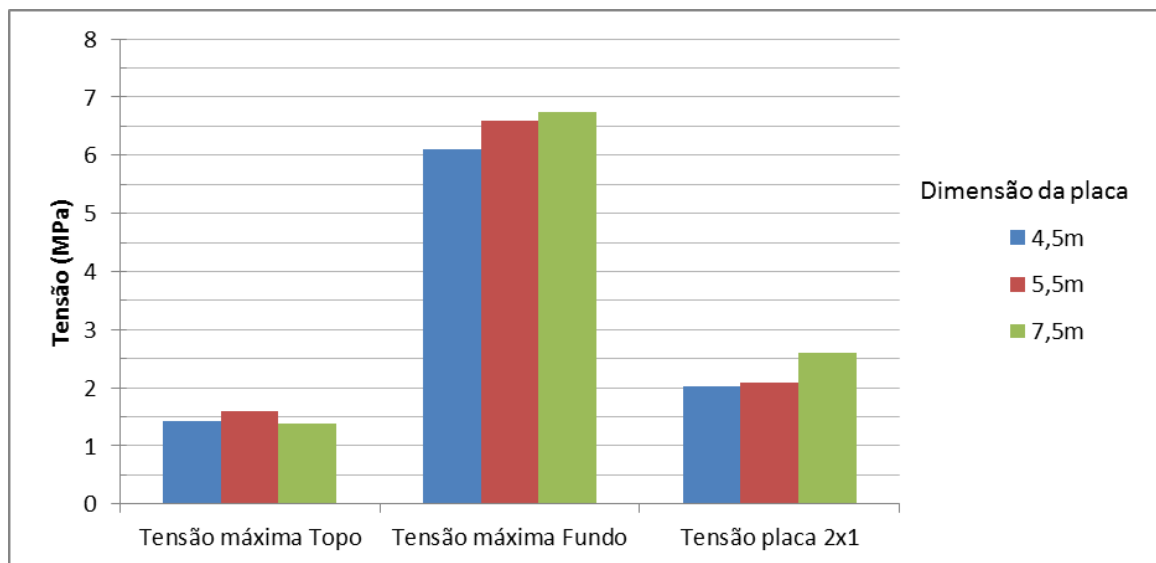


Fonte: Autor

5.2.4. Dimensão da placa

Mantendo todos os outros parâmetros, apenas a dimensão da placa foi variada para fins comparativos. A figura 5-8 ilustra a variação das tensões com a variação na dimensão da placa do pavimento de concreto.

Figura 5-8 - Variação das tensões no topo, no fundo e na placa 2x1 com a variação das dimensões da placa de concreto



Fonte: Autor

Uma variação de 3,00m na dimensão da placa (4,5m para 7,5m – 67%) aumentou em 10% as tensões totais (mecânicas + térmicas) e em 29% as tensões de origem térmica (placa 2x1).

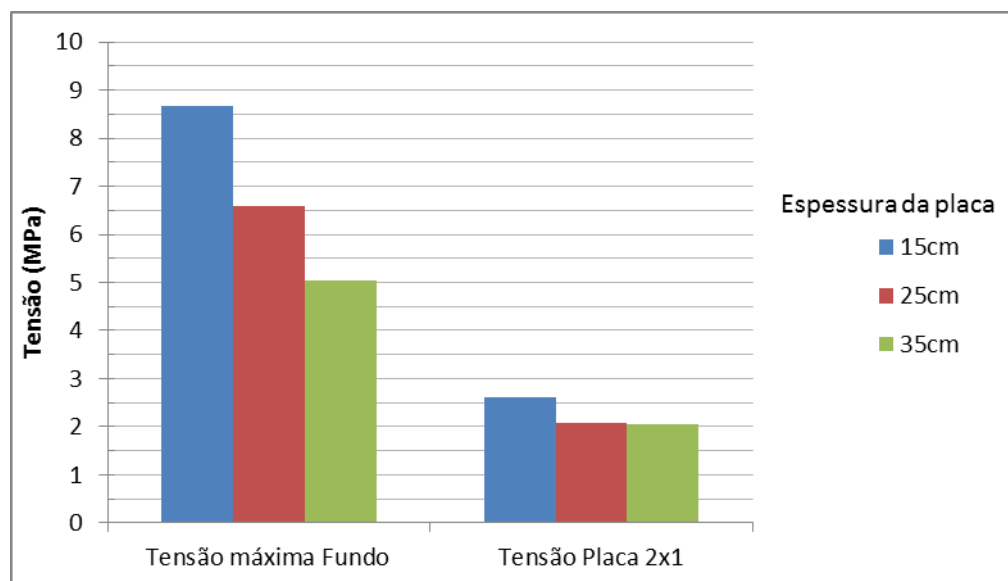
Essa análise demonstra que a magnitude do empenamento térmico é diretamente proporcional à dimensão das placas e que este parâmetro afeta, consideravelmente, o valor das tensões térmicas, diferentemente das tensões totais como demonstrado no parágrafo anterior.

