



**ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS RÍGIDOS AEROPORTUÁRIOS SUBMETIDOS A CARGAS  
MECÂNICAS E CARGAS TÉRMICAS SAZONAIS NÃO LINEARES.**

**DYALOISIO ARAÚJO FONTELES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS RÍGIDOS  
AEROPORTUÁRIOS SUBMETIDOS A CARGAS MECÂNICAS E  
CARGAS TÉRMICAS SAZONAIS NÃO LINEARES.**

**DYALOISIO ARAÚJO FONTELES**

**ORIENTADOR: Ph.D. FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS RÍGIDOS  
AEROPORTUÁRIOS SUBMETIDOS A CARGAS MECÂNICAS E  
CARGAS TÉRMICAS SAZONAIS NÃO LINEARES.**

**DYALOISIO ARAUJO FONTELES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

---

**Prof. Francisco Evangelista Junior, PhD (UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD (UnB)**  
(Examinador Interno)

---

**Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, DSc (DNIT/UnB)**  
(Examinador Externo)

**BRASÍLIA/DF, 29 DE MAIO DE 2017**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

FONTELES, DYALOISIO ARAÚJO

ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS RÍGIDOS AEROPORTUÁRIOS SUBMETIDOS A CARGAS MECÂNICAS E CARGAS TÉRMICAS SAZONAIS NÃO LINEARES. [Distrito Federal] 2017.

xxv, 120p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2017).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Pavimento Aeroportuário

2. Diferenciais Térmico

3. Tensões Térmicas

4. método dos elementos finitos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

**FONTELES, D. A.** (2017). Análise de Tensões em Pavimentos Rígidos Aeroportuários Submetidos a Carga Mecânicas e Cargas Térmicas Sazonais não Lineares. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD-18A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Dyaloisio Araújo Fonteles

TÍTULO: Análise de Tensões em Pavimentos Rígidos Aeroportuários Submetidos a Carga Mecânicas e Cargas Térmicas Sazonais não Lineares.

GRAU: Mestre      ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Dyaloisio Araújo Fonteles  
SQN 404 BLOCO C AP 105 – Asa Norte  
70.845-030 Brasília - DF- Brasil  
e-mail: eng.fonteles@outlook.com

Dedico aos meus pais, Ana e Aloísio, que sempre me incentivaram a buscar o caminho do conhecimento, e aos quais eu devo tudo o que sou hoje.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sobre todas as coisas, por me conceder a benção da vida, por ser minha proteção espiritual nos momentos mais difíceis e por iluminar meu caminho para que eu pudesse exercer o que realmente sou capaz de fazer.

À minha mãe, Ana Pires, meu exemplo de amor e carinho, minha companheira e meu pilar sentimental em vários momentos da minha vida, por me mostrar, sempre com exemplos, a importância de uma boa educação e por sempre está presente em todas as minhas conquistas.

Ao meu pai e melhor amigo, Aloisio Fonteles, exemplo de honra, caráter, compaixão por todos os seres, meu parceiro de numerosos debates e ao qual eu devo, entre outras coisas, por inflamar o meu desejo de estudar.

Às minhas irmãs, Lucíola e Morganna, pelo carinho e apoio, por acreditarem em mim e em minha competência, em especial Lucíola pelo apoio financeiro, incentivo e compreensão durante os vinte quatro meses.

Ao orientador Evangelista Junior, pela sua contribuição com sugestões e críticas determinantes para a elaboração deste trabalho.

Aos professores componentes da Banca Examinadora: Márcio Muniz de Farias e Jose Guilherme Rodrigues de Mello, pela disponibilidade de participar da avaliação deste trabalho e sobretudo, por suas valiosas colaborações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior, CAPES, pela bolsa cedida e aproveitada em meus estudos durante os 24 meses de trabalho.

Aos amigos, em especial Sávio Melo, Denise Cardoso, Thiarley Lavôr, Matheus Leoni, Jessica Borges, que proporcionaram o afago sentimental e fortalecimento espiritual nos momentos de necessidade.

## **RESUMO**

# **ANÁLISE DE TENSÕES EM PAVIMENTOS RÍGIDOS AEROPORTUÁRIOS SUBMETIDOS A CARGAS MECÂNICAS E CARGAS TÉRMICAS SAZONAIS NÃO LINEARES.**

Autor: Dyaloisio Araújo Fonteles

Orientador: Francisco Evangelista Júnior, PhD (UnB)

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, maio de 2017.

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos da distribuição de temperatura não linear na espessura da placa nas tensões em pavimentos de concreto nas cidades de São Paulo e Sacramento. O presente trabalho estabelece uma metodologia para consideração de temperaturas medidas em pavimentos aeroportuários em diversas épocas do ano e observar as possíveis consequências da variação térmica para as distribuições de tensões. Desta forma, a distribuição de temperatura lineares e não lineares foram considerados para diferentes configurações das aeronaves A380 e B747 para analisar as tensões induzidas em pontos críticos do pavimento, por meio de programas que utilizam o método dos elementos finitos na solução dos problemas. Os resultados apontam que o gradiente térmico influencia diretamente as tensões de tração e compressão da placa de concreto. Para os casos do A380 e B747, os resultados mostraram que o trem de pouso completo do B747 induz maiores tensões de tração, quando gradientes de temperatura foram considerados, para ambas as espessuras analisadas. Os resultados das magnitudes das tensões mostram que as tensões de base e topo da placa são similares quando somente consideradas as tensões geradas pelo gradiente térmico linear  $\Delta T$ . Entretanto, quando as tensões auto equilibrantes oriundas da distribuição de temperatura na espessura são consideradas, a cidade de Sacramento apresenta magnitudes de tensão de tração bem superiores as apresentadas pela cidade de São Paulo. Os resultados mostram e quantificam a importância da consideração da distribuição não linear de temperaturas no pavimento, uma vez que estas podem induzir maiores tensões de tração tanto na base da placa quanto no topo quando comparados com as tensões geradas somente considerando o gradiente térmico linear.

Palavras chave: pavimento de concreto, aeroportos, temperatura, método dos elementos finitos.

## **ABSTRACT**

Author: Dyaloisio Araújo Fonteles

Supervisor: Francisco Evangelista Júnior, PhD (UnB)

Postgraduate program in Structural Engineering and Construction

Brasília, May 2017.

### **STRESS ANALYSIS OF RIGID AIRPORT PAVEMENT SUBMITTED TO MECHANICAL LOADS AND SEASONAL NONLINEAR THERMAL LOADS.**

The objective of this work is to analyze the effects of nonlinear temperature distribution through concrete pavement's thickness in the magnitudes of tension stresses at the concrete plate for the cities of São Paulo and Sacramento. The proposed work establishes a methodology for considering measured temperatures in airport pavements at different times of the year and to observe the possible consequences of the thermal variation for the critical stresses. In this way, the linear and nonlinear temperature distribution were considered for different configurations of the A380 and B747 aircrafts to analyze the stresses induced at critical points of the pavement, using the finite element method to predict the stresses. The results indicate that the thermal gradient directly influences the tensile and compressive stresses of the concrete slab. For the A380 and B747 cases, the results showed that the complete gear of the B747 induces higher tensile stresses when temperature gradients are considered for both thicknesses analyzed. The results of the stress magnitudes show that the stresses at both top and bottom of the concrete plate are similar only when considering the stresses generated by the linear thermal gradient  $\Delta T$ . However, when the self-balancing stresses calculated from the nonlinear temperature distribution are considered, the city of Sacramento has tensile magnitudes higher than those presented by the city of São Paulo. The results show and quantify the importance of considering the temperature distribution on the pavement, as these can induce high tensile stresses both at the base of the plate and at the top rather than considering only stresses due to linear gradient.

Key words: concrete pavement, airports, temperature, finite element method.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1	TENSÕES EM PLACAS DE CONCRETO .....	5
2.1.1	Empenamento térmico na placa.....	5
2.1.2	Transferência de carga entre placas.....	8
2.1.3	Distribuição de temperatura não linear em placas de concreto .....	11
2.1.4	Distribuição quadrática de temperatura com a espessura da placa.....	13
2.1.5	Conceito de NOLA.....	16
3	METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS .....	19
3.1	METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA .....	19
3.1.1	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS .....	20
3.1.2	Discretização do modelo .....	21
3.1.3	Propriedades dos Materiais.....	23
3.1.4	Carregamento.....	23
3.2	DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ANALISADAS.....	29
3.2.1	Caracterização da distribuição de temperatura não linear .....	32
3.3	VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS.....	33
4	RESULTADOS DE TENSÕES COM DIFERENCIAIS TÉRMICOS LINEARES ..	35
4.1	EFEITO DOS DIFERENCIAIS TÉRMICOS NAS DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES NA PLACA DE CONCRETO.....	35
4.2	SIMULAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA .....	39
5	RESULTADO DE TENSÕES COM DIFERENCIAIS TÉRMICOS NÃO LINEARES .....	44
5.1	RESULTADOS DE NOLA, $\Delta T$ E $\sigma^S$ .....	44
5.1.1	Análise comparativa das tensões máximas topo e na base da placa.....	44
5.2	RESULTADOS DAS TENSÕES NA PLACA PARA AS CIDADES DE SÃO PAULO E SACRAMENTO.....	45
5.2.1	Comportamento das tensões para os pavimentos de 25 e 50.8 cm.....	45
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
6.1	CONCLUSÃO.....	51
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	52
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	53
	APÊNDICES.....	61
	APÊNDICE A- Comportamento das tensões do A380 e do B747.....	62
	APÊNDICE B- Tensões de tração máximas para as aeronaves A380 e B747.....	67
	APÊNDICE C- Tensões para diferenciais térmicos lineares para as cidades de São Paulo e Sacramento.....	91
	APÊNDICE D- Tabelas e gráficos para a cidade de São Paulo .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Geometria das placas carregadas.....	21
Tabela 3.2- Especificação dos casos analisados.....	23
Tabela 3.3- Tipo de trens de pouso e LTE utilizados.....	24
Tabela 3.4- Comparação dos resultados da Razões entre as $\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b$ encontradas com a da literatura, os números destacados em negrito indicam que a razão entre $(\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b) > 1$ ..	34
Tabela 4.1- Posições das LP's que induziram as $\sigma_{xx}^b$ e $\sigma_{xx}^t$ máximas para as aeronaves. ..	43
Tabela 5.1- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC e LTE 85%. .....	46
Tabela 5.2- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE 85%. .....	48
Tabela 5.3- Influência da $\sigma^S$ na espessura da placa, para TPC do A380, LTE 85%.....	49
Tabela 5.4- Razão das $(\sigma_{xx}^t + \sigma^S / \sigma_{xx}^b + \sigma^S)$ , para TPC do A380, LTE 85%.....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Peso bruto das Aeronaves e os anos de introdução das aeronaves comerciais (Adaptada Kim, 2000).	2
Figura 2.1- Empenamento (curvatura) das placas com variação do gradiente de temperatura, (a) Noite e (b) Dia.	6
Figura 2.2- Eficiência de transferência de carga através das juntas.	9
Figura 2.3- Deflexões das placas submetidas a um carregamento próximo às juntas, a) e b).	10
Figura 2.4- Relação da LTE com AGG em função do módulo de reação do subleito.	11
Figura 2.5- Distribuições das tensões devido a um perfil de temperatura não linear na espessura da placa (adaptada de Hiller, 2007).	12
Figura 2.6- Distribuição de $T(z)$ para a determinação dos coeficientes de perfis da temperatura quadrática (adaptado de Hiller, 2007).	13
Figura 2.7 - Representação do NOLA para dois perfis de temperatura (noite e Dia).	17
Figura 3.1- Fluxograma da metodologia da modelagem numérica.	19
Figura 3.2- Discretização da malha nas dezesseis placas, a) e b).	22
Figura 3.3- Transferência de carregamento entre placas com LTE 0%.	22
Figura 3.4- Boeing 747 (Air Journal, 2016).	24
Figura 3.5- Airbus A380 (Air Journal, 2016).	25
Figura 3.6- Dimensões dos trens de pouso completo (TPC); (a) A-380 e (b) B-747. O TPP é configuração com linhas tracejadas. As dimensões são em metros.	25
Figura 3.7- Distribuição do centro de gravidade (CG) de carregamento nas aeronaves A380 e B474, TPP e TPC. As dimensões são em metro.	26
Figura 3.8- Posições do primeiro e do último carregamento de todos os centros de gravidades (CGs); A380 (a) TPC e (b) TPP.	27
Figura 3.9- Posições do primeiro e do último carregamento de todos os centros de gravidades (CGs); B747 (a) TPC e (b) TPP.	28
Figura 3.10- Comportamento da temperatura em um dia ensolarado (Adaptado e modificado por Raia (2010) a partir dos dados de Severi (2002) de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo)	29
Figura 3.11- Simulação de um dia ensolarado de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo (Raia, 2010).	30
Figura 3.12- Dia quente com chuva no período de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo (Raia, 2010)	30
Figura 3.13- Combinações de dados para análise de resultados no ILLISLAB.	31
Figura 3.14- Frequência Relativa (FR) da relação do $\Delta T$ com NOLA para a cidade São Paulo.	32
Figura 3.15- Frequência Relativa (FR) da relação do $\Delta T$ com NOLA para a cidade Sacramento.	32
Figura 3.14- Explicação do processo de verificação das análises do ILLISLAB.	33
Figura 4.1- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ com $\Delta T= 0$ °C, para A380 TPC, LTE 85 % , h= 50.8 cm e k= 13.6 MPa/m.	35
Figura 4.2- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ com $\Delta T= -16.6$ °C, para A380 TPC, LTE 85 % , h= 50.8 cm k= 13.6 MPa/m.	36
Figura 4.3- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ com $\Delta T= 16.6$ °C, para A380 TPC, LTE 85 % , h= 50.8 cm e k= 13.6 MPa/m.	37
Figura 4.4- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ (P11) com incidência de carga A380 TPC, com variação dos gradientes, LTE 85%, h=40.6 cm e k= 40.7 MPa/m.	38

Figura 4.5- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC h=40.6 cm: (a) e (c) $\sigma_{xx}^t$ e (b) e (d) $\sigma_{xx}^b$ com k= 40.7 MPa/m.....	39
Figura 4.6- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC h= 50.8 cm: (a) e (c) $\sigma_{xx}^t$ e (b) e (d) $\sigma_{xx}^b$ com k= 13.6 MPa/m. ....	40
Figura 4.7- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC, h= 40.6 cm: (a) e (c) $\sigma_{xx}^t$ e (b) e (d) $\sigma_{xx}^b$ com k= 40.7 MPa/m. ....	41
Figura 4.8- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC, h= 50.8 cm: (a) e (c) $\sigma_{xx}^t$ e (b) e (d) $\sigma_{xx}^b$ com k= 13.6 MPa/m. ....	42
Figura 5.1- Frequência relativa da relação do $\Delta T$ com a $\sigma^S$ para a cidade São Paulo.....	44
Figura 5.2 – Frequência relativa da relação do $\Delta T$ com a $\sigma^S$ para a cidade Sacramento. ..	45
Figura 5.3- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ e $\sigma_{xx}^b$ para as cidades de São Paulo e Sacramento da A380 TPC.....	47
Figura 5.6- Comportamento das $\sigma_{xx}^t$ e $\sigma_{xx}^b$ para as cidades de São Paulo e Sacramento da B747 TPC com LTE 85%.....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

### Símbolos do Alfabeto Grego

$\alpha$	Coefficiente de Expansão Térmica do Concreto
$\beta_i$	Coefficiente de Bradbury
$\delta_l$	Deflexão da Placa Carregada
$\delta_u$	Deflexão da Placa sem Carregamento
$\Delta T$	Diferencial Térmico
$\Delta T_{eq}$	Diferencial Térmico Equivalente
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$\mu\varepsilon$	<i>Microstrain</i>
$P$	Carga de roda por pneu
$\rho$	Pressão de contato dos pneus
$\sigma^A$	Tensão Axial da Placa de Concreto
$\sigma^L$	Tensão de Flexão Equivalente Linear
$\sigma^T$	Tensão Total
$\sigma_{xx}^b$	Tensão de Tração na Base da Placa na direção X
$\sigma_{xx}^t$	Tensão de Tração no Topo da Placa na direção X
$\sigma_{máx.}$	Tensão Máxima
$\sigma^{NL}$	Tensão não Linear
$\sigma^S$	Tensão Auto-Equilibrante

### Símbolos do Alfabeto Latino

.	Separador decimal
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
E	Módulo de Elasticidade
$e^x$ e $e^y$	Malha de elementos quadrados
h	espessura da Placa
I	Momento de Inércia

$k$	Módulo de Reação do Subleito
$L$	Comprimento Livre ou Largura da Placa
$\ell$	Raio de Rigidez Relativa
$L_x$ e $L_y$	Dimensões da placa nos eixos $x$ e $y$
$M_c$	Momento de Compressão
$M_L$	Momento Linear
$T_b$	Temperatura de Base
$T_{LIN}$	Temperatura Linear
$T^{NL}$	Temperatura não Linear
$T_t$	Temperatura de Topo
$T_{(z)}$	Perfil de Temperatura Total com uma função de espessura
$T_A$	Componente de Temperatura Axial
$T_{L(z)}$	Componente de Temperatura Linear com uma função de espessura
$T_m$	Temperatura no meio da placa
$T_{s(z)}$	Componente de Temperatura não Linear (auto-equilibrante) com uma função de espessura
$w$	Deflexão de superfície
$z$	Posição do fundo da placa

### **Siglas em Português**

BT	Barra de Transferência
CC	Configuração do Carregamento
CCP	Concreto de Cimento Portland
CG	Centro de Gravidade
DS	Dia Ensolarado
DSC	Dia Ensolarado com Chuva
LP	Linhas de Passagem
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
P11	Placa 11
TPC	Trem de Pouso Completo

TPP Trem de Pouso Principal

**Siglas em Inglês**

AASHO *Association of State Highway Officials*

AGG *Aggregate Interlock*

EICM *Enhanced Integrated Climatic Model*

LTE *Load Transfer Efficiency*

NCHRP *National Cooperative Highway Research Program*

NOLA *Nonlinear Area*

USA *United States of America*

## 1 INTRODUÇÃO.

Os pavimentos rígidos, ou de concreto, são sistemas estruturais em camadas que consistem em uma placa de concreto no topo e camadas granulares subjacentes. Os pavimentos de concreto possuem juntas de dilatação longitudinais e transversais, podendo ou não incluir as barras de transferência (Huang, 2004). Os pavimentos rígidos têm sido utilizados para rodovias, aeroportos, parques, estacionamentos, instalações industriais e outros tipos de infraestrutura. Quando devidamente projetados e construídos, os pavimentos de concreto podem fornecer muitas décadas de serviço (Huang, 2000; Balbo, 2007).

Pavimentos rígidos aeroportuários são utilizados em pista de pouso, taxiamento e outras eventuais áreas dos aeroportos. A função dos pavimentos aeroportuários é fornecer um apoio rígido para acomodar satisfatoriamente o tráfego de aeronaves ao longo de sua vida operacional. A concepção dos pavimentos dos aeroportos baseia-se na imposição de carregamentos térmicos de cargas provenientes do trem de pouso das aeronaves nas placas de concreto, considerando um carregamento estático.

O dimensionamento do pavimento rígido aeroportuário tem sido tradicionalmente baseado na tensão de flexão máxima na fibra inferior da placa (base da placa) proposta por Westergaard (1926). Sua proposta baseou-se em equações que empregavam hipóteses simplificadas, considerando o tamanho de uma placa infinita, bem como a distribuição linear da temperatura através da espessura da placa. Desse modo, por muitos anos, o guia de projeto da Administração da Aviação Federal *Federal Aviation Administration* (FAA, 1995) aborda as tensões de borda de Westergaard como resposta crítica para pavimento de concreto. Entretanto, com o advento da computação, vários programas implementaram uma análise de elementos finitos, tentando flexibilizar as hipóteses de Westergaard (Huang, 1974; Tia et al, 1987; Korovesis, 1990; Khazanovich, 1994; FAA, 2016). No entanto, grande parte das metodologias de análises em pavimentos rígidos de aeroportos baseia-se nas abordagens clássicas de soluções bidimensionais desenvolvidas por Westergaard (1927) e Burmister (1943). Com a popularização do Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma ferramenta computacional, foram desenvolvidos programas para análise de pavimentos de concreto como ILLISLAB (Tabatabaie, 1977; Koroveses, 1990; Khazanovich, 1994), KENSLAB (Huang, 1973a), EverFER (William *et al*, 1998).

O comportamento estrutural dos sistemas de pavimentos de aeroportos sob múltiplas cargas, começou em 1940 com o bombardeiro B-29, um avião com dois trens de pouso principais em configuração tandem. Com o advento de novas tecnologias que se incorporaram à engenharia aérea, os aviões projetados foram dimensionados para comportar um maior volume de carga, o que trouxe ao efetivo da época um aumento de aviões de grande porte nas grandes companhias aéreas. Como consequência, os comportamentos estruturais dos sistemas de pavimentos aeroportuários sofreram redimensionamento, de modo a comportar essa nova demanda. A infraestrutura estudada desde o ano de 1960 apresentou um aumento do transporte aéreo nos principais aeroportos do mundo, tornando a pesquisa mais crítica na década de 80. A Figura 1.1 mostra a evolução do peso das aeronaves comerciais.

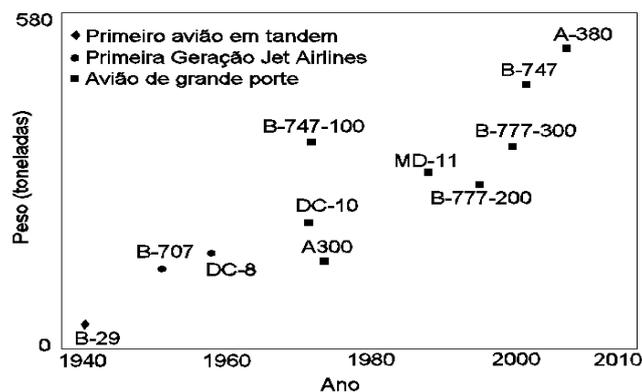


Figura 1.1- Peso bruto das Aeronaves e os anos de introdução das aeronaves comerciais (Adaptada Kim, 2000).

Estudos experimentais e analíticos relataram a influência do diferencial de temperatura na análise de pavimento de concreto (Huang 2004; Balbo 2007; e Khazanovich 1994). Dessa forma, as tensões críticas nestes pavimentos resultam em combinações dos diferenciais térmicos e das cargas de tráfego sobrepostas. Assim sendo, durante os projetos, é indispensável o conhecimento da temperatura não linear e sua possível influência no pavimento de concreto.

De acordo com Huang (2004), as tensões nas placas causam deformações no pavimento e desconforto ao usuário. Assim sendo, durante os projetos, é indispensável o conhecimento da temperatura não linear e sua possível influência no pavimento de concreto.

É sabido que a placa de concreto sofre um fenômeno chamado de empenamento térmico, em função das condições climáticas, conforme os períodos do dia e as estações do ano. De acordo com Huang (2004), o empenamento térmico causa tensões de compressão e tração na placa, provocando curvatura no pavimento e desconforto ao usuário. Assim sendo, durante os projetos, é indispensável o conhecimento da distribuição temperatura não linear e sua possível influência nas tensões no pavimento de concreto rodoviário e aeroportuário.

Conforme a movimentação da placa, a simples superposição de carga independente e respostas ambientais muitas vezes não correspondem às respostas de cargas e temperatura simultâneas (Khazanovich e Ioannides 1994, Thompson e Barenberg 1992). Especialmente em condições realistas, em que a perda de contato entre a placa de concreto e a fundação, devido ao empenamento térmico considerado, gera uma distribuição que induz a não linearidade das respostas, tornando inadequada a superposição entre as cargas mecânicas e ambientais (diferenciais térmicos).

De acordo com Aure e Ioannides (2016), o comportamento pós fissuração de uma placa de concreto de primeira idade submetida a tensões térmicas apresenta um fator dominante para determinar os padrões de fissuras causadas pelo empenamento da placa. Portanto, a seleção do material, a concepção do pavimento de concreto e as técnicas de construção devem ser cuidadosamente avaliadas e selecionadas para evitar o início de fissuras precoces, levando ao crescimento prematuro de trincas e a falhas no pavimento de concreto (Evangelista Jr *et al*, 2012).

O método de dimensionamento de pavimento de concreto simples, entre eles, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2006) e da Associação de Cimento Portland (*Portland Cement Association -PCA*), são bastante conhecidos no país, e não consideram explicitamente a temperatura não linear e suas variações sazonais. Assim, valores de tensões determinadas no projeto podem se distanciar da realidade de campo, onde a distribuição não linear varia conforme as condições climáticas às quais os pavimentos são expostos.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo geral prever as tensões críticas máximas nas placas de concreto por modelagem numérica, analisando as tensões geradas dos carregamentos estáticos de aeronaves considerando cargas térmicas sazonais com distribuições não lineares na espessura.

### **Os objetivos específicos são:**

- Analisar as tensões com distribuição temperatura no topo e na base da placa de concreto, utilizando o método dos elementos finitos do programa ILLISLAB.
- Analisar a influência dos vários posicionamentos dos carregamentos dos trens de pouso completo (TPC) e principal (TPP), das aeronaves comerciais A380 e B747 em um conjunto de placas rígidas.
- Realizar uma análise considerando uma variação de temperatura não linear da placa de concreto, medidas sazonalmente ao longo da espessura.

## **1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O primeiro capítulo apresenta os aspectos iniciais da pesquisa, fazendo uma introdução de conceitos fundamentais, motivação, bem como os objetivos gerais e específicos. No capítulo dois aborda-se uma fundamentação teórica de placas submetidas a cargas mecânicas e cargas térmicas sazonais não lineares e suas particularidades. O capítulo três traz aspectos da modelagem numérica e verificação dos resultados. O capítulo quatro dedica-se a resultados para diferenciais térmicos lineares. No capítulo cinco mostram-se os resultados dos diferenciais térmicos não lineares. No capítulo seis apresentam-se as principais considerações deste trabalho, bem como sugestões para pesquisas futuras. Nos apêndices encontram-se tabelas e gráficos das análises realizadas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo, é apresentada uma base teórica para o entendimento e desenvolvimento do tema. São mostrados conceitos importantes para o estudo de placas sobre uma base elástica submetidas a carregamentos, diferenciais térmicos, tensões lineares e auto equilibrantes, bem como diversas análises térmicas.

### **2.1 TENSÕES EM PLACAS DE CONCRETO**

Westergaard (1926) propôs um cálculo de tensão baseado na teoria de placa com espessura média, onde a sua análise é aplicada em fundações para pavimentos de concreto utilizando procedimentos mecanicistas-empíricos ao longo dos anos (Bradbury, 1938; Pickett e Ray, 1951; Thompson et al, 1987 e Thompson e Barenberg 1992).

Trabalhos como de Raia (2010) apresentam com clareza que há diferença entre este conceito de reação do subleito quando uma carga é aplicada na borda ou no centro de uma placa. Esse conjunto de camadas, que compõem o pavimento, possui comportamento elástico e linear, sendo as camadas: base (sub-base) e subleito caracterizado pelo módulo de reação ( $k$ ).

Westergaard (1926) desenvolveu um método para a solução do empenamento térmico nas juntas das placas de concreto, sendo aperfeiçoado por Bradbury (1938) para tamanhos finitos. Os autores declararam que o empenamento das placas de concreto simples se determina pelo comprimento da placa e pela rigidez relativa do subleito ( $\ell$ ) a ser definida a seguir.

#### **2.1.1 Empenamento térmico na placa**

A incidência de calor na placa de concreto sobre uma fundação de Winkler provoca um fenômeno conhecido como empenamento térmico ou curvatura térmica, pelo fato de o concreto não ser um bom condutor de calor (Huang, 2004; El-Maaty et al, 2016).

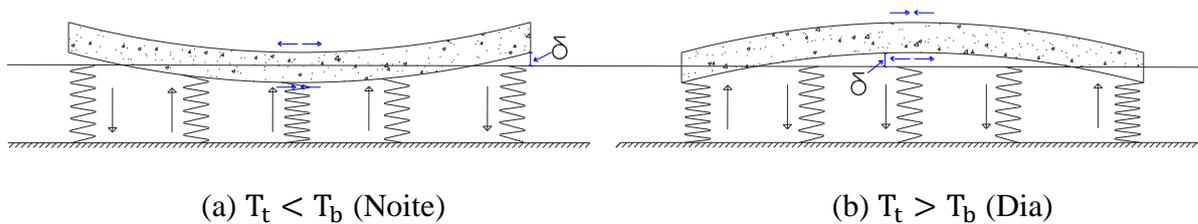


Figura 2.1- Empenamento (curvatura) das placas com variação do gradiente de temperatura, (a) Noite e (b) Dia.

No decorrer da noite, o topo da placa tende a se contrair e a base se expandir, ou seja, a temperatura de topo ( $T_t$ ) é menor do que temperatura de base ( $T_b$ ), provocando uma curvatura côncava (gradiente de temperatura negativo), como pode ser visto na Figura 2.1a. Durante o dia, a incidência da radiação solar não se dissipa no interior da placa, apresentando uma temperatura no topo consideravelmente superior à da base da placa (gradiente de temperatura positivo  $T_t > T_b$ ), representando uma expansão no topo e uma contração na base e causando uma curvatura convexa, conforme a Figura 2.1b.

O estudo realizado por Teller e Sutherland (1935) em pavimento de concreto com uma variação térmica, mostra que a distribuição de temperatura ao longo da espessura do pavimento e as tensões mais críticas na placa são predominantemente não lineares. A ação do próprio peso faz a placa ficar em contato com a camada inferior durante a noite e produz naturezas de tensões exibidas na Figura 2.1.

Essa discrepância entre o topo e a base da placa gera um gradiente térmico não linear, uma vez que os influxos de temperatura variam desde as nuances atmosféricas no decorrer do dia, conforme a incidência solar na placa, até as incidências de diferenciais térmicos sazonais de acordo com as estações do ano.

A fundação do tipo Winkler é também chamada de fundação líquida densa (LD) é um modelo clássico utilizado para uma placa repousando sobre um solo médio, cujo comportamento do solo representa uma região repleta de molas imaginárias individuais (ou um líquido denso), alocadas abaixo da estrutura perfilada na posição vertical, sendo capaz de resistir somente ao peso próprio e aos carregamentos impostos pelo conjunto de placa e base evidenciada na Figura 2.1 (Daloglu e Vallabhan, 2000).

De acordo com Westergaard (1927), a tensão de tração em uma placa de concreto no seu interior é tradicionalmente definida pela equação a seguir:

$$\sigma^L = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} \quad (2.1)$$

Em que E é módulo de elasticidade do concreto,  $\alpha$  é coeficiente de expansão térmica do concreto,  $\Delta T$  é diferença das  $T_t$  e  $T_b$  da placa e  $\nu$  é coeficiente de Poisson do concreto.

A solução de Westergaard se refere à placa infinitamente longa, porém Bradbury (1938) aperfeiçoou o estudo implementando um valor de correção para a solução de Westergaard em placas com dimensões finitas. Na equação mostra-se o esforço de tração em uma placa de concreto utilizando a tensão linear ( $\sigma^L$ ).

$$\sigma^L = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} (\beta_i + \nu\beta_{(j)}) \quad (2.2)$$

Em que  $\beta_i$  é coeficiente de Bradbury na direção investigada e  $\beta_{(j)}$  é coeficiente de Bradbury na direção perpendicular.

Onde  $\beta_i$ , o coeficiente de Bradbury, pode ser escrito.

$$\beta = 1 - \frac{2\cos\lambda\cosh\lambda(\tan\lambda + \tanh\lambda)}{\sen2\lambda + \senh2\lambda} \quad (2.3)$$

Em que:

$$\lambda_i = \frac{L_i}{\ell\sqrt{8}} \quad (2.4)$$

e  $L_i$  é comprimento livre ou largura da placa e  $\ell$  é raio relativo de rigidez.

O raio de rigidez relativo é definido como:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.5)$$

Onde  $h$  é espessura da placa e  $k$  é o módulo de reação do subleito.

### 2.1.2 Transferência de carga entre placas

A eficiência de transferência de carga *Load Transfer Efficiency* (LTE) nas juntas das placas de concreto afeta a resposta estrutural e o desempenho das placas. Ao aplicar uma carga de tráfego a uma placa de concreto, parte dos seus esforços serão transmitidos para outra placa através da junta transversal. A influência na transferência de carga afeta o tipo de mecanismo de transferência entre as placas: o módulo de reação do subleito, temperatura, tipo de juntas, umidade, número de repetições, entre outros (Colim *et al*, 2011).

A LTE é geralmente usada para medir transferência de carga em pavimentos de concreto. Se as deformações LTE forem conhecidas, a redução da tensão devido à carga de transferência para qualquer configuração de carga pode ser calculada utilizando um modelo de elementos finitos. As transferências de cargas eficientes através das juntas dependem de muitos fatores, dentre os quais se destacam: o mecanismo de transferência de carga e rigidez nas juntas; a base de apoio / subleito e temperatura.

As juntas em pavimento de concreto são construídas conforme posicionamento e dimensões preestabelecidas em projeto. Este espaçamento pode ser determinado pela presença ou não de armadura, pela temperatura do concreto e pelas propriedades dos agregados (interfere no coeficiente de expansão térmica do concreto), além de considerar os principais aspectos de projeto que são as intensidades das cargas e o empenamento térmico (Colim, 2009).

O valor de LTE ou porcentagem de transferência de carga se determina através de testes com aplicação da carga próxima à junta, sendo medida a deflexão da placa carregada e a placa

sem carregamento externo, representado pela relação entre deformação da placa carregada e a deformação da placa sem carregamento conforme a equação 2.6.

$$LTE = \frac{\delta_u}{\delta_l} 100\% \quad (2.6)$$

Sendo  $\delta_u$  a deflexão da placa sem carregamento,  $\delta_l$  é a deflexão da placa carregada e LTE é a eficiência de transferência de carga entre as placas.

As juntas são geralmente os pontos fracos em pavimentos de concreto articulados. Embora a transferência da carga, através das juntas exerça grande efeito sobre as tensões de fundo da placa como mostra a Figura 2.2 e, portanto, sobre o desempenho do pavimento, essa constatação parece ser ignorada na maioria das avaliações técnicas, visto a dificuldade de medição dessas tensões.

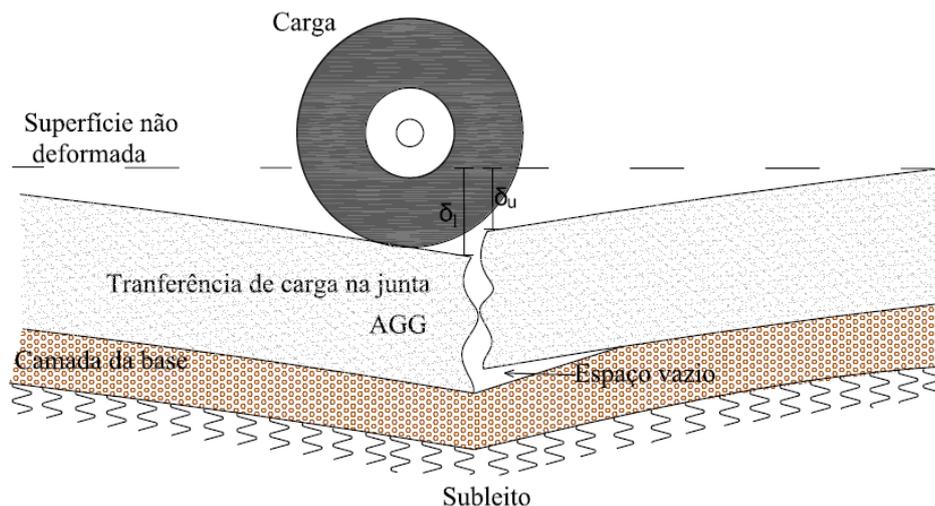


Figura 2.2- Eficiência de transferência de carga através das juntas.

Na Figura 2.2, se a junta tem uma baixa capacidade de transferência de carga, as deflexões na placa sem carregamento são menores do que as deflexões nas placas carregadas e, portanto, índice de LTE é próximo de zero. A transferência de carga pode ser inferida a partir da deflexão em ambos os lados da junta quando é aplicada uma carga sobre um lado da junta. As deformações causadas pela LTE são mostradas na Figura 2.3.

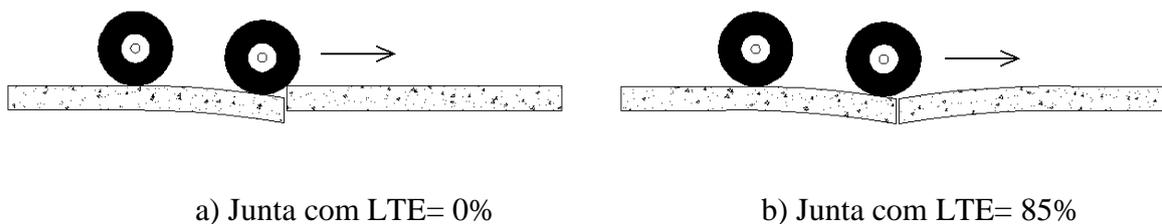


Figura 2.3- Deflexões das placas submetidas a um carregamento próximo às juntas, a) e b).

Na Figura 2.3a, a transferência de carga entre as placas na junta é nula, pois só a placa carregada se deforma, não existindo nenhuma contribuição da placa adjacente. Já na Figura 2.3b, ambas as placas se deslocam de modo idêntico; assim a transferência de cargas entre as placas se torna completa.

Quando a carga é aplicada próxima à junta de transferência na placa de concreto, ambas sofrem deformações, pois a carga aplicada se transfere para a placa adjacente onde não há carregamento externo. Diante disso, conclui-se que as deflexões e tensões na placa de concreto carregada podem ser menores, desde que as placas dividam o carregamento aplicado, diminuindo as deformações causadas por forças externas. Portanto é notório que a redução das deformações seja ligada diretamente as eficiências das juntas de transferência.

Segundo Colim (2009), a relação do valor da LTE (em %) e parâmetros ligados à natureza estrutural do sistema de pavimento de concreto: raio de rigidez relativa ( $\ell$ ) e o módulo de reação do subleito ( $k$ ), além de um parâmetro que caracteriza o módulo em cisalhamento entre as faces homólogas verticais na junta serrada na placa de concreto; esse último parâmetro é denominado por agregado intertravado *Aggregate Interlock* (AGG), podem ser calibrados com resultados de experimentos em laboratório, de acordo com a Equação 2.7.

$$LTE = \frac{1}{0.011 + 0.073e^{(0.862 \frac{AGG}{k\ell})}} \quad (2.7)$$

A Utilização da equação 2.7 desenvolvida por Colim (2009) em função do módulo de reação do subleito pode ser vista na Figura 2.4.