5.2.5. Espessura da placa

Caso o concreto a ser utilizado já esteja definido, a variação dos parâmetros geométricos pode ser uma alternativa aos projetistas para redução dos gradientes e das tensões atuantes no pavimento.

A espessura da placa é um fator determinante na magnitude das tensões totais, como pode ser demonstrado na figura 5-9.

Figura 5-9 - Variação das tensões no topo, no fundo e na placa 2x1 com a variação das dimensões da placa de concreto



Fonte: Autor

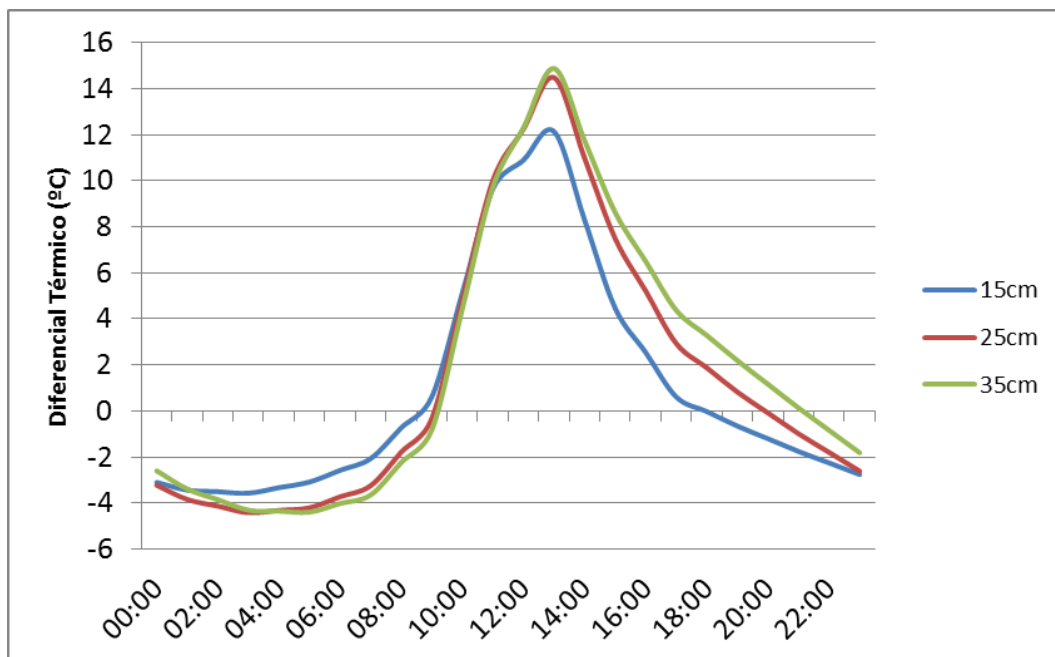
Um aumento de 133% na espessura da placa (15cm para 35cm) resultou em um decréscimo de 42% nas tensões totais e de 21% nas tensões térmicas (placa 2x1). A espessura influencia com mais intensidade as tensões de origem mecânica do que as de origem térmica. Além disso, o aumento na espessura da placa diminuiu consideravelmente as tensões totais impostas ao pavimento devido ao carregamento térmico combinado com o mecânico.

Apesar de ser uma alternativa para a diminuição das tensões, o aumento de espessura da placa deve ser a última alternativa para os projetistas já que implica no aumento do volume de concreto e, por consequência, no custo total da obra. É importante que o aumento de espessura só seja considerado caso findadas todas as possibilidades de mudança na especificação do concreto, como os agregados utilizados, relação a/c e etc, as quais influenciam nas propriedades térmicas e mecânicas e, como demonstradas nesse capítulo, nas tensões totais do pavimento.

Outro fator a ser considerado antes de se optar pelo aumento da espessura da placa é que com isso também se aumenta o gradiente térmico entre topo e fundo do pavimento. Uma análise paramétrica foi realizada variando a espessura da placa na

análise térmica nos valores de 15cm, 25cm e 35cm. A figura 5-10 ilustra a variação do diferencial térmico a partir da variação da espessura da placa.