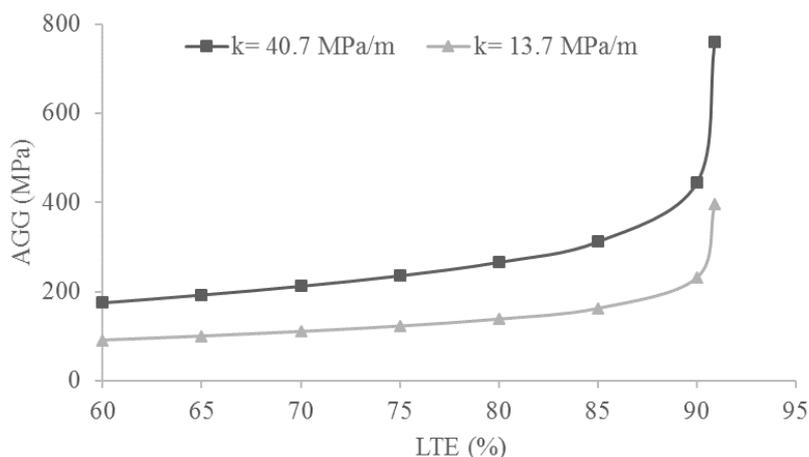


Figura 2.4- Relação da LTE com AGG em função do módulo de reação do subleito.

O gráfico na Figura 2.4, mostra a variação da LTE, devido à rigidez relativa ( $\ell$ ) (1.44 e 2.66 m) e respectivamente, o módulo de reação do subleito ( $k$ ) (40.7 e 13.6 MPa/m), obtendo um valor máximo de 91 % de eficiência conforme a Equação 2.7 (Colim, 2009).

### 2.1.3 Distribuição de temperatura não linear em placas de concreto

As técnicas atuais para avaliar as tensões internas devido a gradientes de temperatura baseiam-se na suposição de que as distribuições de temperatura e umidade através da espessura da placa sejam lineares. No entanto, as distribuições reais de tais gradientes foram encontradas para serem altamente não-lineares (Mohamed e Hansen, 1997; Mu e Vandebossche, 2016; e Aure e Ioannides, 2016)

Os diferenciais de temperatura em pavimentos de concreto são geralmente não lineares e a diferença de temperatura máxima (diária) ocorre apenas por uma curta duração, destacando que estas divergências entre a espessura média da superfície superior é cerca de duas vezes a da superfície inferior e a de temperatura máxima.

A relação entre a redução da temperatura real e a equivalente associada com o comportamento da placa, pode ser estabelecida pelo desvio de temperatura equivalente, uma vez determinadas as diferenças equivalentes para todas as medidas distintas (Jeong e Zollinger, 2004; Rao e Roesler, 2005). Portanto, o conceito de combinar todos os efeitos

ativos com diferenciais térmicos equivalente ( $\Delta T_{eq}$ ) foram considerados iguais ao ( $\Delta T = T_t - T_b$ ) para perfis quadráticos de temperatura por Hiller (2007); e Hiller e Roesler (2010).

O método utilizado por Mohamed e Hansen (1997) na análise de temperaturas não lineares, consiste em determinar a tensão auto equilibrante em uma placa de concreto que satisfaz as condições de equilíbrio e a continuidade do campo de deformação dentro da seção transversal. As tensões devido às restrições externas (peso próprio e a reação do subleito) são calculadas utilizando-se um gradiente de temperatura linear equivalente obtido nas soluções de forma fechada existente de Westergaard ou Bradbury. As tensões totais são obtidas através de um princípio de superposição de tensões de diferentes naturezas (axial, flexão e auto equilibrantes).

Segundo Khazanovich e Ioannides (1998), a importância de classificar a temperatura não linear através da espessura da placa de uma camada foi exposta inicialmente por Thomlinson (1940), apresentando um método que pode ser aplicado diretamente a problemas práticos, sendo que os autores recomendaram subdividir a tensão térmica total em três premissas, mostradas na Figura 2.5.

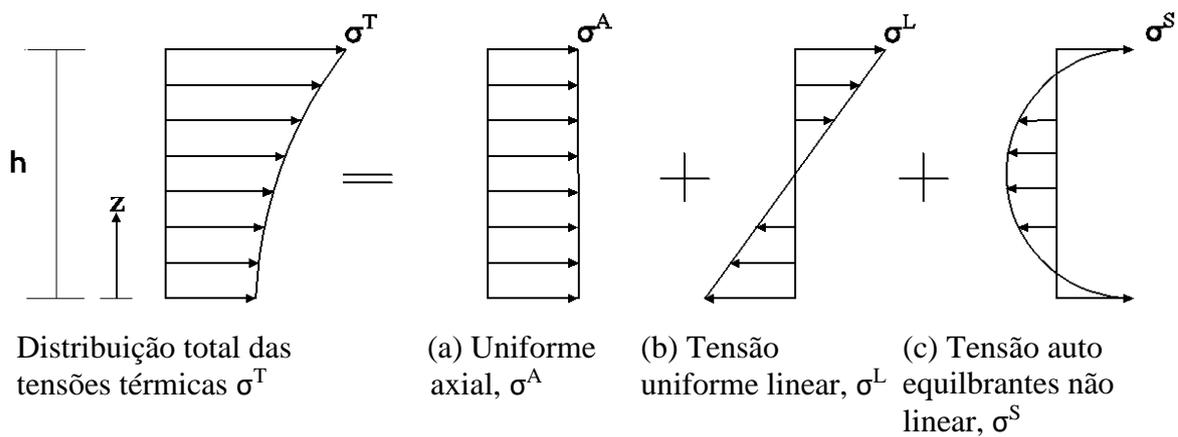


Figura 2.5- Distribuições das tensões devido a um perfil de temperatura não linear na espessura da placa (adaptada de Hiller, 2007).

(a) A tensão devido a uma mudança de temperatura uniforme causa uma expansão ou contração da placa uniforme axial,  $\sigma^A$ , devido à restrição por atrito ou por movimentação de placas vizinhas;

(b) A tensão de flexão equivalente linear,  $\sigma^L$ , relativa a  $\Delta T_{eq}$  deriva do perfil de temperatura não linear equivalente, como mostra na Equação 2.1 de Westergaard.

(c) A tensão (auto-equilibrante),  $\sigma^S$ , correspondente à não linearidade da distribuição da temperatura. Sendo que, "o esforço interno" é devido às "forças externas imaginárias que se equilibram mutuamente para que a força total em qualquer seção da placa seja zero". Essa tensão, contribui para a existência de tensões de tração ou de compressão, agindo nas superfícies de topo e base da placa como ilustra a Figura 2.5 (c) (Ioannides e Khazanovich, 1998).

Segundo Hiller (2007), a componente  $T(z)$  não precipita qualquer expansão ou movimentação, apenas produz tensões térmicas, que tendem a distorcer a seção transversal da placa. Conforme a teoria das placas de Kirchoff as linhas transversais à superfície indeformada permanecem ortogonal a uma superfície média após a deformação da placa e não há deformação no plano médio da placa, o qual permanecem plano após a flexão (Ioannides e Khazanovich, 1998).

#### 2.1.4 Distribuição quadrática de temperatura com a espessura da placa

O perfil de temperatura corresponde a uma função polinomial  $T(z)$ . O polinômio pode ser expresso com a ordem  $(n-1)$ , onde  $n$  representa o número discreto de temperatura na espessura do pavimento utilizado para aproximar a função de temperatura contínua.

De acordo com Choubane e Tia (1992), uma análise dos dados de temperatura e um estudo comparativo dos modelos existentes para as distribuições de temperatura real mostra que um polinômio quadrático pode ser usado para expressar a temperatura como uma função de espessura, conforme a Figura 2.6.

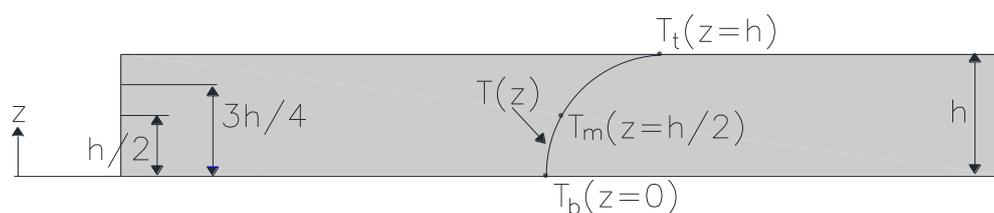


Figura 2.6- Distribuição de  $T(z)$  para a determinação dos coeficientes de perfis da temperatura quadrática (adaptado de Hiller, 2007).

As superfícies da placa na condição de equivalência de duas distribuições de temperaturas quadráticas, reduz a uma condição de igualdade dos diferenciais de temperatura da placa de concreto (Choubane e Tia, 1995; Hiller, 2007; Hiller e Roesler, 2010). Se apenas um polinômio de segunda ordem for utilizado para expressar o perfil de temperatura, a diferença das temperaturas entre as superfícies ( $T_t$  e  $T_b$ ) contribui para a tensão linear de flexão na placa de concreto. A função de temperatura quadrática pode ser expressa matematicamente usando a Equação 2.8.

$$T(z) = A + Bz + Cz^2 \quad (2.8)$$

Em que A, B, e C são coeficientes de regressão com base no perfil de temperatura medido da placa e z é a coordenada vertical medida a partir do fundo da placa.

Os coeficientes de função quadrática de temperatura apresentados na equação 2.8 estão descritos nas Equações 2.9 a 2.11 e se referem às temperaturas da Figura 2.6.

$$A = T_b \quad (2.9)$$

$$B = \frac{4T_m - 3T_b - T_t}{h} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{2(T_b + T_t - 2T_m)}{h^2} \quad (2.11)$$

Sendo  $T_t$  a temperatura de topo da placa ( $z = h$ ),  $T_m$  a temperatura do meio da placa ( $z = h/2$ ),  $T_b$  é a temperatura da base da placa ( $z = 0$ ) e h a espessura da placa.

O cálculo das tensões totais ( $\sigma^T$ ), axial ( $\sigma^A$ ), linear ( $\sigma^L$ ) e as componentes auto equilibrantes ( $\sigma^S$ ), têm sido desenvolvidas e apresentadas por diversos pesquisadores, entre eles Choubane e Tia (1995), Mohamed e Hansen (1997) e Ioannides e Khazanovich (1998).

Baseado na distribuição de T(z) a tensão  $\sigma^T$  pode ser calculada como:

$$\sigma^T = \frac{E\alpha T(z)}{1-\nu} \quad (2.12)$$

A tensão axial média pode ser calculada por meio da equação 2.13:

$$\sigma^A = \frac{E\alpha}{h} \int_0^h \frac{T(z)}{(1-\nu)} dz \quad (2.13)$$

Considerando T(z) na forma da Equação 2.8 e substituindo na Equação 2.13, obtem-se:

$$\sigma^A = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[ A + \frac{Bh}{2} + \frac{Ch^2}{3} \right] \quad (2.14)$$

O próximo passo é resolver o momento linear (fletor),  $M_L$ , equivalente a um  $\Delta T$ , definido abaixo:

$$\begin{aligned} M_L &= \int_0^h (\sigma^T - \sigma^A) z dz \\ &= \frac{E\alpha}{1-\nu} \int_0^h \left[ (A + Bz + Cz^2) - \left( A + \frac{Bh}{2} + \frac{Ch^2}{3} \right) \right] z dz \end{aligned} \quad (2.15)$$

A integração da equação 2.13 em toda a espessura da placa, h, resulta em:

$$M_L = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left( \frac{Bh^3}{12} + \frac{Ch^4}{12} \right) \quad (2.16)$$

A componente  $\sigma^L$  agora ser resolvido pela seguinte expressão:

$$\sigma^L = \frac{Mc}{I} = \frac{M_L(z - h/2)}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[ B(z - h/2) + Ch(z - h/2) \right] \quad (2.17)$$

A tensão auto equilibrante,  $\sigma^S$ , corresponde à tensão térmica que acontece na espessura da placa de concreto, podendo afetar significativamente a magnitude das tensões de tração e a localização crítica (Hiller e Roesler, 2010). Para encontrar a,  $\sigma^S$ , de temperatura as funções linear e axial devem ser subtraídas da função de  $\sigma^T$ .

$$\sigma^S = \sigma^T - (\sigma^L + \sigma^A) \quad (2.18)$$

Logo,

$$\sigma^S = C \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[ z^2 - hz + \frac{h^2}{6} \right] \quad (2.19)$$

É importante comentar que a componente  $\sigma^S$  (temperatura não linear) não provoca uma flexão ou expansão na placa mas distorce a seção transversal da placa (Khazanovich, 1994; Iaonnides e Khazanovich, 1998).

### 2.1.5 Conceito de NOLA

De acordo com Hiller (2007), o conceito de área não linear (*Nonlinear Area* - NOLA) foi proposto para capturar o efeito da não linearidade da temperatura em pavimentos rígidos, sendo definido como a área entre o perfil de temperatura linear e o não linear. O perfil de temperatura linear corresponde à ligação da  $T_t$  e  $T_b$  da placa. Matematicamente, o NOLA pode ser expresso pela Equação 2.20, onde a base da placa é definida como  $z = 0$  (Hiller e Roesler, 2010).

$$NOLA = \int_h^0 [T(z) - T_{LIN}(z)] dz \quad (2.20)$$

Sendo  $T(z)$  o perfil de temperatura total e  $T_{LIN} = T_b + \Delta T \left( \frac{z}{h} \right)$ .

Já o perfil de temperatura não linear, assim como o perfil linear, corresponde à ligação das temperaturas de topo e na base da placa, entretanto passando pela temperatura do meio da placa; desse modo, a função apresentada se aproxima de uma função quadrática.

O NOLA será igual a zero, se o perfil de temperatura for verdadeiramente linear, significando que não existe tensões auto equilibrantes. O perfil de temperatura da Figura 2.7 mostra os valores do NOLA que podem ser calculados utilizando-se o método trapezoidal de integração.

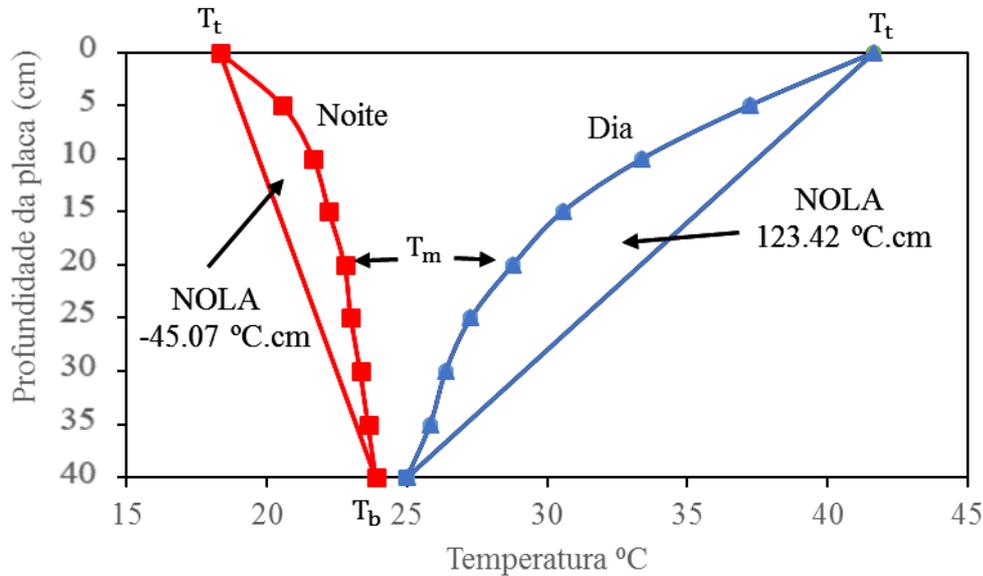


Figura 2.7 - Representação do NOLA para dois perfis de temperatura (noite e Dia).

O  $NOLA > 0$  resulta em uma  $\sigma^S$  de tração no topo e na base da placa, diferente do negativo que apresenta uma  $\sigma^S$  de compressão na parte superior e inferior da placa. Substituindo a Equação 2.6 e a  $T_{LIN}$  na Equação 2.20, encontra-se a o NOLA em função das  $T_t$ ,  $T_b$  e  $T_m$  (Equação 2.21).

$$NOLA = \int_h^0 \left[ \frac{4T_m - 3T_b - T_t}{h} z + \frac{2(T_b + T_t - 2T_m)}{h^2} z^2 - \frac{\Delta T}{h} z \right] dz \quad (2.21)$$

Realizando a integração no intervalo definido, encontra-se o valor do NOLA para qualquer ponto da placa, representada na Equação 2.22.

$$NOLA = \frac{T_t + T_b - 2T_m}{3} h \quad (2.22)$$

Para simplificar o problema, as tensões auto equilibrantes devem estar diretamente relacionadas à NOLA (Hiller e Roesler, 2010). A  $\sigma^S$  para um perfil de temperatura quadrático são dependentes do coeficiente C, como visto anteriormente na Equação 2.17. Relacionando a Equação 2.9 com a Equação 2.22 tem-se o coeficiente C, que está diretamente relacionado com a espessura da placa e ao NOLA conforme a Equação 2.23.

$$C = \frac{6NOLA}{h^3} \quad (2.23)$$

Substituindo a Equação 2.23 na Equação 2.17 para o equilíbrio de tensões sob um perfil de temperatura quadrática, tem-se como resultado uma relação direta entre NOLA e as  $\sigma^S$  a qualquer espessura da placa como visto na Equação 2.24, fornecendo a correlação para  $\sigma^S$  no topo ( $z= h$ ) ou na base ( $z= 0$ ) da placa, enquanto a equação 2.24 se aplica na espessura média da placa.

$$\sigma^S(z) = \frac{6NOLA}{h^3} \frac{E\alpha}{1-\nu} \left( z^2 - hz + \frac{h^2}{6} \right) \quad (2.24)$$

A Equação 2.25 fornece a correlação para  $\sigma^S$  no topo ( $z= h$ ) ou na base ( $z= 0$ ) da placa, enquanto a Equação 2.26 se aplica na espessura média da placa.

$$\sigma^S(h) = \sigma^S(0) = \frac{-NOLA}{h} \frac{E\alpha}{1-\nu} \quad (2.25)$$

$$\sigma^S\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{NOLA}{2h} \frac{E\alpha}{1-\nu} \quad (2.26)$$

### 3 METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a metodologia da modelagem numérica analisada, considerando parâmetros uniformes para os diferentes casos utilizados na pesquisa, baseados nos trabalhos de Severi, 2002; Hiller, 2007; Evangelista Jr e Roesler, 2009; e Raia, 2010. Quanto à validação dos resultados obtidos, foram comparados com Evangelista Jr e Roesler (2009).

#### 3.1 METODOLOGIA DA MODELAGEM NUMÉRICA

O programa ILLISLAB tem como parâmetro de entrada as propriedades que se correlacionem aos vetores denominados: base elástica da camada, forma de interação das juntas longitudinais e transversais, à geometria da placa, às propriedades dos materiais, aos carregamentos, à discretização da malha de elementos finitos e aos diferenciais térmicos.

Para a realização das simulações no programa ILLISLAB foi utilizado o MATLAB R2013a, que permite a utilização de rotinas e sub-rotinas internas no armazenamento dos resultados obtidos pelo ILLISLAB. O fluxograma descreve o processo completo para realização das análises, que são divididas em quatro etapas, conforme a Figura 3.1.

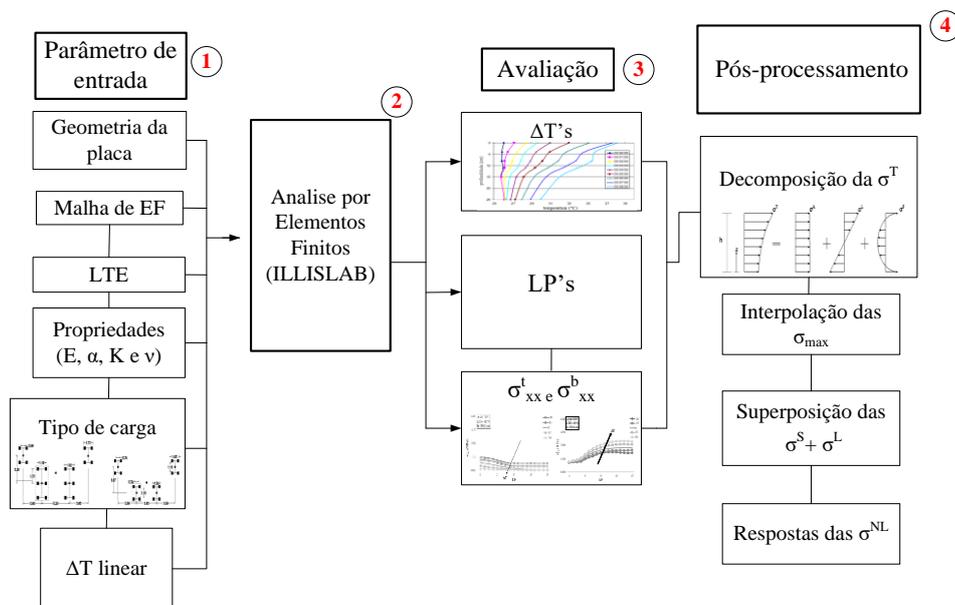


Figura 3.1- Fluxograma da metodologia da modelagem numérica.

Na primeira etapa, são apresentados os parâmetros de entrada, que constitui as variáveis do *Input* do programa. Em seguida, na segunda etapa, é realizada uma análise por elementos finitos através do programa ILLISLAB. Na terceira, com os resultados dessas análises, são feitas avaliações referentes aos diferenciais térmicos ( $\Delta T$ 's), nas tensões de tração no topo e na base da placa na direção x,  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$ , respectivamente, com as linhas de passagem (LP). E por fim, é feita decomposição dos  $\Delta T$ 's, a interpolação das tensões máximas ( $\sigma_{max}$ ), superposição dos acréscimos de tensões auto equilibrantes ( $\sigma^S$ ) e tensões lineares ( $\sigma^L$ ), culminando nas tensões não lineares ( $\sigma^{NL}$ ).

### 3.1.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O ILLISLAB permite a simulação numérica das provas de cargas, variando a temperatura linear e não linear, o módulo de elasticidade do concreto, o módulo de reação do subleito, pressão dos pneus e o incremento de carga. A fim de otimizar os resultados obtidos, utilizou-se o MATLAB, com intuito de variar os dados de entrada (*Input*) e organizar os de saída (*Output*).

O ILLISLAB foi desenvolvido pela Universidade Illinois em Urbana – Champaign. Inicialmente coordenado pelo Prof. Dr. Ernest Barenberg, o programa passou por diversas revisões e modificações. Primeiramente essas modificações foram desenvolvidas pela empresa ERES em conjunto com a Universidade, e assim o programa se transformou no ILSL2 (Khazanovich, 1994 e Khazanovich *et al*, 2000). Posteriormente ocorreram novas modificações realizadas pela Universidade, culminando no ISLAB2000 e em seguida no ISLAB2005, mantendo a maioria dos conceitos e aproximações incorporados no ILSL2.

O programa é fundamentado num modelo estático capaz de computar as respostas do pavimento de concreto sob qualquer configuração de eixos, que aplica uma carga distribuída sobre uma superfície de contato (pneu/pavimento) para uma distribuição de temperatura definida por uma série de pares de entrada (espessura, temperatura) computadas pelo programa de elementos finitos ILLISLAB (Ioannides e Khazanovich, 1998).

O programa pode calcular os níveis de tensões em pavimentos rígidos para uma variedade de parâmetros de entrada (posição do eixo, níveis de carga do eixo, várias placas, tensões, etc) e, portanto, é uma poderosa ferramenta para a realização combinada de temperatura e

mecânica dos pavimentos (Hiller, 2007; Hiller e Roesler, 2010). O ILLISLAB é aplicado em elemento de placa retangular, com quatro pontos nodais e doze graus de liberdade, sendo utilizado um subleito líquido denso (Winkler), representado por molas de rigidez constante e independentes entre si como mostra na Figura 2.3.

O ILLISLAB utiliza um vetor equivalente de cargas de trabalhos e vários tipos de transferência de cargas, tais como armaduras de ligação e de transferência, agregado ou uma combinação, que podem ser consideradas nas juntas transversais e longitudinais do pavimento (inclusive em acostamentos). O modelo também pode acomodar o efeito de uma base estabilizada ou em sobreposição, com perfeita ligação ou não, e a possibilidade de indicar áreas da placa em que não está em contato com subleito (Colim, 2009 e Mu e Vandenbossche, 2016).

### 3.1.2 Discretização do modelo

No modelo foram utilizadas 16 placas de comprimentos  $L_x \times L_y$  m com as espessuras (h) conforme a Tabela 3.1. Inicialmente foi adotada uma malha uniforme de 14.400 elementos para a discretização do conjunto de placas. Diante deste contexto, optou-se pela redução do sistema de malhas para 6.016 nós e um aumento na disposição dos carregamentos, para proporcionar a redução do tempo computacional conforme a Figura 3.2a. As malhas geradas nas áreas mais afastadas dos pontos de aplicação de carregamento são discretizadas com elementos finitos maiores, causando uma redução nos graus de liberdade da estrutura.

Tabela 3.1- Geometria das placas carregadas.

$L_x$ (m)	$L_y$ (m)	h (cm)
		25
7.62	7.62	40.6
		50.8

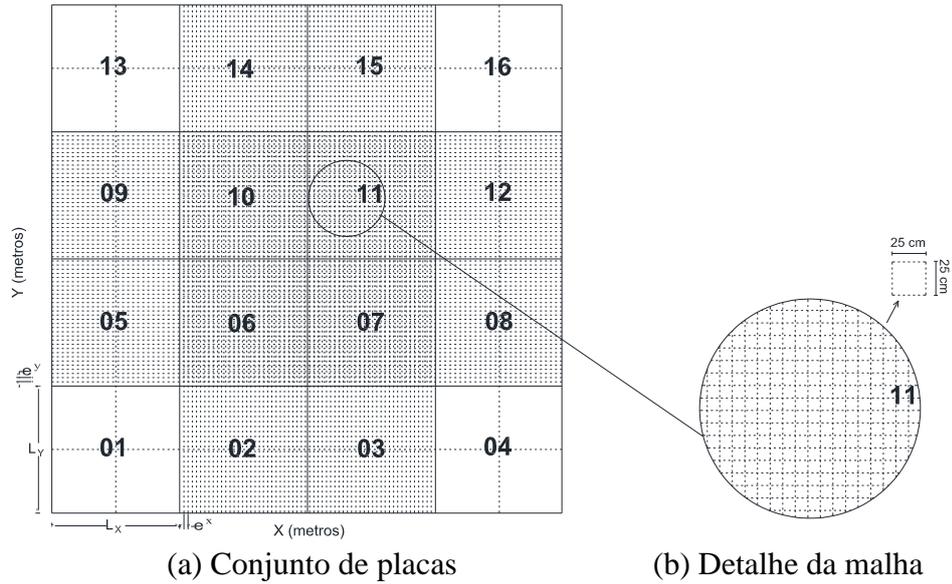


Figura 3.2- Discretização da malha nas dezesseis placas, a) e b).

Para incorporar os efeitos de transferência de carga nas placas adjacentes através da LTE, a malha de elementos finitos (x e y em metros) permite a coleta de dados para os nós em cada 25 cm independentemente da posição do carregamento, conforme a Figura 3.2b. As placas centrais (6, 7, 10 e 11) foram escolhidas por estarem localizadas entre dezesseis placas, possuindo assim uma transferência de carregamento nas quatro bordas. Devido à simetria do problema, foi escolhida a placa 11 (P11) como modelo em todas as análises do problema proposto como mostra na Figura 3.2.

As análises geradas numericamente foram realizadas através das variações dos valores de LTE e do carregamento. Assim, apenas o intertravamento entre os agregados em faces serradas de placas vizinhas conforme a Figura 3.3.

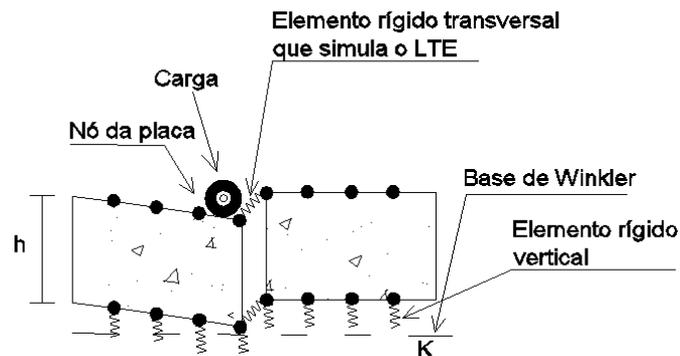


Figura 3.3- Transferência de carregamento entre placas com LTE 0%.

A Figura 3.3 mostra a metodologia adotada para LTE através das juntas transversais e longitudinais, considerando como transferência de carga de tensão de 0 e 85% de LTE para ambas as direções (Evangelista Jr e Roesler, 2009). O ILLISLAB considera a transferência de carga entre as placas adjacentes com a implementação de molas lineares que ligam os elementos de placa contíguas através das juntas.

### 3.1.3 Propriedades dos Materiais

Neste estudo, cinco variáveis do pavimento de concreto serão analisadas por uma análise numérica. A Tabela 3.2 lista os casos alisados e os parâmetros utilizados para executar o método empregado para as análises, sendo eles: módulo de elasticidade do material (E), módulo de reação do subleito (k), coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e peso específico ( $\gamma$ ).

Tabela 3.2- Especificação dos casos analisados.

Casos	Tipo	Espessura (cm)	LTE (%)	E [MPa (psi)]	k [MPa/m. (psi"/)]	$\alpha$ 1/°C (1/°F)	$\nu$	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> (lb/in <sup>3</sup> )]
A380 e B747	TPC	25	0 85	3.10E+4 (4.50E+06)	13.6 (50)	5.0E-06 (9.0E-06)	0.15	2408.15 (0.087)
A380 e B747	TPC e TPP	40.6	0 85	3.10E+4 (4.50E+06)	40.7 (150)	5.0E-06 (9.0E-06)	0.15	2408.15 (0.087)
A380 e B747	TPC e TPP	50.8	0 85	3.10E+4 (4.50E+06)	13.6 (50)	5.0E-06 (9.0E-06)	0.15	2408.15 (0.087)

### 3.1.4 Carregamento

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de aeronaves A380 e B747, analisando os trens de pouso completo (TPC) e os trens de pouso principal (TPP) de cada aeronave com a variação da LTE. Dessa forma, apresentam-se, nessa seção, os carregamentos utilizados como mostra a Tabela 3.3

Tabela 3.3- Tipo de trens de pouso e LTE utilizados.

Aeronave	LTE (%)	TIPO
A380	85	TPC
		TPP
	0	TPC
		TPP
B747	85	TPC
		TPP
	0	TPC
		TPP

Os dados a seguir foram considerados constantes para todos os casos analisados.

Pressão de contato dos pneus:  $\rho = 200$  psi (1.38 MPa);

Geometria dos pneus: comprimento= largura = 15” (0.38 m); e

Carga por pneu:  $P = 45,000$  lb (20,430 kgf).

Na prática, as cargas das rodas têm as mesmas configurações de trens de pouso para diferentes aeronaves. Contudo, essas variações resultariam num aumento simultâneo (ou diminuição) na magnitude das tensões críticas de tração no topo e na base, o que não prejudicaria a relação de tensões de topo para base e as análises térmicas, a qual terá uma proporcionalidade nas tensões. A seguir, são explicados os detalhes dos trens de pouso das aeronaves B747 e A380.

### **B-747**

Projetado e produzido pela companhia norte-americana Boeing em 1969, o Boeing 747 (Jumbo) é de larga fuselagem e longo alcance. O B747 é uma aeronave usada no âmbito civil e militar para transporte de passageiros e de carga, como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4- Boeing 747 (Air Journal, 2016).

### A-380

O Airbus A380 foi projetado em 2005, sendo o maior e mais pesado avião de passageiros do mundo. O A 380 inaugurou uma nova era de transporte aéreo para as operadoras, sendo utilizado para reduzir o número de voos e minoração de custos para os usuários, de acordo com a Figura 3.5.



Figura 3.5- Airbus A380 (Air Journal, 2016).

A Figura 3.6 ilustra as dimensões e espaçamento dos trens de pouso principais (TPP) que estão cercados com uma caixa pontilhada e os trens de pouso completo (TPC) de cada aeronave. As dimensões para o A380 foram extraídas de Fabre *et al* (2005); sobre a aeronave Boeing, foram extraídas diretamente do site da empresa (Boeing, 2016).

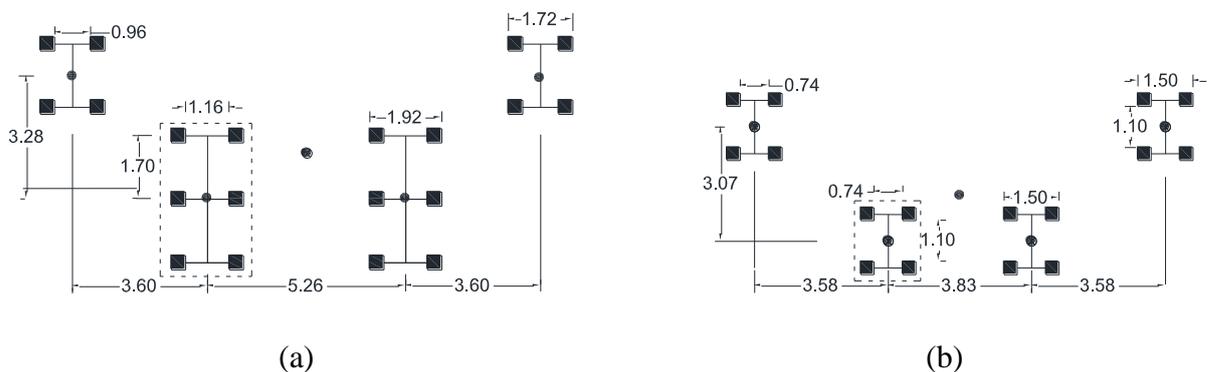


Figura 3.6- Dimensões dos trens de pouso completo (TPC); (a) A-380 e (b) B-747. O TPP é configuração com linhas tracejadas. As dimensões são em metros.

O centro de gravidade (CG) na Figura 3.7 representa a disposição do carregamento na placa 11 para os TPCs e TPPs do A380 e B747, onde CG varia 0.25 m ao longo da junta transversal e 0.38m na junta longitudinal.

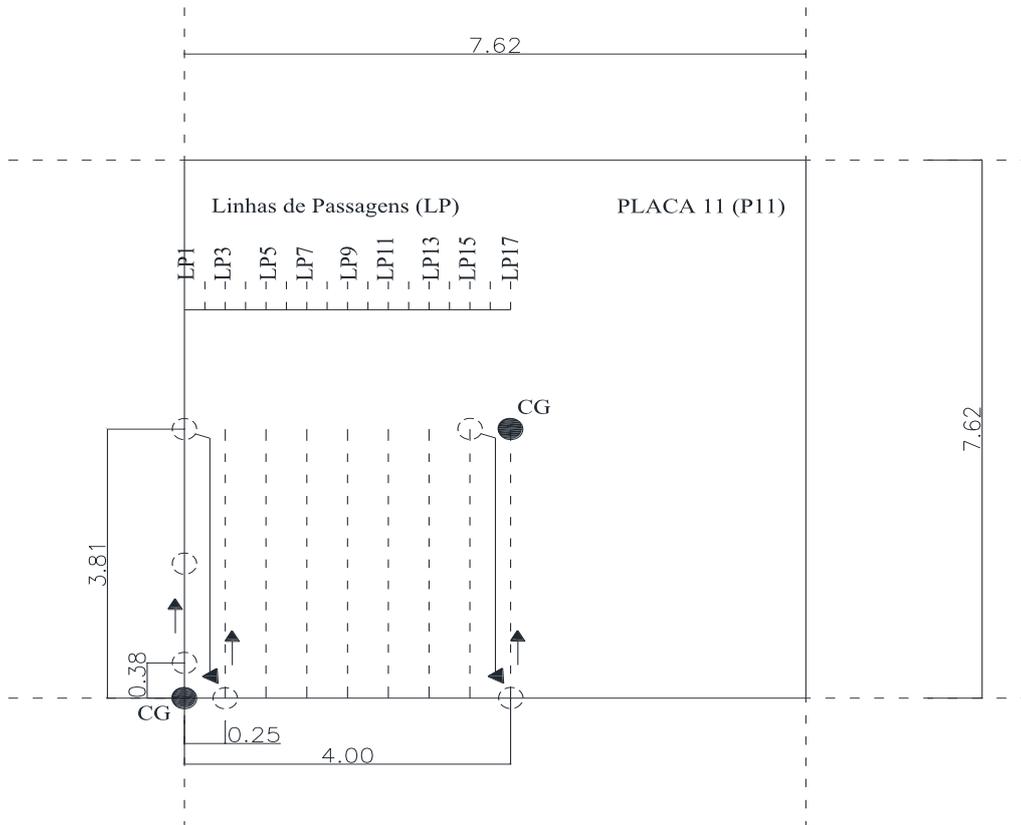
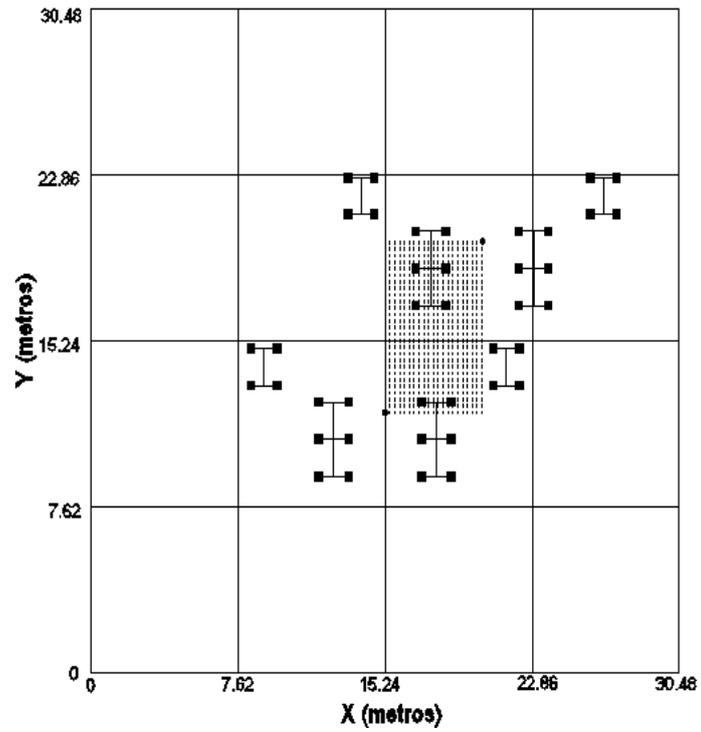
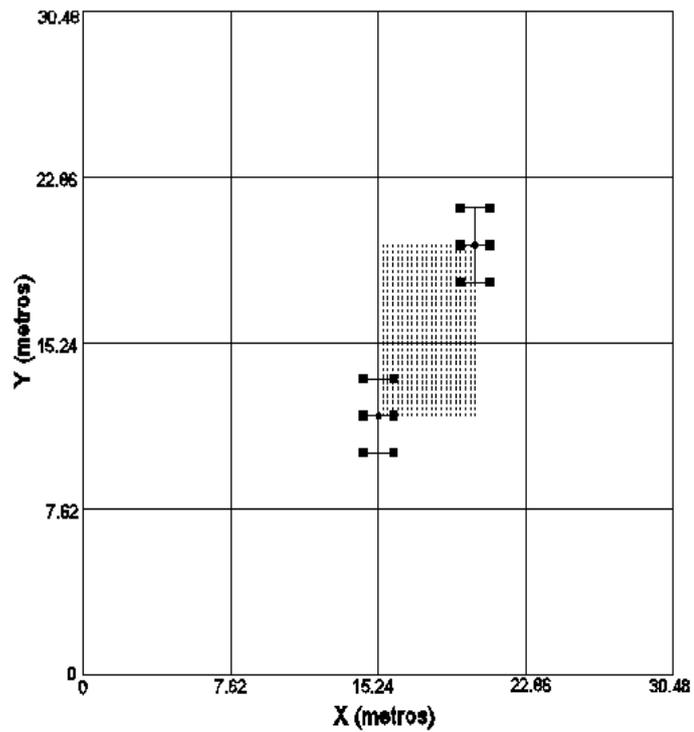


Figura 3.7- Distribuição do centro de gravidade (CG) de carregamento nas aeronaves A380 e B747, TPP e TPC. As dimensões são em metro.