Figura 5-10 - Variação do diferencial térmico ao longo do dia 14/12



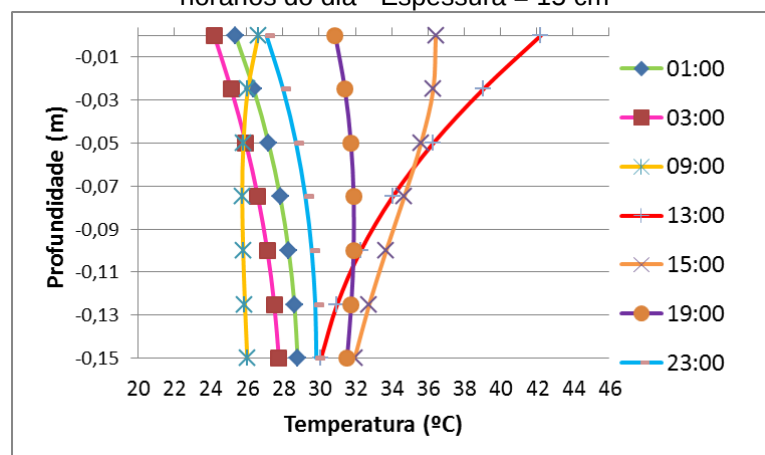
Fonte: Autor

Como pode ser observado na figura 5-10, há uma grande diferença entre os diferenciais térmicos considerando espessuras de placa diferentes. A espessura de 15 cm apresentou maior variação em relação às espessuras de 25 cm e 35 cm. O maior diferencial térmico para 15 cm foi de 12,13°C, para 25 cm de 14,48°C e para 35 cm de 14,88°C.

Portanto, considerando um dimensionamento inicial com uma placa de 25 cm de espessura, caso as tensões ultrapassem a resistência do material, o projetista poderá atingir um bom resultado com o aumento da espessura já que, como demonstrado anteriormente, o diferencial térmico não aumentou significativamente com o aumento da espessura da placa para 35cm.

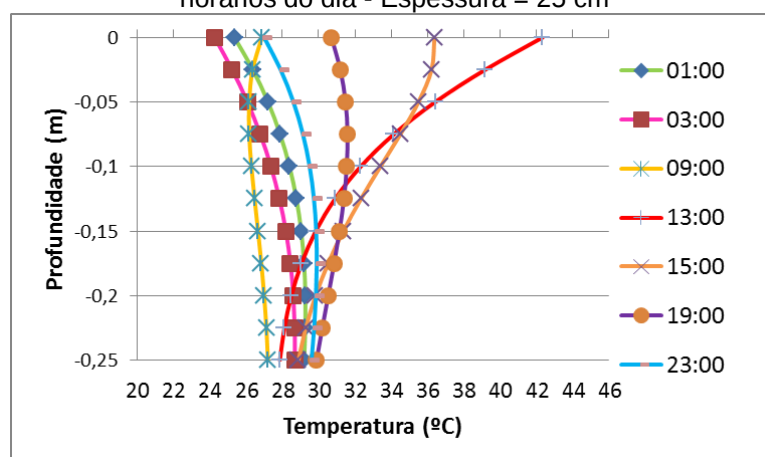
Com o aumento da espessura, a não linearidade da distribuição de temperaturas ao longo da profundidade do pavimento também se mostrou mais acentuada, como pode ser observado nas figuras 5-11, 5-12 e 5-13.

Figura 5-11 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 15 cm



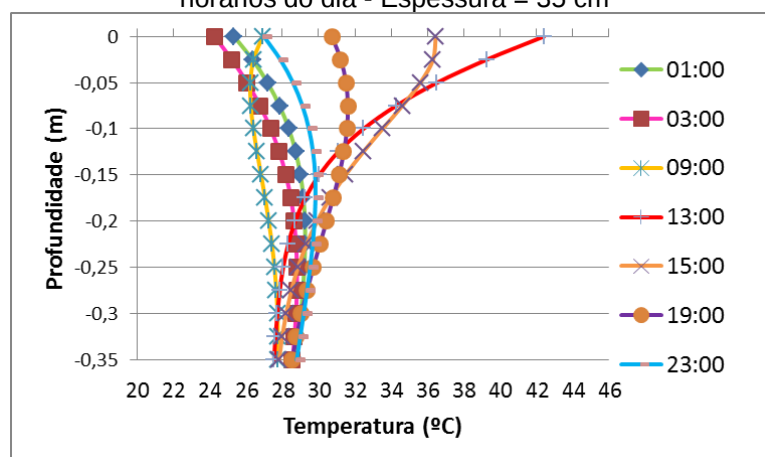
Fonte: Autor

Figura 5-12 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 25 cm



Fonte: Autor

Figura 5-13 - Distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento em diversos horários do dia - Espessura = 35 cm