Nas Figura 3.8 e na Figura 3.9 tem-se as posições das simulações das aeronaves A380 e B747 para os TPP e TPC, respectivamente. Os trens de pouso foram posicionados através das juntas transversais e longitudinais para determinar qual posição seria a tensão crítica na parte superior e inferior da placa de concreto.

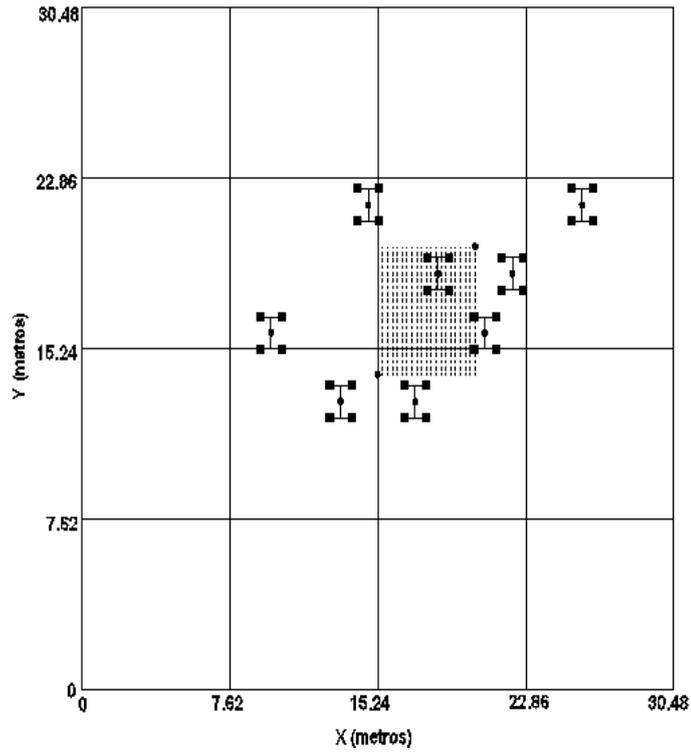


(a)

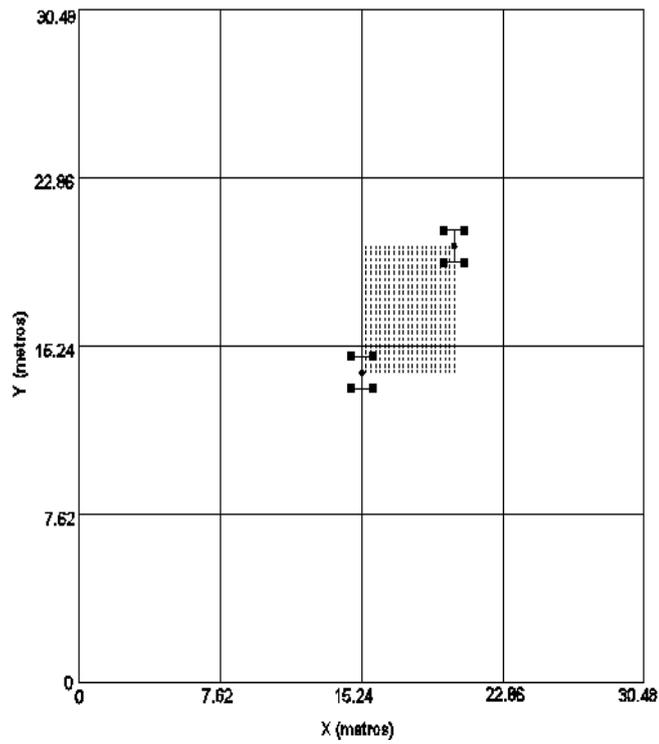


(b)

Figura 3.8- Posições do primeiro e do último carregamento de todos os centros de gravidades (CGs); A380 (a) TPC e (b) TPP.



(a)



(b)

Figura 3.9- Posições do primeiro e do último carregamento de todos os centros de gravidades (CGs); B747 (a) TPC e (b) TPP.

### 3.2 DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURAS ANALISADAS

As temperaturas utilizadas para as simulações numéricas dos diferenciais térmicos ( $\Delta T$ ) nas placas de concreto foram obtidas experimentalmente por Severi (2002) e laboratorialmente por Raia (2010), ambas na cidade de São Paulo. Severi (2002) e Raia (2010) apresentam duas situações para a realização das análises: a primeira refere-se a um dia quente e ensolarado e a segunda apresenta uma múltipla inversão, um dia de sol com chuva intensa.

Em seu trabalho, Raia (2010) realizou comparações das distribuições de temperatura de um pavimento com espessura de 15 cm, com as encontradas por Severi (2002) que utilizou um pavimento com 25 cm. Concluiu que as distribuições de temperatura em ambas as espessuras são semelhantes, como demonstrado na Figura 3.10 a 3.12. Nesse trabalho, partindo-se desta premissa, foram realizadas diversas simulações com espessuras de pavimentos diferentes, sendo de 25, 40.6 e 50.8 cm com a mesma distribuição de temperatura encontrada por Severi (2002).

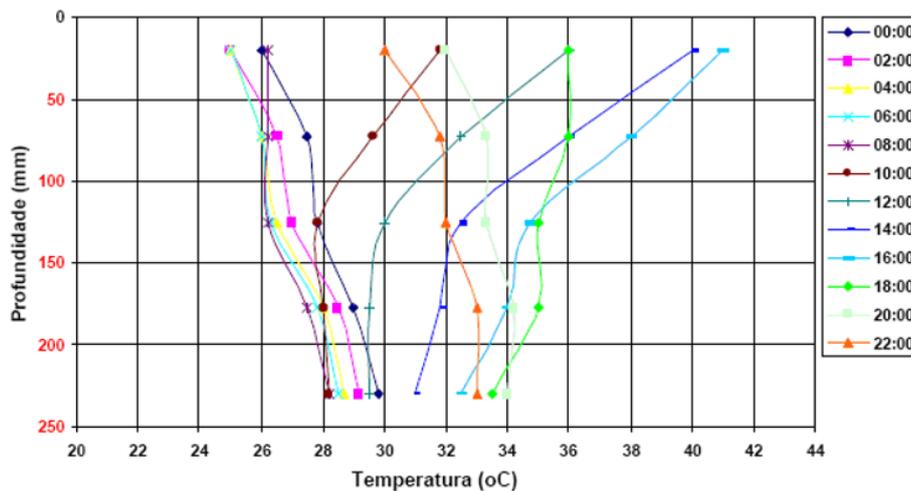


Figura 3.10- Comportamento da temperatura em um dia ensolarado (Adaptado e modificado por Raia (2010) a partir dos dados de Severi (2002) de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo)

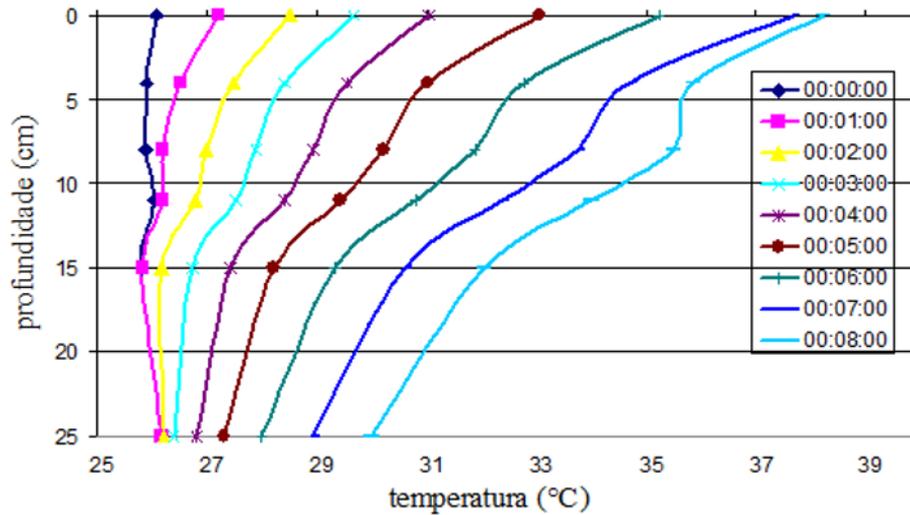


Figura 3.11- Simulação de um dia ensolarado de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo (Raia, 2010).

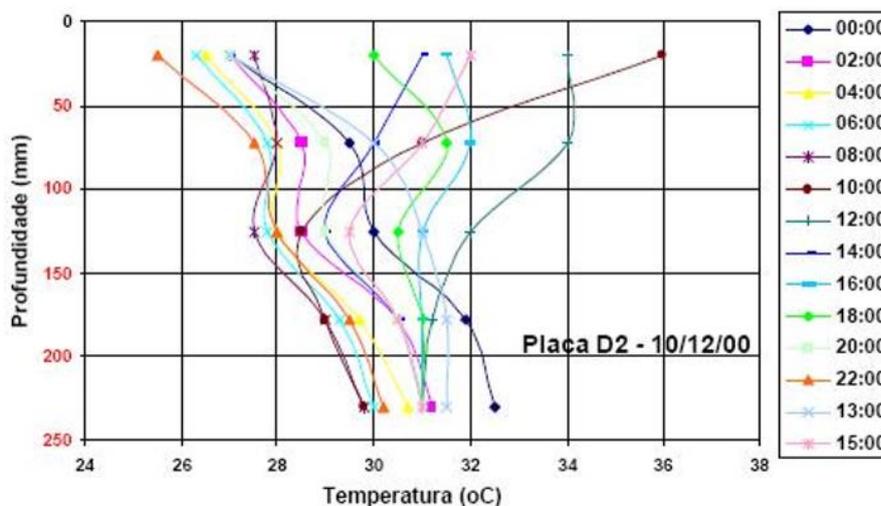


Figura 3.12- Dia quente com chuva no período de temperaturas medidas em pavimentos de concreto na cidade de São Paulo (Raia, 2010)

### Sacramento

Já Hiller (2007 e 2010) utilizou os dados informados pelo *Enhanced Integrated Climatic Model* – EICM, os diferenciais térmicos de 0,  $\pm 15$  e  $\pm 30$  °F, que correspondem respectivamente a 0,  $\pm 8.3$ ,  $\pm 16.6$  °C, simulando os gradientes mais incidentes nas cidades de: Los Angeles, Daggett, San Francisco, Sacramento, Arcata e Reno, NV. Os diferenciais de temperatura utilizados foram os da cidade de Sacramento capital da Califórnia

Na medida em que a temperatura é um parâmetro de relevância, foi elaborado no modelo, um plano de simulação, a partir das informações dos diferenciais de temperaturas ( $\Delta T$ ). O plano elaborado de simulação conta com a caracterização dos parâmetros de entrada no ILLISLAB citado no item 3.1.3 e os  $\Delta T$ 's.

Diante dessas informações, foram analisadas as dezesseis placas mencionadas no item 3.1.4. Foram analisadas também diversas variações do gradiente de temperatura em cenários reais do  $\Delta T$  e panoramas que não acontecem sazonalmente. O fluxograma da Figura 3.13, mostra a modelagem numérica empregada para a solução dos casos estudados na pesquisa.

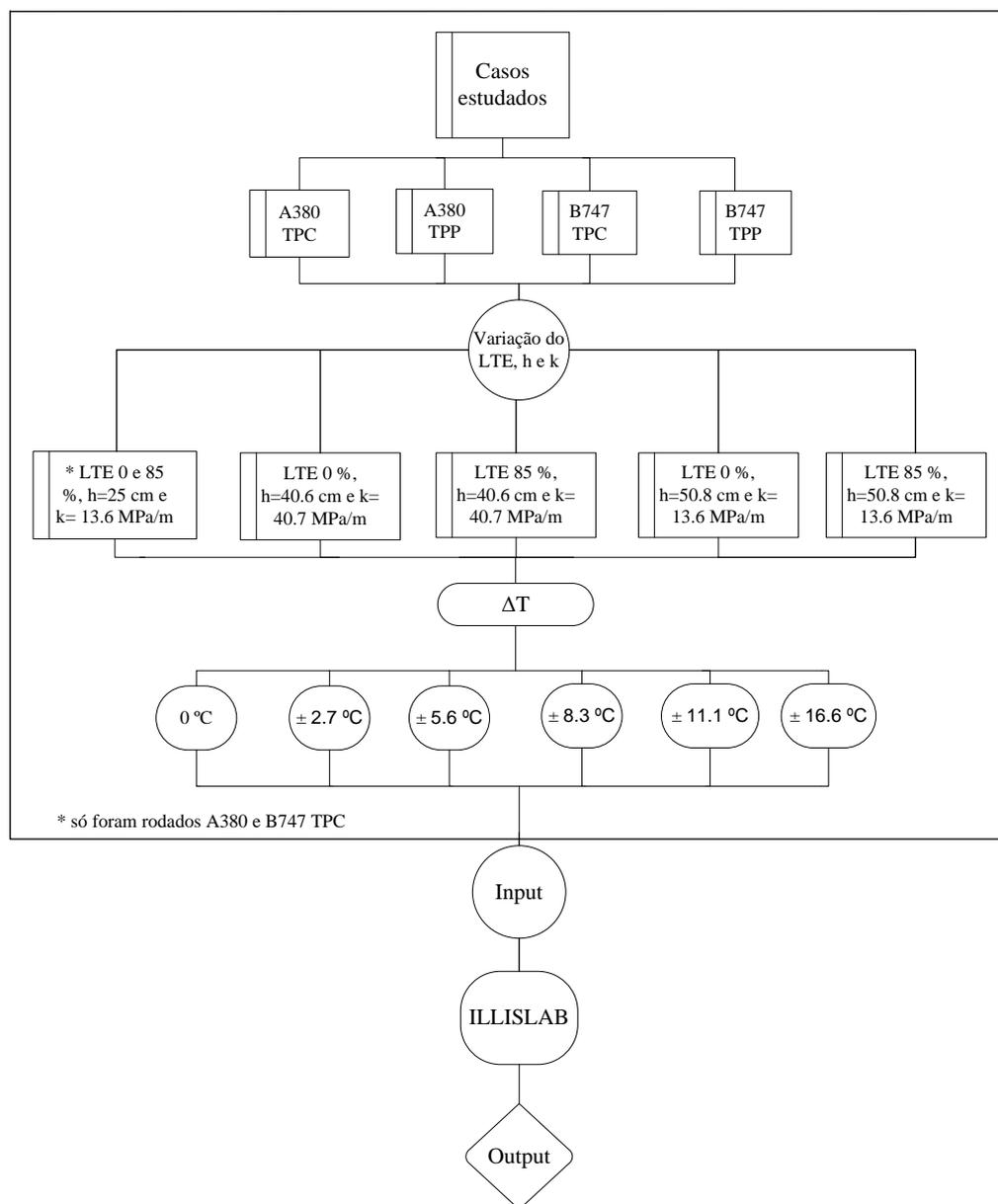


Figura 3.13- Combinações de dados para análise de resultados no ILLISLAB.

### 3.2.1 Caracterização da distribuição de temperatura não linear

As temperaturas obtidas por Severi (2002) foram utilizadas para caracterizar o nível de temperatura não linear. O valor do NOLA (área não linear) permite que o nível de não linearidade seja expresso em uma única variável. Portanto, foi utilizado um modelo de dois parâmetros para caracterizar o nível de não linearidade para os perfis de temperatura das cidades de São Paulo e Sacramento, que utiliza tanto o valor do NOLA como a diferença de temperatura do topo e da base  $\Delta T$ , conforme os gráficos tridimensionais das Figura 3.14 e 3.15.

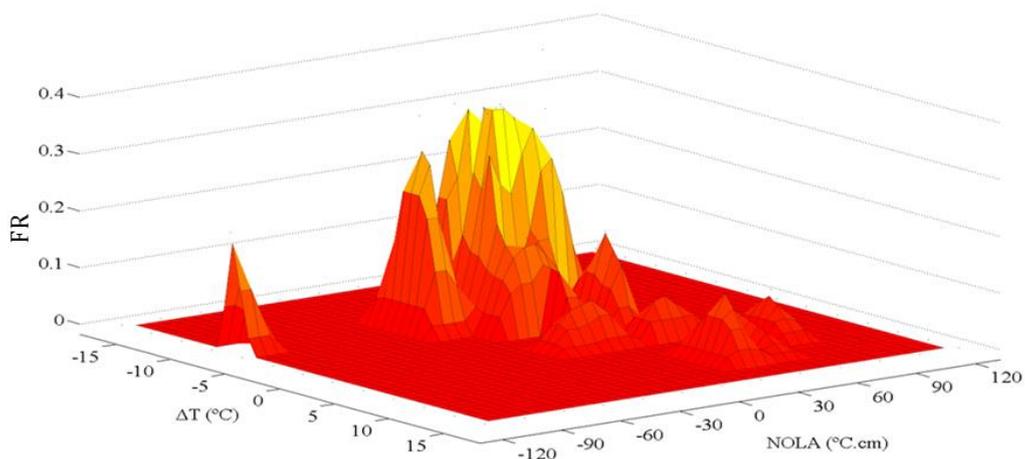


Figura 3.14- Frequência Relativa (FR) da relação do  $\Delta T$  com NOLA para a cidade São Paulo.

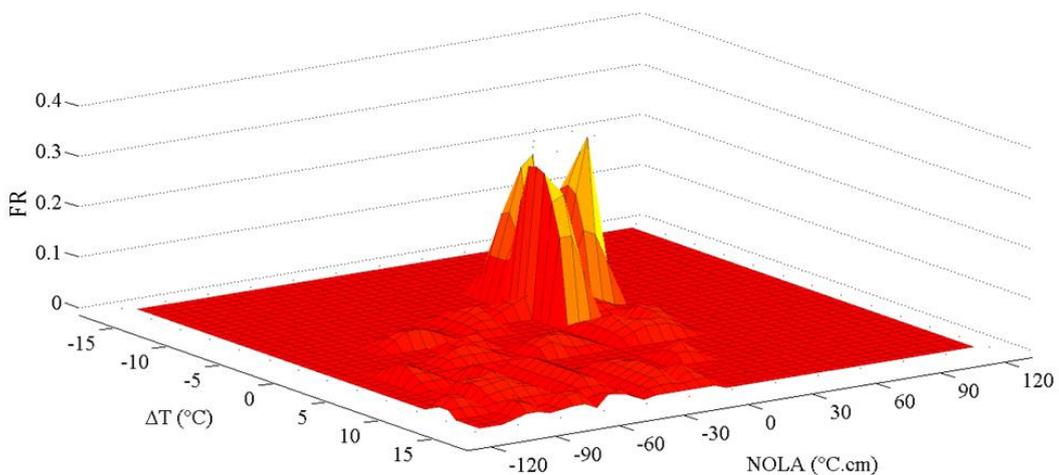


Figura 3.15- Frequência Relativa (FR) da relação do  $\Delta T$  com NOLA para a cidade Sacramento.

Os valores do NOLA pelo  $\Delta T$  real apresentam perfis de temperatura semelhantes, produzindo tensões auto equilibrantes equivalentes, bem como podem ser discretizados em conjunto, formando distribuições estatísticas para utilizar em análises de tensões térmicas em pavimento de concreto.