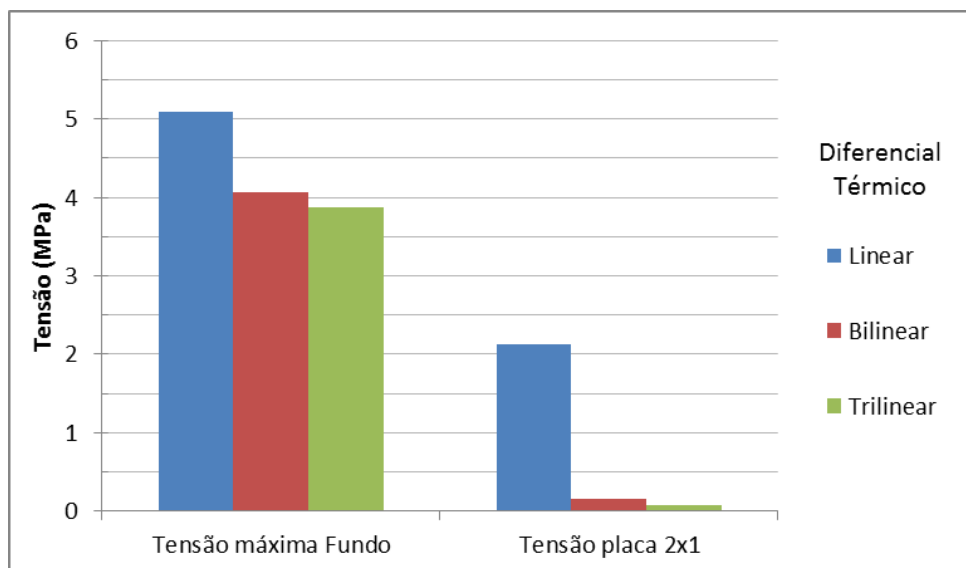
Fonte: Autor

Ao analisar as figuras 5-11, 5-12 e 5-13, é possível concluir que a não linearidade aumenta consideravelmente às 13:00h, que é o horário no qual a temperatura ambiente e a radiação solar estão mais elevadas.

5.2.6. Distribuição do diferencial térmico

No item anterior, foi observado que a não linearidade da distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento aumenta com o aumento da espessura da placa. Para entender como este fenômeno afeta as tensões no pavimento, foram analisados três tipos de distribuição de temperatura: linear, bilinear e trilinear. Foi considerada a placa de 35 cm, com o diferencial térmico de 14,87°C. Para as três simulações, foram inseridas as temperaturas de 42,41°C para o topo e 27,53°C para o fundo. No gradiente bilinear, foi inserida a temperatura de 29,25°C na metade da profundidade e, no gradiente trilinear, foram inseridas as temperaturas 32,46°C no terço superior e 28,31°C no terço inferior. As tensões máximas encontradas podem ser observadas na figura 5-14.

Figura 5-14 - Tensões máximas de tração encontradas para variação da distribuição do diferencial térmico



Fonte: Autor

Pode-se concluir, a partir da análise da figura 5-14, que a situação mais crítica é quando se considera o gradiente térmico linear, quando comparado aos gradientes bilineares e trilineares. A tensão máxima no fundo decresceu 23,77% quando o gradiente passou de linear para trilinear e as tensões de origem térmica decresceram 96,71% (Placa 2x1). As figuras 5-15 a 5-17 ilustram a distribuição de tensões no fundo do pavimento para os três tipos de diferenciais térmicos considerados, pode-se notar que as tensões decresceram, consideravelmente, na análise com o gradiente trilinear.

Figura 5-15 - Tensões no fundo do pavimento -
Gradiente linear

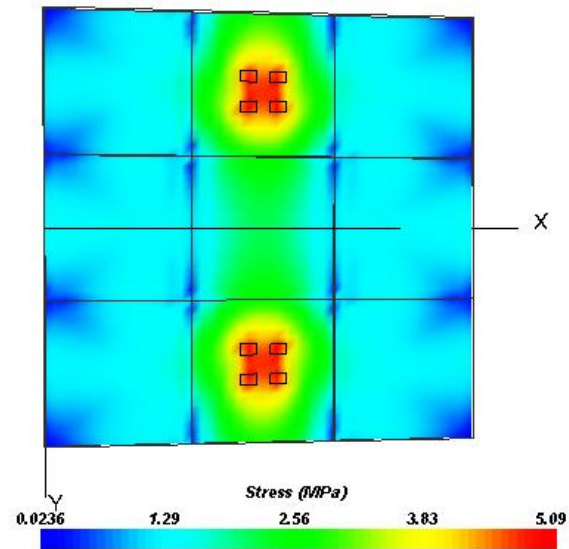


Figura 5-16 - Tensões no fundo do pavimento -
Gradiente bilinear

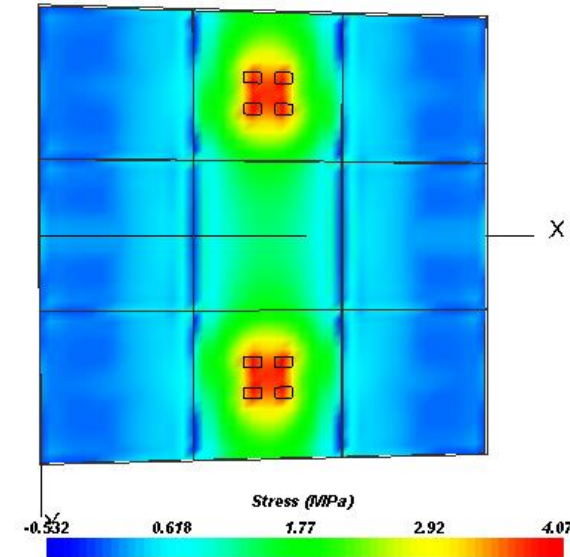
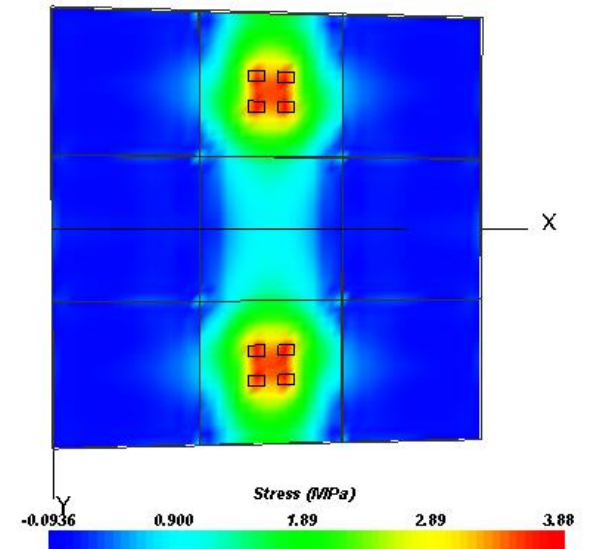


Figura 5-17 - Tensões no fundo do pavimento -
Gradiente trilinear



Fonte: Autor

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões gerais

O estudo permite a conclusão de que o gradiente de temperatura imposto ao pavimento é sensível às variações de temperatura do local que se encontra, que a radiação solar desempenha papel fundamental no aquecimento da superfície do pavimento e que as tensões devidas ao carregamento ambiental são significativas e necessitam ser levadas em consideração no dimensionamento do pavimento. Entretanto, após inspeção em campo com auxílio de um termógrafo, foi possível identificar que o calor emitido pelas turbinas, quando a aeronave está estacionada, não influencia significativamente no aumento de temperatura do pavimento, então, esse parâmetro não foi considerado nas análises. É necessário um 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 a redução da vida útil do pavimento.

O objetivo da pesquisa, que é contribuir ao estudo do comportamento termomecânico de pavimento de concreto em pátios de aeronave, foi alcançado já que foram realizadas diversas análises térmicas e mecânicas do pavimento considerando as cinco regiões brasileiras, além das análises paramétricas. As análises apresentadas contribuem para que os projetistas de pavimentos de concreto tenham uma visão geral das variáveis envolvidas no problema e a influência dessas variáveis nas tensões impostas ao pavimento. Alguns comportamentos se repetem independentemente das condições de contorno e parâmetros que foram utilizados, as quais são as conclusões gerais desse trabalho, descritas abaixo.

a) Comportamento térmico

- No período diurno, devido ao aquecimento da superfície do pavimento, ocorre um gradiente térmico positivo que impõe tensões de tração no fundo do pavimento;
- No período noturno, devido ao resfriamento da superfície e ao baixo coeficiente de condutividade térmica do concreto que mantém o fundo do

pavimento aquecido, ocorre um gradiente térmico negativo que impõe tensões de tração na superfície do pavimento;