### 3.3 VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

A certificação dos resultados obtidos nas análises numéricas para o ILLISLAB, foi realizada através de uma comparação com os dados oriundos da literatura. O fluxograma na Figura 3.16, mostra a metodologia utilizada.

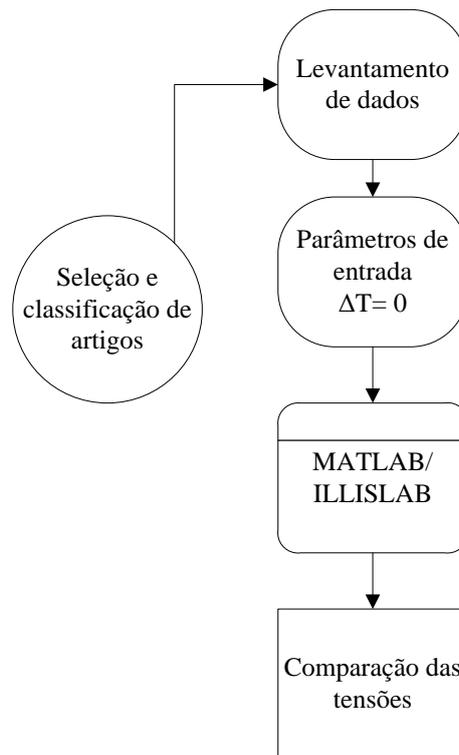


Figura 3.16- Explicação do processo de verificação das análises do ILLISLAB.

O trabalho analisado para a correlação foi o de Evangelista Jr e Roesler (2009), em que, por questões práticas, foram escolhidos dezesseis casos sem temperatura para a efetivação da verificação dos resultados. A relação entre a tensão do topo e da base da placa ( $\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b$ ) para cada tipo de trem de pouso foi computada como mostra a Tabela 3.4 para todas as aeronaves. Os resultados da relação ( $\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b$ ) comparam apenas os resultados de tração máxima (crítica) para cada aeronave independentemente. O  $L_x = L_y = 7.62$  m (300') como mostra na Tabela 3.4

Tabela 3.4- Comparação dos resultados da Razões entre as  $\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b$  encontradas com a da literatura, os números destacados em negrito indicam que a razão entre  $(\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b) > 1$ .

Aeronaves	Fator				Sem temperatura $\Delta T=0$	
	L	$\ell$	LTE	LC	Literatura	Encontrada
	[m. (")]	[m. (")]	(%)			
A-380	7.62 (300)	1.44 (57)	85	TPP	0.49	0.50
			0	TPP	0.68	0.71
		2.66 (89)	85	TPP	0.45	0.42
			0	TPP	0.62	0.64
		1.44 (57)	85	TPC	0.66	0.69
			0	TPC	0.95	0.92
		2.66 (89)	85	TPC	0.67	0.63
			0	TPC	<b>1.04</b>	<b>1.08</b>
B-747	7.62 (300)	1.44 (57)	85	TPP	0.48	0.47
			0	TPP	0.61	0.65
		2.66 (89)	85	TPP	0.41	0.39
			0	TPP	0.62	0.63
		1.44 (57)	85	TPC	0.56	0.53
			0	TPC	0.71	0.71
		2.66 (89)	85	TPC	0.51	0.50
			0	TPC	0.65	0.66

Na Tabela 3.4 mostram que os resultados encontrados são próximos ao da literatura, para diferentes configurações do A380 e B747 (TPC e TPP). As Razões entre as  $\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b$  destacadas em negrito mostram que a razão entre  $(\sigma_{xx}^t / \sigma_{xx}^b) > 1$ , resultando em possíveis fissuras no pavimento de concreto. Isto pode ocorrer em função da  $\sigma_{xx}^t > \sigma_{xx}^b$ .

## 4 RESULTADOS DE TENSÕES COM DIFERENCIAIS TÉRMICOS LINEARES

Neste capítulo serão apresentados os resultados utilizando o programa ILLISLAB a partir das simulações de variações térmicas lineares ocorridas no pavimento de concreto com a incidência de carga das aeronaves A380, B747 e com as configurações de trem de pouso TPC e TPP, conforme as fases 2 e 3 da Figura 3.1.

### 4.1 EFEITO DOS DIFERENCIAIS TÉRMICOS NAS DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES NAS PLACAS DE CONCRETO

No conjunto de dezesseis placas com a espessura de 50.8 cm e incidência de carga do TPC da aeronave A380, foram analisadas as tensões críticas para os diferenciais térmicos ( $0 \pm 16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Quando o  $\Delta T$  é igual a zero, as tensões de tração e compressão diminuem expressivamente, mostrando que o diferencial térmico influi diretamente nas tensões de tração e compressão da placa de concreto. Isto ocorre quando a temperatura está em equilíbrio térmico ( $T_t = T_b$ ). A Figura 4.1 apresenta o comportamento das tensões com LTE 85%, mostrando a interligação entre as interfaces dos agregados.

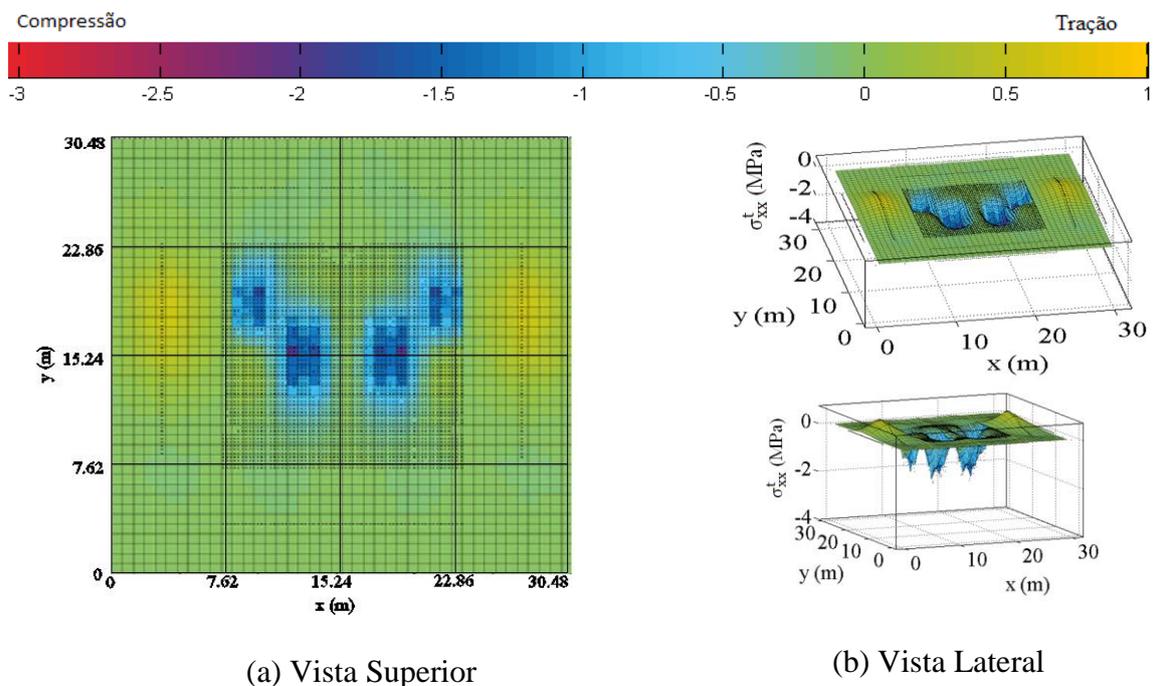


Figura 4.1- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , para A380 TPC, LTE 85 %,  $h = 50.8$  cm e  $k = 13.6 \text{ MPa/m}$ .

As  $\sigma_{xx}^t$  são maiores que  $\sigma_{yy}^t$  por estarem na direção do carregamento dos trens de pouso. Na Figura 4.1 ilustra a tensão de tração máxima na P11, que ocorre durante a primeira linha de passagem na junta transversal (eixo x). No conjunto de placas, as tensões máximas acontecem nos intervalos de 0.5 a 1 MPa, devido à ausência da interferência de agregado no contorno das placas. Isto ressalta que os valores de LTE com 85 % mostram-se eficientes, diminuindo as tensões de tração na flexão da placa que sofre a incidência de carga.

A Figura 4.2 mostra que no conjunto de placas as maiores tensões de tração acontecem na P11 na junta transversal (eixo x) quando se assume que a  $T_t < T_b$  ( $\Delta T < 0$ ), o que ocasiona uma expansão na base e uma contração no topo da placa.

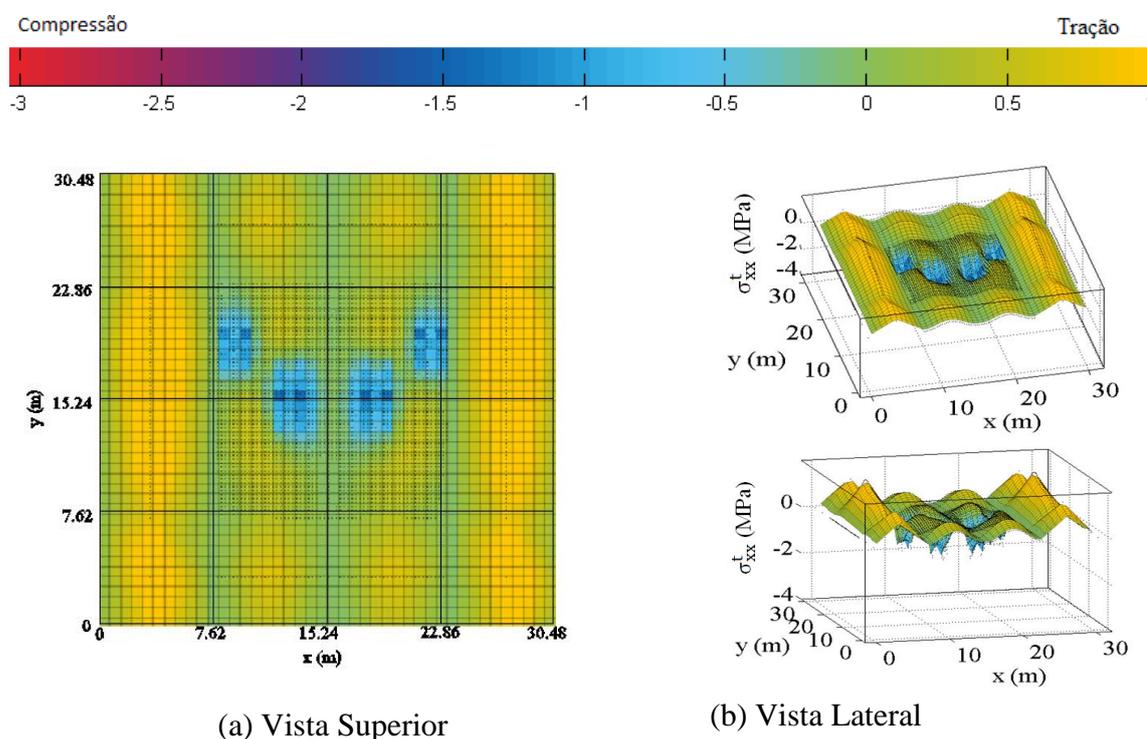


Figura 4.2- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T = -16.6$  °C, para A380 TPC, LTE 85 %,  $h = 50.8$  cm  $k = 13.6$  MPa/m..

Na Figura 4.2 percebe-se que, com o  $\Delta T < 0$  as tensões de tração de topo na direção x acontecem durante a LP6 da P11 em todo o conjunto das dezesseis placas, ficando evidente que as tensões críticas ocorrem nas juntas transversais onde estão alocados os carregamentos. Isso ocorre pelo fato de não existir nenhuma LTE.

A Figura 4.3 mostra que os comportamentos das tensões de tração decorrem nas juntas longitudinais em todo conjunto de placas, e nas transversais (eixo x) em seguida ao carregamento do A380 TPC.

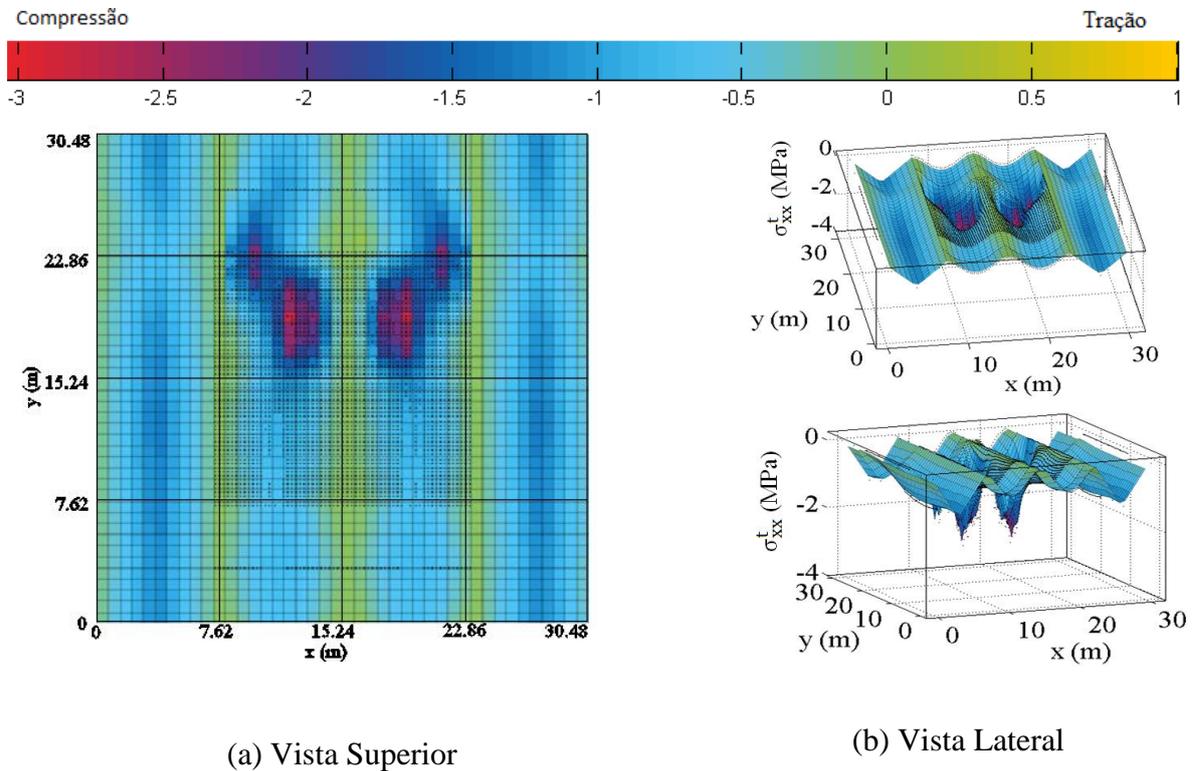


Figura 4.3- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T= 16.6\text{ }^\circ\text{C}$ , para A380 TPC, LTE 85 %,  $h= 50.8\text{ cm}$  e  $k= 13.6\text{ MPa/m}$ .

A Figura 4.4 representa a incidência da maior tensão em todas as linhas de passagem (LP) na placa P11, considerando o carregamento estático do TPC da aeronave A380, bem como a aplicação de onze variações de  $\Delta T$ 's. A placa analisada de concreto possui  $h = 40.6\text{ cm}$ , LTE 85% entre as placas, além de considerar todos os parâmetros constantes (módulo de elasticidade, e coeficiente e Poisson, coeficiente de espação térmica entre outros).

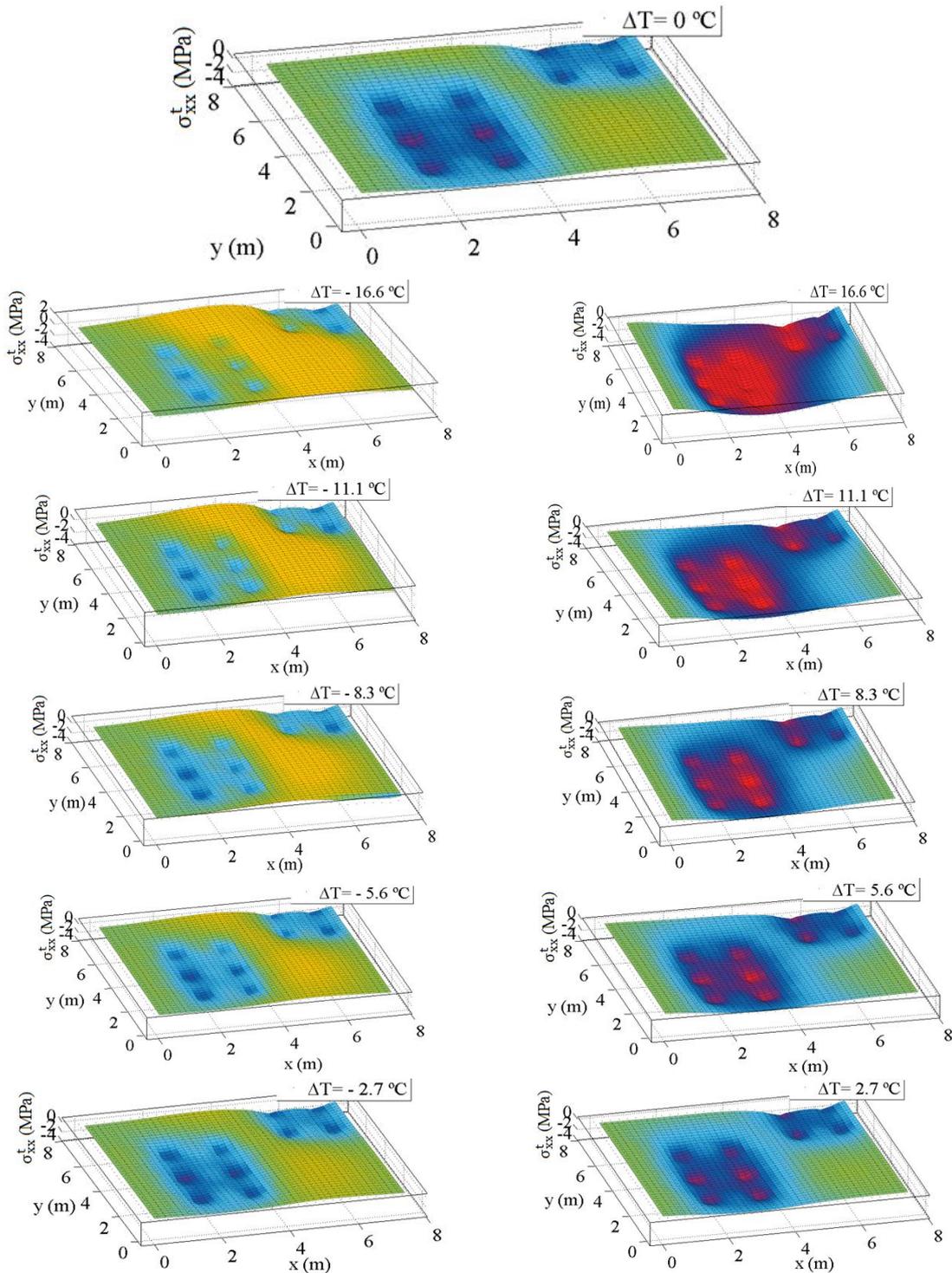
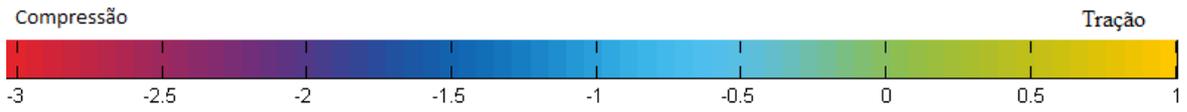


Figura 4.4- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  (P11) com incidência de carga A380 TPC, com variação dos gradientes, LTE 85%,  $h=40.6$  cm e  $k= 40.7$  MPa/m.