- Quanto maior a espessura do pavimento maior será o gradiente térmico;
- Os maiores gradientes térmicos são positivos no período diurno devido, principalmente, ao calor da radiação solar;
- Em geral, ocorrem duas inversões do diferencial térmico no período de 24 horas;
- A distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento tem comportamento não linear;
- Os diferenciais térmicos são sensíveis ao clima em que o pavimento se encontra;

b) Comportamento tensional

- As máximas tensões de tração são obtidas no fundo do pavimento devido à combinação do efeito ambiental e do peso próprio de aeronaves;
- As tensões térmicas representam uma parcela considerável das tensões totais de tração atuantes no pavimento;
- No período diurno, a curvatura do empenamento é para baixo devido à dilatação do topo, o fundo do pavimento é tracionado enquanto o topo é comprimido;
- No período noturno, a curvatura do empenamento é para cima devido a contração do topo, o fundo do pavimento é comprimido enquanto o topo é tracionado;
- As maiores tensões de tração, encontradas no fundo do pavimento, estão localizadas no ponto de contato da roda da aeronave;

6.2. Comparativo entre as cinco regiões brasileiras

Nas análises térmicas, observou-se que as temperaturas no pavimento variam, consideravelmente, nas regiões brasileiras devido às diferenças climáticas e às propriedades do concreto. Em todas as regiões, os maiores diferenciais térmicos foram constatados nas estações primavera/verão e os menores no inverno. O maior diferencial térmico verificado foi em Porto Alegre com 14,48°C e o menor em São Paulo com 11,59°C. Foi demonstrado que os diferenciais térmicos dependem

fortemente da condutividade térmica do concreto, porém, a temperatura do topo do pavimento está vinculada, principalmente, ao clima. Isso foi constatado devido à temperatura de topo de Teresina, por exemplo, que foi a maior registrada, 44,91°C e que também corresponde a maior temperatura média mensal, 39,03°C, contudo, não obteve o maior diferencial térmico.

Ainda sobre as análises térmicas, foi observado que a distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento tem comportamento não linear e que a não linearidade aumenta no período de maior temperatura e radiação solar do dia, entre 12:00h e 14:00h. Além disso, ocorrem duas inversões do gradiente térmico, o primeiro pela manhã, onde o gradiente se torna positivo e o segundo no período noturno, onde o gradiente térmico volta a ser negativo, principalmente pela falta de radiação solar.

Nas análises tensionais para as cinco regiões brasileiras, notou-se que a máxima tensão de tração foi obtida através da combinação do carregamento mecânico com o diferencial térmico positivo e está localizada no fundo do pavimento e na região de contato com as rodas das aeronaves. O maior valor obtido foi em Porto Alegre com o valor de 6,60MPa e o menor em Brasília, 5,63MPa. Um ponto importante discutido foi o aumento considerável na tensão máxima no pavimento quando se comparou as duas situações: somente carregamento mecânico e a combinação do carregamento mecânico com o térmico. A tensão máxima encontrada somente com o carregamento mecânico foi de 3,58MPa e considerando a combinação mecânico + térmico de 6,60MPa (Porto Alegre). Com isso, verificou-se a importância do carregamento térmico na análise tensional do pavimento de concreto. Quanto ao gradiente térmico negativo na análise tensional, verificou-se tensões com magnitudes inferiores, quando comparado com o gradiente térmico positivo. Isso acontece devido ao comportamento da placa de concreto face a um diferencial térmico negativo, a qual possui a curvatura do empenamento para cima, porém, tensões de compressão são induzidas no fundo do pavimento devido à restrição do movimento das placas, essas tensões atuam de maneira oposta ao carregamento mecânico imposto, o qual induz tensões de tração no fundo do pavimento.

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.

Outro ponto importante a ser considerado no dimensionamento é a importância do módulo de elasticidade nas tensões do pavimento. Como demonstrado, na medida em que o módulo de elasticidade aumenta, as tensões também aumentam. Para ilustrar, pode-se citar o caso de Brasília, que foi a cidade que obteve o segundo maior diferencial térmico (13,39°C), porém, foi a cidade com o menor módulo de elasticidade (27605MPa), o que resultou na menor tensão máxima de tração entre os municípios estudados.

6.3. Análises Paramétricas

As análises paramétricas tiveram como objetivo o estudo da influência de cada parâmetro considerado nas análises térmicas e mecânicas. Os resultados são de grande importância para projetistas, pois revelam quais características devem ser modificadas para um dimensionamento mais eficiente.

Os primeiros parâmetros analisados foram temperatura e a radiação solar, os quais influenciam diretamente no diferencial térmico do pavimento. Com as análises, pode-se concluir que quanto maior a temperatura e a radiação solar, maior será o diferencial térmico, porém, a radiação solar se mostrou mais relevante. Face à grande variação da radiação solar nas regiões brasileiras, é necessário que esse parâmetro seja considerado e que tenha seus valores condizentes com a realidade da região onde o pavimento será construído.