Na Figura 4.4, a única diferença entre as onze análises é o valor do diferencial térmico. No entanto, à medida que o  $\Delta T$  aumenta positivamente, as tensões de compressão de topo da placa ficam mais intensas. Isso acontece inversamente nos diferenciais térmicos negativos. Com os  $\Delta T$ 's positivos (2.7°, 5.6°, 8.3°, 11.1° e 16.6° C), as áreas de tensões críticas resultam em tensões mais ascendentes na placa. Um exemplo do A380 TPC e TPP, com LTE 0 e 85 %, e espessura de 40.6 e 50.8 cm são mostrados no Apêndice A.

## 4.2 SIMULAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURA

As simulações numéricas realizadas utilizam-se dos diferenciais térmicos lineares ( $\Delta T$ ) de 0,  $\pm 15$  e  $\pm 30$  °F. As análises numéricas do presente estudo mostram as influências dos  $\Delta T$ 's de 0,  $\pm 15$ ,  $\pm 30$  ° F (0,  $\pm 8.3$ ,  $\pm 16.6$  °C) nas tensões de tração de base na direção x ( $\sigma_{xx}^b$ ) e nas tensões de tração de topo na direção x ( $\sigma_{xx}^t$ ) na placa 11 (P11), que está submetida a um carregamento variável. Já a Figura 4.6 e a Figura 4.5 apresentam o comportamento das maiores tensões do TPC do A380.

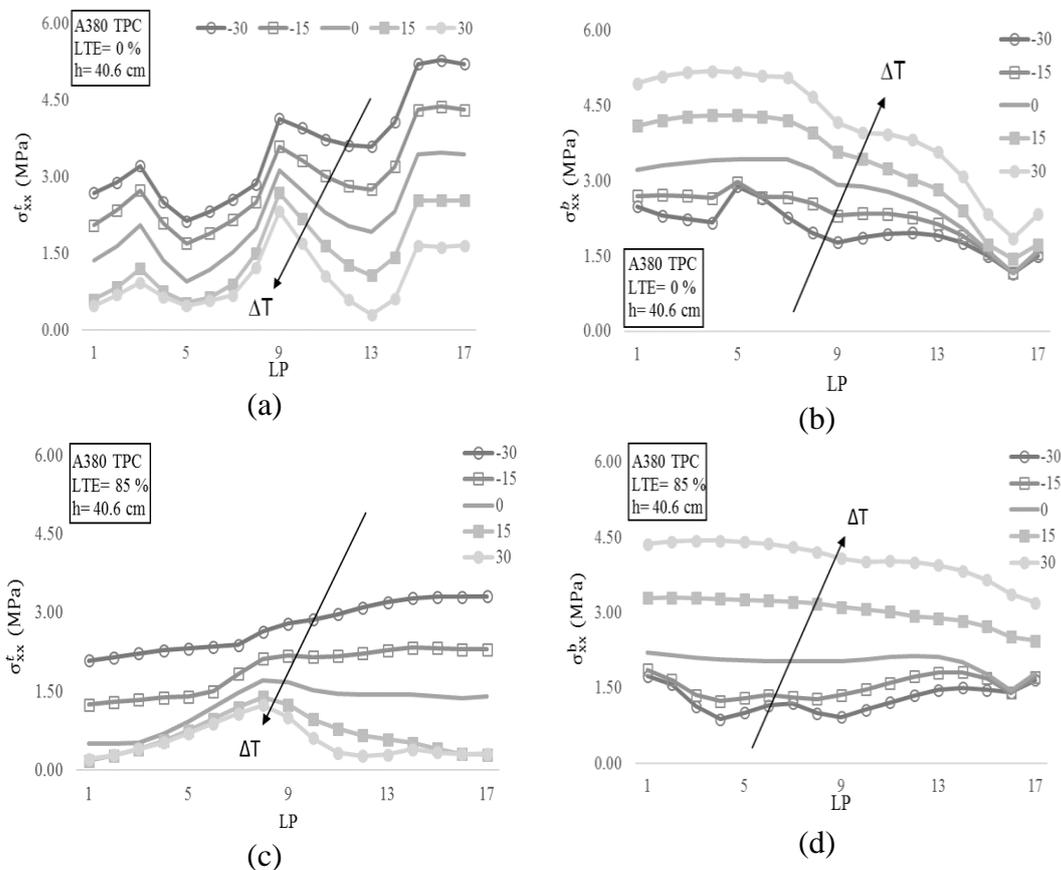


Figura 4.5- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC h=40.6 cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k=40.7$  MPa/m.

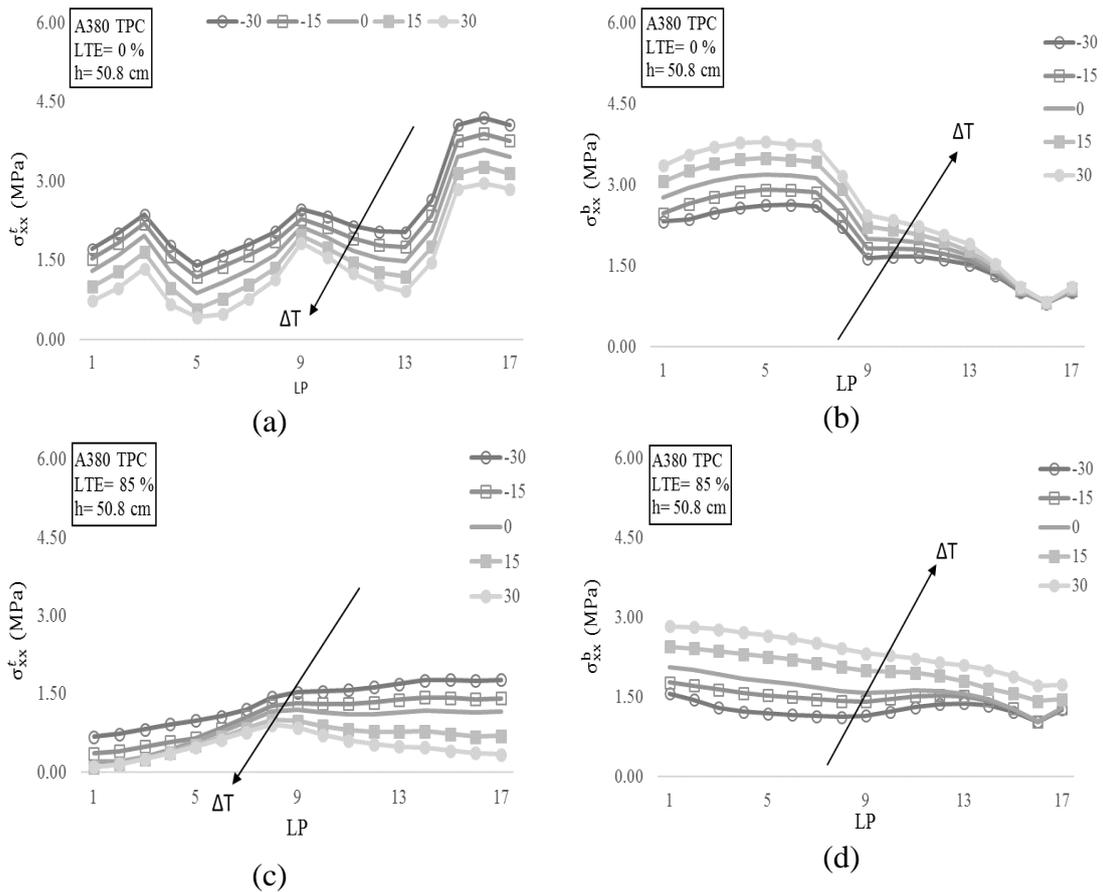


Figura 4.6- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC  $h= 50.8$  cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

Para as análises foram adotados os parâmetros citados na Tabela 3.2. As Linhas de passagens (LP's) percorrem a placa analisada (P11), iniciando na borda longitudinal esquerda (LP1) até o meio da placa (LP17), conforme a Figura 3.7. As LP's referem-se ao caminho de passagens do TPC/TPP nas placas.

Nas Figura 4.6 e Figura 4.5, observa-se que as maiores  $\sigma_{xx}^t$  ocorrem quando os  $\Delta T$ 's são negativos, enquanto para  $\sigma_{xx}^b$  os  $\Delta T$ 's são positivos. Quando adotado, a LTE 0 e 85% e as  $\sigma_{xx}^t$  acontecem no meio da P11, mais precisamente no decorrer da LP17. Enquanto isso, na  $\sigma_{xx}^b$  ocorrem próximo a borda da P11, durante a LP1a LP3. Em virtude disso, quanto maior a LTE, independente da espessura da placa, melhor é a eficiência de transferência de carregamento entre as placas e maiores serão as  $\sigma_{xx}^b$  próximo às bordas para os casos de TPC. Com as  $\sigma_{xx}^t$  o processo é inverso: quanto maior a LTE, maiores serão as possibilidades de ocorrer as tensões de tração durante as LP's próximas ao meio da placa.

A Figura 4.7 mostra o comportamento das tensões máximas nas LP' durante a passagem do carregamento da aeronave B747 com a configuração TPC, espessura da placa de concreto de 40.6 cm e uma variação de LTE de 0 e 85 %.

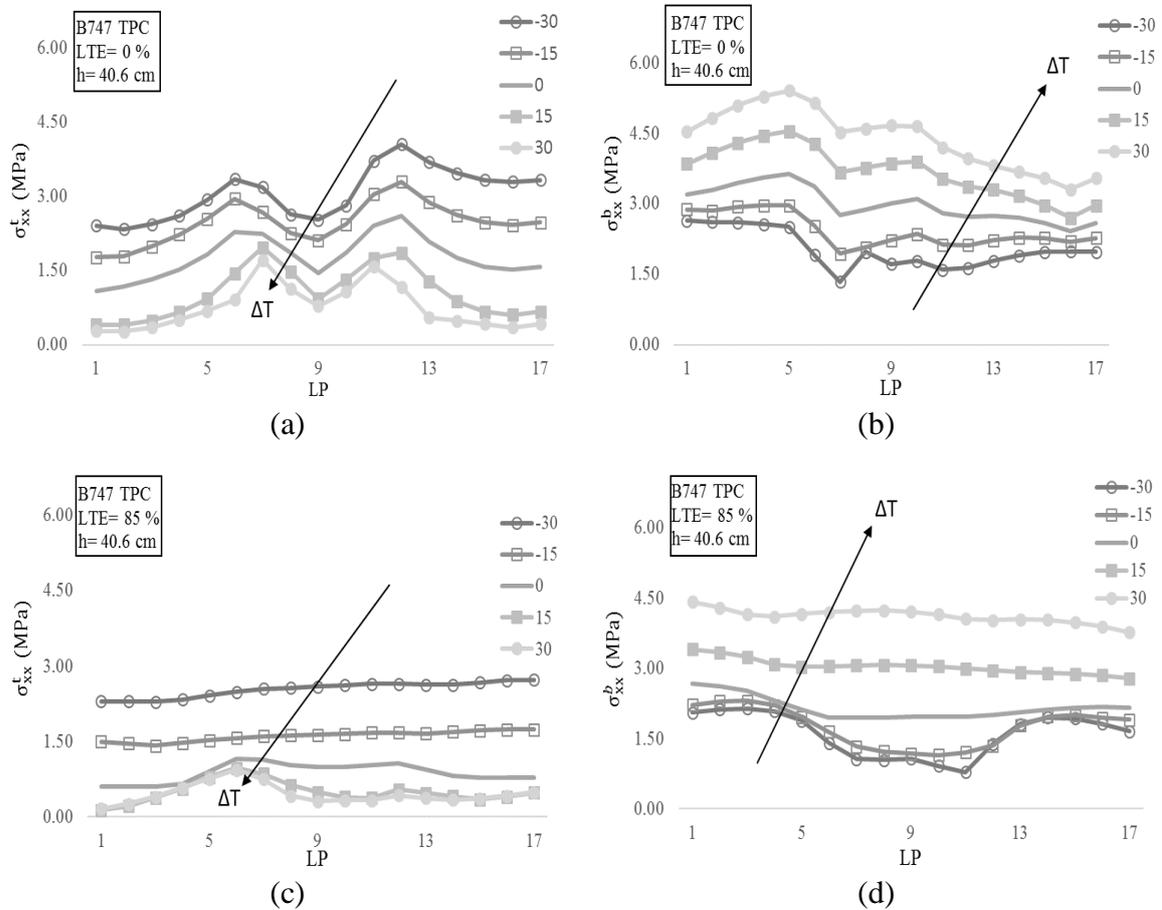


Figura 4.7- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC, h= 40.6 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 40.7$  MPa/m.

Na Figura 4.7 apresenta as tensões máximas de tração durante as LP's no topo e na base da placa de concreto. O comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  acontecem após a linha 12, para um LTE 0% e para um LTE 85% ocorre próximo ao meio da placa analisada (P11). Nas  $\sigma_{xx}^b$  máximas ocorrem durante as LP's próximas a borda da placa. A Figura 4.8 mostra o comportamento das tensões durante as LP's do B747 TPC, com espessura da placa de 50.8 cm e uma variação de LTE 0 e 85%.

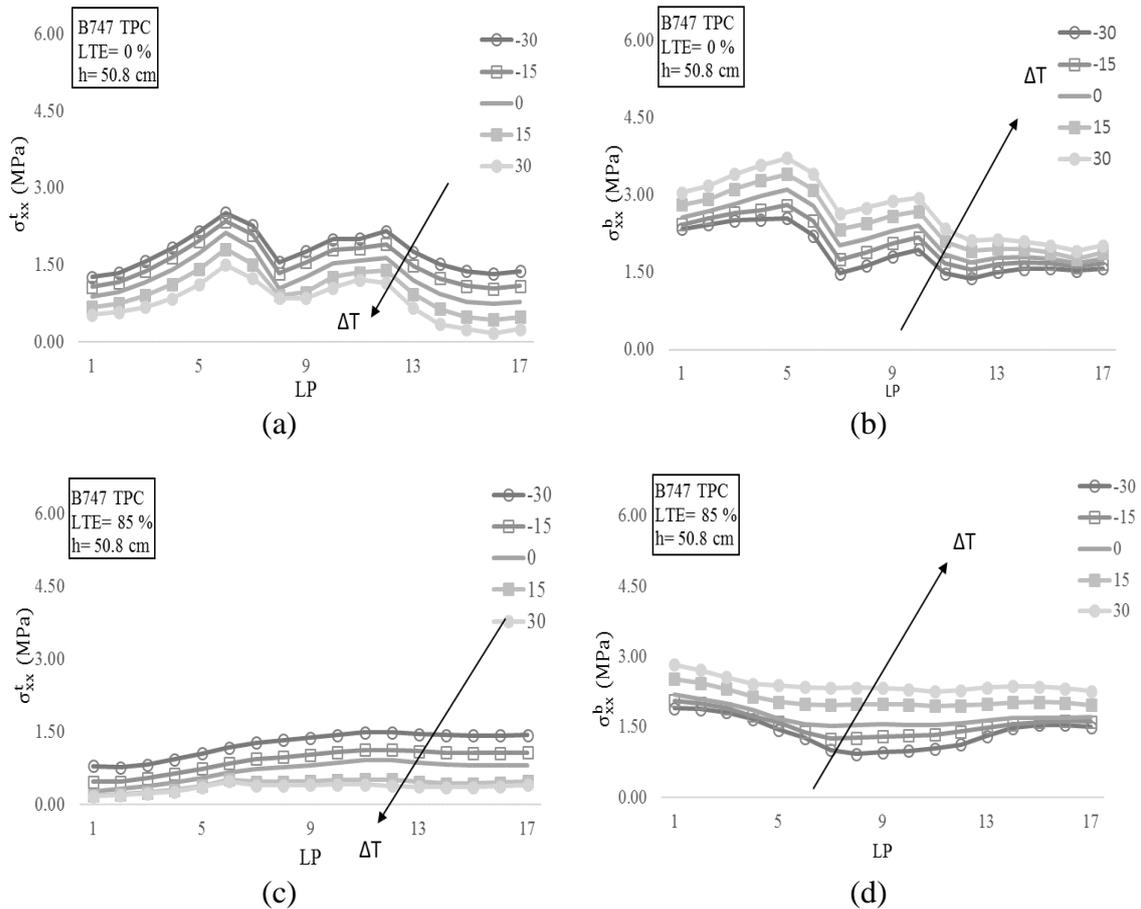


Figura 4.8- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC, h= 50.8 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

Na Figura 4.8 mostra que o comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  ocorrem durante a LP6 para um LTE de 0 % e para a LTE 85 % apresenta durante a LP 12. Para as  $\sigma_{xx}^b$  com LTE 0% apresenta durante a LP5, já para a LTE 85% ocorrem durante a LP1.

A Tabela 4.1 apresenta o resumo das tensões máximas das  $\sigma_{xx}^b$  e  $\sigma_{xx}^t$  para os TPC e TPP das aeronaves A380 e B747, variando a LTE e as espessuras. O Apêndice B ilustra o comportamento das tensões das aeronaves A380 e B747.

Tabela 4.1- Posições das LP's que induziram as  $\sigma_{xx}^b$  e  $\sigma_{xx}^t$  máximas para as aeronaves.

Aeronave	Tipo	LTE (em %)	h (cm)	$\sigma_{xx}^t$	$\sigma_{xx}^b$
				$\Delta T = -16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ Linhas de passagem (LP)	$\Delta T = 16.6 \text{ }^\circ\text{C}$
A380	TPC	0	50.8	17	5
			40.6	17	5
		85	50.8	17	1
			40.6	17	1
	TPP	0	50.8	5	17
			40.6	5	17
85		50.8	1	13	
		40.6	1	13	
B747	TPC	0	50.8	6	5
			40.6	12	5
		85	50.8	12	1
			40.6	12	1
	TPP	0	50.8	6	17
			40.6	6	17
		85	50.8	1	17
			40.6	1	17

Na Tabela 4.1 as maiores  $\sigma_{xx}^b$  acontecem quando o  $\Delta T = 16,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e para  $\sigma_{xx}^t$  ocorrem quando  $\Delta T = -16,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Diante deste contexto, observa-se que as maiores  $\sigma_{xx}^b$  para o TPC das aeronaves A380 e B747 com LTE 0 e 85% e espessuras 40.6 e 50.8 cm ocorrem na LP1 na junta longitudinal e a maioria das  $\sigma_{xx}^t$  ocorrem na LP17. As tensões críticas  $\sigma_{xx}^t$  para os dois casos de LTE e espessura do TPP das aeronaves A380 e B747 incidem na LP17, no meio da placa. Já  $\sigma_{xx}^t$  das aeronaves com LTE 0% incidem na LP5 e com LTE 85% ocorrem na LP1. Isto ocorre em função da LTE, quanto maior, melhor é a eficiência de transferências de carregamento entre as placas e menores serão as  $\sigma_{xx}^b$  próximo as bordas para os casos TPP. Com as  $\sigma_{xx}^t$  o processo é inverso: quanto maior LTE, maiores serão as tensões próximas as bordas.

## 5 RESULTADO DE TENSÕES COM DIFERENCIAIS TÉRMICOS NÃO LINEARES

Este capítulo dedica-se à avaliação analítica e numérica das análises e resultados desse estudo, considerando a não linearidade da distribuição nos perfis de temperatura, quando é adicionada uma tensão térmica de espessura não linear (auto equilibrantes -  $\sigma^S$ ). Modelos foram simulados utilizando medições de temperatura com as  $\sigma^S$  e os diferenciais térmicos das cidades de São Paulo (Severi, 2002) e Sacramento (Hiller, 2007), conforme a 4ª fase da Figura 3.1.