Outro parâmetro que influencia no diferencial térmico é a condutividade térmica do concreto. Foram analisados os diferenciais térmicos para as condutividades de 1,7 W/m.°C, 2,5 W/m.°C e 3,5 W/m.°C. Como resultado, obteve-se que um acréscimo de 106% na condutividade térmica representa um decréscimo de 29% no diferencial térmico da placa, ou seja, são inversamente proporcionais. Esse resultado também sugere que pequenas diferenças na estimativa da condutividade térmica não implicam em erros consideráveis no cálculo do diferencial térmico. O importante, nesse caso, é considerar o valor típico da condutividade térmica de acordo com o agregado gráúdo a ser utilizado no concreto.

O módulo de elasticidade é um parâmetro que afeta diretamente as tensões máximas no pavimento. Foram realizadas análises tensionais considerando os seguintes valores do módulo de elasticidade: 27605MPa, 30762MPa e 36806MPa. Esses valores foram calculados a partir da equação da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) considerando o f_{ck} igual a 30MPa e os agregados graúdos calcário, granito e basalto, respectivamente. Como resultado, foi obtido que quanto maior o módulo de elasticidade, maior a tensão do pavimento e menor a deformação.

Além do módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica também tem grande influência nas tensões impostas ao pavimento. Foram variados os valores de $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Como resultado, obteve-se que quanto maior o coeficiente de expansão térmica, maior será as tensões no pavimento. Um ponto importante dos resultados é que essa propriedade exerce maior influência nas tensões de origem térmica do que na combinação com as de origem mecânica. Um acréscimo de 33% no coeficiente de expansão térmica representou 37% de aumento nas tensões de origem térmica e somente 14% de acréscimo nas tensões de origem térmica+mecânica.

A geometria das placas de concreto também foi analisada. Primeiramente, em relação à dimensão da placa de concreto que foi variada nos valores de 4,5m, 5,5m e 7,5m. Como resultado, uma variação de 3,00m na dimensão da placa (4,5m para 7,5m – 67%) aumentou em 10% as tensões totais (mecânicas + térmicas) e em 29% às tensões de origem térmica (placa 2x1). Portanto, quanto maior a placa, maior serão as tensões no pavimento e as tensões de origem térmica são mais influenciadas do que as tensões totais por esse parâmetro.

Com relação à espessura do pavimento, foi demonstrado que o aumento de espessura acarreta na diminuição das tensões totais. Porém, é preciso cautela ao aumentar a espessura já que também se aumenta o custo total da obra. Além disso, também há um aumento do diferencial térmico que deve ser levado em consideração no dimensionamento. Antes da decisão pelo aumento da espessura do pavimento, caso as tensões estejam ultrapassando a resistência do material, devem ser findadas as possibilidades de variação no traço do concreto, o que altera as propriedades térmicas e mecânicas e que podem contribuir para a redução nas tensões totais, possivelmente sem custos adicionais à construção.

Também foi analisado como a distribuição do diferencial térmico afeta as tensões no pavimento. Observou-se que as maiores tensões são encontradas ao se considerar o gradiente linear, quando comparado com os gradientes bilineares e trilineares.

Por fim, pode-se concluir que as propriedades térmicas e mecânicas do concreto exercem significativa influência nas tensões impostas ao pavimento e são os agregados graúdos os principais responsáveis por estas variações. Portanto, tendo em vista os comparativos realizados, faz-se necessária uma especificação cautelosa dos agregados graúdos a serem utilizados no concreto para que estejam em concordância com os parâmetros utilizados no dimensionamento do pavimento.

6.4. Proposta para futuras pesquisas

Como sugestão para trabalhos futuros na área de análise termomecânica de pavimentos de concreto, propõe-se:

- Execução de pavimentos experimentais de concreto para medição de tensões e temperaturas nas cinco regiões brasileiras utilizando materiais característicos de cada região e realizando a caracterização completa do concreto utilizado para que se possa comparar com os resultados das medições e verificar possíveis correlações entre os dados;
- Inclusão da variável umidade do ar nas análises;
- Comparação das medições de campo com modelos numéricos;
- Formulação de equações e ábacos para que possam ser utilizados por projetistas para o dimensionamento de pavimentos de concreto.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

- AGULLO, L. **Estudio termico en presas de hormigon frente a la accion térmica ambiental**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 1991. Tesis Doctoral.
- ANSYS. **ANSYS Help – Advanced Analysis Techniques Guide**, 2014.
- ANSYS. Engineering Analysis System. Versão 15.0: Swanson Analysis Systems, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Curso de tecnologia de pavimentos de concreto: módulo 2 – projeto e dimensionamento dos pavimentos**. São Paulo, 2013. Disponível em <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02%20ABC_P.pdf> Acessado em 25 de setembro de 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7583**: execução de pavimento de concreto simples por meio mecânico. Rio de Janeiro, 1986.
- 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.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A. Thermal Gradients in Concrete Pavements on Tropical (Hot-Wet) Climate: An Experimental Appraisal. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., USA, v. 1, n.3, p. 12-22, 2002.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A.; PEREIRA, D. S.; RODOLFO, M. P. Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto: instrumentação da pista experimental na USP. **Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes**. Rio de Janeiro: ANPET, v. 1, p. 533-538, 2000.
- BARREIRA E. S. B. M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico dos edifícios**. Porto, Portugal: Universidade do Porto. 2004. Dissertação (Mestre em Construção de Edifícios).
- 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(10), p. 723-729, 2011.

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

CODRINGTON, J. **Finite Elements Analysis of Structures – Course Notes**. Adelaide: The University of Adelaide, 156p., 2014.

Davids, B. **EverFE Theory Manual**. Maine: University of Maine, 2003.

DBN. **V.1.2-2:2006**. The system of ensuring reliability and safety of building objects. Loads and actions. Kiev, 2006. Design norms.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro, 2 ed, 2004.

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.

GAMBALE, E. A.; CASTRO, A.; ANDRADE, M. A. S.; TRABOULSI, M. A. Análise Estatística dos Parâmetros que intervêm no Fenômeno Térmico do Concreto Massa. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, 2010.

INGENHEIRO. **Termografia de Edifícios**, 2018. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Ingenheiro/termografia-edificios>> [acessado em 10 de Outubro de 2018].

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> [acessado em 01 de Novembro de 2017].

KARUNARATHNE, A.; MAMPEARACHCHI, W.; NANAYAKKARA, A. **Modelling of thermal effects due to solar radiation on concrete pavements**. Sri Lanka: University of Moratuwa, 2010.

- 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.
- KORDUN, O. I. The influence of solar radiation on temperature increment of sheet steel structures. **Archives of Civil Engineering**. Warsaw University of Technology. V. LXI, Issue 1, 2015.
- LIDUÁRIO, A. S. **Contribuição ao estudo das propriedades térmicas do concreto convencional na presença das adições minerais**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Civil)
- MACKIEWICZ, P. Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. **Applied Thermal Engineering**, V. 73, pp. 1169-1176, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. USA: McGraw-Hill, 3ª edição, 2006.
- MOREIRA, A.; CALMON, J.L. Barragens de concreto submetidas à ação térmica ambiental. Análise da barragem Llosa del Cavall. **Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções CBPAT2016**. Porto Alegre, RS: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES (ALCONPAT-BRASIL), v. 1. p. 707-718, 2016.
- MOROPOULOU, A.; AVDELIDIS, N. P.; KOUI, M.; KAKARAS, K. An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements. **NDT&E International**. V. 34, p. 329-335, 2001.
- 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, p. 261-270, 2014.
- OLIVEIRA, P. L. **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. São Carlos, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000. Tese - Mestre em Engenharia de estruturas.
- PIFFER, J. N. **Termografia Aplicada como Teste não Destrutivo em Análise Estrutural de Compósitos**. São Carlos, São Paulo: ESAF – Escola de Administração Fazendária, 2016. Monografia (Categoria Melhor Monografia - Tema Novas Tecnologias na Aviação Civil).

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

SANTOS, D. F. **Ampliação do Pátio de Estacionamento de Aeronaves do Aeroporto Salgado Filho: Análise de Custos de Soluções Alternativas para o Projeto aprovado pela Infraero**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Projeto de Graduação.

SANTOS, S. B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto. Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2004. Tese - Mestrado em Engenharia Civil.

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

SEVERI, A. A.; BALBO, J. T. Modelo para Previsão de Diferenciais Térmicos Diurnos em Pavimentos de Concreto Simples no Clima Tropical. **Anais do XVI Congresso de Pesquisa em Transportes**. São Paulo: Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes. V. 1, p. 43-54, 2002.

SHEIBANY, F.; GHAEMIAN, M. Effects of environmental on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam. **Journal of Engineering Mechanics**. V. 132, p. 532-544, 2006.

SILVA, D. D. S. **Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia**. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2012. Tese - Mestre em Engenharia Civil.

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.y.sk.nilim.go.jp/kakubu/kukou/sisetu/pdf/201108b.pdf> Acessado em 15 de agosto de 2016.