### 5.1 RESULTADOS DE NOLA, $\Delta T$ E $\sigma^S$

#### 5.1.1 Análise comparativa das tensões máximas topo e na base da placa

Os diferenciais térmicos da cidade de São Paulo utilizados por Severi (2002), e da cidade de Sacramento por Hiller (2007), foram simulados variando as espessuras do pavimento, sendo 25, 40.6 e 50.8 cm as dimensões utilizadas. Desse modo, os resultados das tensões de topo e base, bem como as tensões auto equilibrantes e os valores do NOLA obtidos foram comparados, de modo a visualizar a influência dos diferenciais de temperaturas não lineares.

Em climas extremos pode-se produzir tanto altos níveis de  $\Delta T$  quanto grandes as  $\sigma^S$  calculada pela Equação 2.23 na parte superior e inferior da placa devido a mudanças ambientais mais súbitas. A Figura 5.1 mostra uma relação direta entre as  $\sigma^S$  e os  $\Delta T$ 's para a cidade de São Paulo.

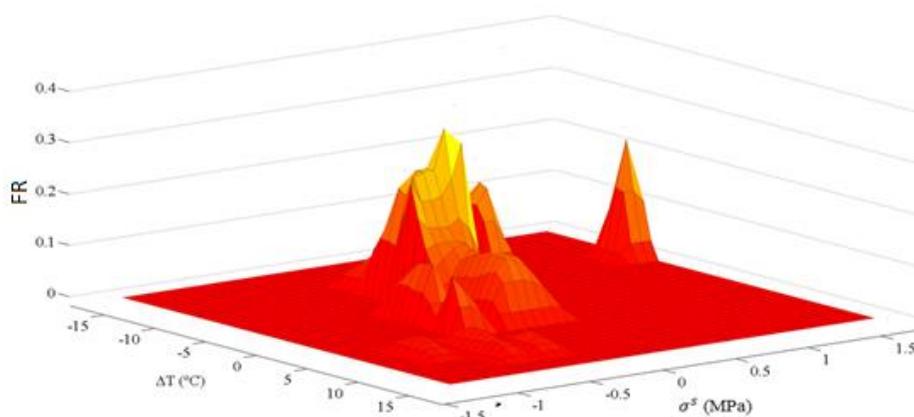


Figura 5.1- Frequência relativa da relação do  $\Delta T$  com a  $\sigma^S$  para a cidade São Paulo.

No gráfico da Figura 5.1 referente a cidade de São Paulo, mostra diversos  $\Delta T$ 's (-10 a 5 °C) ocorrem uma maior frequência de  $\sigma^S$  de compressão, enquanto na tração acontecem nos  $\Delta T$ 's (-10 a -5 °C). O gráfico da Figura 5.2 apresenta a frequência relativa da cidade de Sacramento.

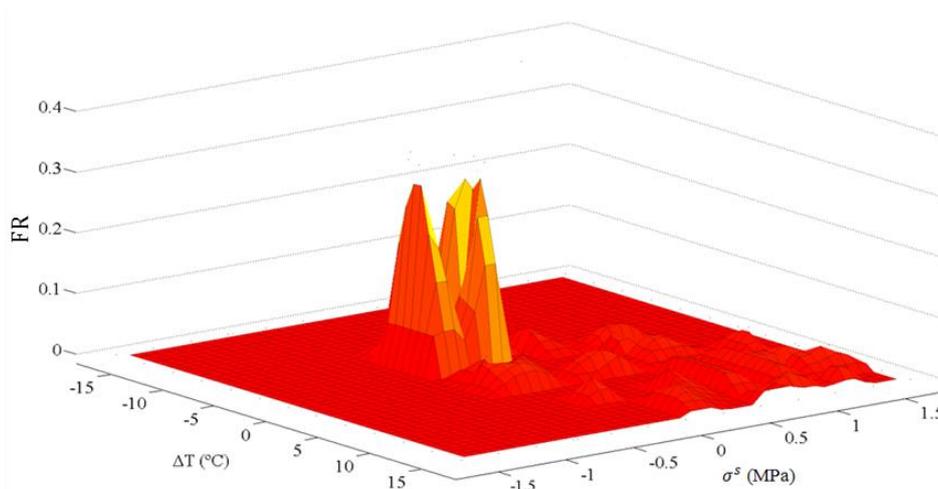


Figura 5.2 – Frequência relativa da relação do  $\Delta T$  com a  $\sigma^S$  para a cidade Sacramento.

O gráfico da Figura 5.2 ilustra um perfil de temperatura da cidade de Sacramento com uma maior frequência de  $\sigma^S$  de compressão para os  $\Delta T$ 's (-5 a 5 °C) e de tração para os  $\Delta T$ 's (8 a 16 °C). As parcelas tridimensionais das Figura 5.1 e Figura 5.2 mostram elevadas frequências relativas da relação de temperatura com as tensões auto equilibrantes.

## 5.2 RESULTADOS DAS TENSÕES NA PLACA PARA AS CIDADES DE SÃO PAULO E SACRAMENTO

### 5.2.1 Comportamento das tensões para os pavimentos de 25 e 50.8 cm

A Tabela 5.1 apresenta um resumo das tensões máximas para as cidades de São Paulo e Sacramento, com objetivo de destacar as diferentes espessuras da placa com incremento de carga do TPC da aeronave A380 e um LTE de 85 %. Para as análises do pavimento de 25 cm de espessura foram adotadas as mesmas propriedades do pavimento de 50.8 cm, conforme mostra a Tabela 3.2.

Tabela 5.1- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC e LTE 85%.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	25.00	-5.40	3.81	4.45	9.85	-0.13	3.68	4.32
		-4.78	3.76	4.48	12.12	-0.16	3.60	4.32
		7.97	2.95	5.54	118.96	-1.57	1.38	3.97
		10.99	2.82	5.98	53.04	-0.70	2.12	5.29
		11.63	2.80	6.09	81.08	-1.07	1.73	5.02
Sacramento	25.00	-4.16	3.72	4.51	-25.76	0.34	4.06	4.86
		5.55	3.09	5.21	-99.26	1.31	4.40	6.52
		6.22	3.05	5.30	57.59	-0.76	2.29	4.54
		13.88	2.72	6.50	-21.22	0.28	3.00	6.77
		15.01	2.69	6.69	-93.96	1.24	3.93	7.93
São Paulo	50.80	-5.40	1.32	1.89	20.10	-0.13	1.19	1.76
		-4.78	1.29	1.92	24.74	-0.16	1.13	1.76
		7.97	1.00	2.44	242.78	-1.57	-0.57	0.87
		10.99	0.96	2.57	108.24	-0.70	0.27	1.87
		11.63	0.96	2.59	165.46	-1.07	-0.12	1.52
Sacramento	50.80	-4.16	1.27	1.94	-52.58	0.34	1.61	2.29
		5.55	1.03	2.34	-202.57	1.31	2.34	3.65
		6.22	1.03	2.37	117.52	-0.76	0.27	1.61
		13.88	0.93	2.70	-43.30	0.28	1.21	2.98
		15.01	0.92	2.75	-191.75	1.24	2.16	3.99

Nota-se que na Tabela 5.1 as tensões de tração no topo na direção x ( $\sigma_{xx}^t$ ) são extremamente reduzidas quando há um acréscimo nos diferenciais de temperaturas, enquanto as tensões de tração na base na direção x ( $\sigma_{xx}^b$ ) têm o comportamento inverso. Desta forma, gradientes negativos ( $\Delta T < 0$ ) induz maiores magnitudes das tensões no topo e uma redução na base da placa de concreto. Para o gradiente negativo ( $\Delta T > 0$ ), esta tendência é inversa. Note que o NOLA é usado para o cálculo de  $\sigma^S$ , que, quando positivos, aumentam a magnitude das tensões de tração no fundo e no topo da placa de concreto.

A Figura 5.5 apresenta o comportamento das tensões com uma variação na espessura da placa para a cidade de São Paulo (SP) e Sacramento (SAC).

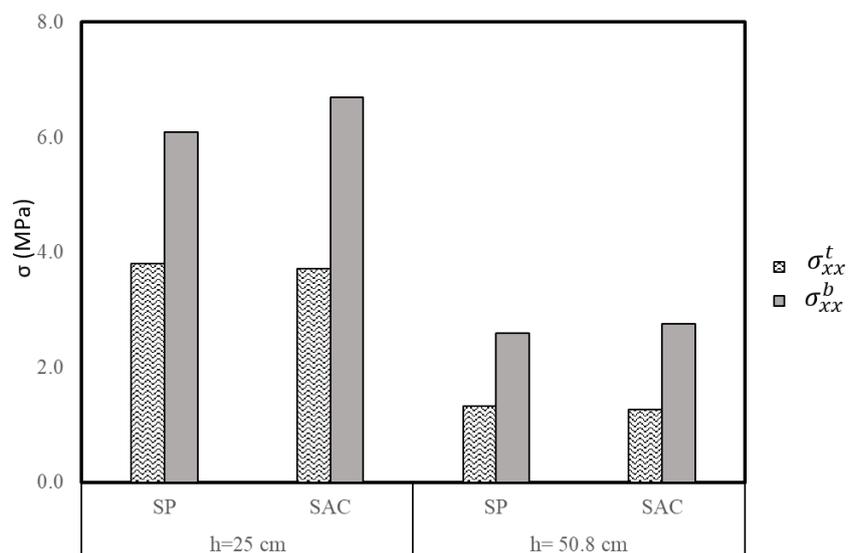


Figura 5.3- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$  para as cidades de São Paulo e Sacramento da A380 TPC.

O gráfico da Figura 5.3 mostra as maiores  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$  com as espessuras de 25 e 50.8 cm, que ocorrem na cidade de São Paulo e Sacramento para os  $\Delta T$ 's especificados na Tabela 5.1. Quanto maior os  $\Delta T$ 's menores são as tensões de tração no topo da placa. Nota-se que, quando há um acréscimo nas espessuras das placas as tensões de topo e base são menores: isso ocorre em função das distribuições das tensões nas espessuras das placas. Devido as temperaturas da cidade de Sacramento, pavimentos de concreto nesta cidade teriam maior magnitudes de tensões totais ( $\sigma_{xx}^t + \sigma^S$  ou  $\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ ) devido ao maiores valores de  $\sigma^S$  apesar de Sacramento ter magnitudes de tensões dos gradientes lineares ( $\sigma_{xx}^t$  ou  $\sigma_{xx}^b$ ) similares a cidade de São Paulo como ilustrado na Figura 5.3.

Na Tabela 5.2 mostra as tensões máximas para as espessuras de 25 e 50.8 cm do B747 TPC, com os diferenciais térmicos da cidade de São e Paulo e Sacramento. No gráfico da Figura 5.4 mostra o resumo das tensões máximas no pavimento de 25 cm de espessura para as cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC.

Tabela 5.2- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE 85%.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 25 e LTE 85%	-5.40	3.17	6.62	9.85	-0.13	3.04	6.49
		-4.78	3.16	6.64	12.12	-0.16	3.00	6.48
		7.97	2.98	7.15	118.96	-1.57	1.41	5.58
		10.99	2.94	7.28	53.04	-0.70	2.24	6.58
		11.63	2.93	7.30	81.08	-1.07	1.86	6.23
Sacramento		-4.16	3.15	6.64	-25.76	0.34	3.49	6.98
		5.55	3.01	7.05	-99.26	1.31	4.32	8.36
		6.22	3.00	7.09	57.59	-0.76	2.24	6.33
		13.88	2.90	7.40	-21.22	0.28	3.18	7.68
		15.01	2.89	7.45	-93.96	1.24	4.13	8.69
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 85%	-5.40	0.90	2.18	20.10	-0.13	0.77	2.05
		-4.78	0.89	2.19	24.74	-0.16	0.73	2.03
		7.97	0.61	2.37	242.78	-1.57	-0.96	0.80
		10.99	0.57	2.44	108.24	-0.70	-0.13	1.74
		11.63	0.56	2.45	165.46	-1.07	-0.51	1.38
Sacramento		-4.16	0.90	2.19	-52.58	0.34	1.24	2.53
		5.55	0.65	2.33	-202.57	1.31	1.96	3.64
		6.22	0.64	2.34	117.52	-0.76	-0.12	1.58
		13.88	0.53	2.51	-43.30	0.28	0.80	2.79
		15.01	0.51	2.53	-191.75	1.24	1.75	3.77

Na Tabela 5.2 mostra o comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$  do B747 com a LTE 85% para as cidades de São Paulo e Sacramento quando somado com as  $\sigma^S$ . Podemos observar as mesmas tendências de quando analisados para o A380, mas a magnitude de tensões totais são maiores para o B747. A Figura 5.4 mostra os valores das tensões somente quando considerados os gradientes lineares.

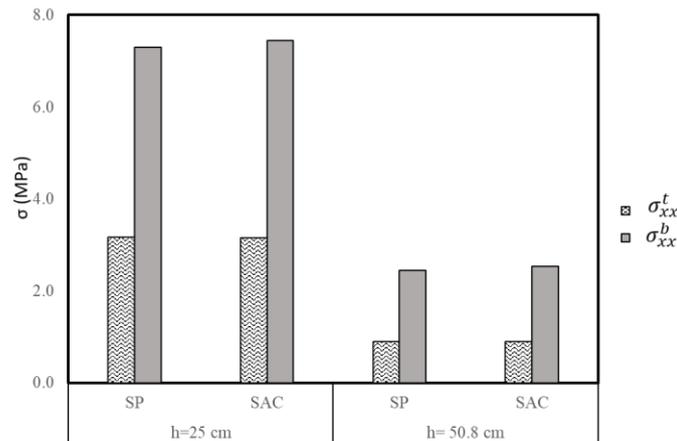


Figura 5.4- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$  para as cidades de São Paulo e Sacramento da B747 TPC com LTE 85%.

As relações das  $\sigma^S/\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma^S/\sigma_{xx}^b$  mostram a influência da  $\sigma^S$  nas tensões de topo e base da placa de concreto, respectivamente, conforme a Tabela 5.3. Percebe-se que, para a cidade de São Paulo, todas as relações são negativas, devido a  $\sigma^S$  ser de compressão. O sinal negativo mostra que, apesar da maior influência de  $\sigma^S$  para a cidade de São paulo, essa influência não aumenta as tensões de tração no topo e base da placa, e sim as diminuem já que  $\sigma^S < 0$ . Na cidade de Sacramento, temos as  $\sigma^S$  de tração, o que resulta no aumento das tensões que ocorrem na espessura da placa. Os valores em destaque na tabela denotam as maiores razões observadas.

Tabela 5.3- Influência da  $\sigma^S$  na espessura da placa, para TPC do A380, LTE 85%.

Profundidade (cm)		25		40		50	
Cidade	$\Delta T$ (°C)	Razão		Razão		Razão	
		$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$
São Paulo	-5.40	-0.035	-0.030	-0.065	-0.067	-0.100	-0.069
	-4.78	-0.043	-0.036	-0.082	-0.080	-0.124	-0.084
	7.97	-0.532	-0.284	<b>-1.123</b>	-0.483	<b>-1.568</b>	-0.645
	10.99	-0.247	-0.116	-0.529	-0.191	-0.724	-0.272
	11.63	-0.383	-0.176	-0.821	-0.287	<b>-1.121</b>	-0.413
Sacramento	-4.16	0.093	0.076	0.180	0.169	0.271	0.177
	5.55	0.424	0.251	<b>0.889</b>	0.445	<b>1.265</b>	0.560
	6.22	-0.248	-0.143	-0.522	-0.250	-0.739	-0.320
	13.88	0.101	0.042	0.216	0.068	0.295	0.102
	15.01	0.461	0.185	<b>0.985</b>	0.295	<b>1.342</b>	0.450

Para determinar a propensão para a fissuração do topo para a base que ocorre em relação à fissuração da base da placa para o topo, pode-se ter como referência a Tabela 5.4. Calculou-se a razão entre o somatório das tensões auto equilibrantes com tensões de topo e com a de base ( $\sigma_{xx}^t + \sigma^S/\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ ), que foram extraídas da Tabela 5.1.

Tabela 5.4- Razão das  $(\sigma_{xx}^t + \sigma^S/\sigma_{xx}^b + \sigma^S)$ , para TPC do A380, LTE 85%.

Profundidade (cm)		25	40	50
Cidade	$\Delta T$ (°C)	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$
		São Paulo	-5.40	0.851
-4.78	0.833		<b>0.978</b>	0.645
7.97	0.348		-0.103	-0.658
10.99	0.402		0.210	0.142
11.63	0.344		0.088	-0.076
Sacramento	-4.16	0.836	<b>0.952</b>	0.706
	5.55	0.674	0.655	0.643
	6.22	0.505	0.306	0.167
	13.88	0.443	0.358	0.406
	15.01	0.495	0.459	0.542

Os dados apresentados na Tabela 5.4 indicam que a maioria das tensões de tração máximas estão na parte inferior da placa para todas as espessuras do pavimento. Isto ocorre quando  $(\sigma_{xx}^t + \sigma^S/\sigma_{xx}^b + \sigma^S) < 1$ . No entanto, na espessura de 40 cm, observa-se uma razão que se aproxima de 1, evidenciando que a tensão de tração no topo se aproxima da magnitude de tensão da base o que poderia induzir também possíveis fissuração iniciando no topo da placa.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÃO

Este estudo foi realizado para implementar uma metodologia capaz de prever as tensões no topo e na base das placas de concreto aeroportuário, considerando uma distribuição não linear de temperatura na sua espessura. A validação foi feita através da comparação da relação das tensões de topo e base com resultados numéricos da literatura em placas de concreto sem incidência de temperatura.

Esse método se mostrou eficiente para consideração da não linearidade por meio do NOLA, calculando as  $\sigma^S$  para contabilizar as tensões totais atuantes na placa de concreto. Desta forma, o método foi capaz de prever as tensões de topo e base da placa com medidas de campo de distribuição de temperatura nas cidades de São Paulo e Sacramento. É importante observar que, as magnitudes das tensões mostraram-se muito elevadas mesmo para a placa mais espessa de 50.48 cm. Isto é devido ao fato de que as análises numéricas consideraram a placa de concreto diretamente sobre o subleito para fins de facilidade das análises numéricas. Na realidade, a consideração de uma camada de base granular entre a placa de concreto e o subleito diminuiria significativamente a magnitude das tensões. Entretanto, as conclusões advindas dos resultados analisados continuam sendo válidas já que elas são comparativas entre as aeronaves, espessuras de placa de concreto, temperaturas.

As situações onde as tensões foram analisadas sem considerar um  $\Delta T$ , os resultados mostraram que a tração e compressão diminuem expressivamente, mostrando que o diferencial térmico influencia diretamente nas tensões de tração e compressão da placa de concreto. No entanto, à medida que  $\Delta T$  aumenta positivamente, as tensões de topo da placa ficam mais intensas, apresentando a eficiência do método em reproduzir a distribuição de temperatura na espessura da placa. As maiores tensões em placas de concreto acontecem no meio ou na borda da placa. Este fato se confirma na análise dos gráficos que apontam as  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma_{xx}^b$ , onde foi possível alcançar os reais comportamentos das tensões máximas.

Para os casos do A380 e B747, os resultados mostraram que o TPC do B747 induz maiores tensões de tração, quando gradientes de temperatura foram considerados, para ambas as

espessuras analisadas. Os resultados das magnitudes das tensões mostram que as tensões de base e topo da placa são similares quando somente consideradas as tensões geradas pelo gradiente térmico linear  $\Delta T$ . Entretanto, quando as tensões auto equilibrantes ( $\sigma^S$ ) oriundas da distribuição de temperatura na espessura são consideradas, a cidade de Sacramento apresenta magnitudes de tensão de tração bem superiores as apresentadas pela cidade de São Paulo. Os resultados mostram e quantificam a importância da consideração da distribuição não linear de temperaturas no pavimento, uma vez que estas podem induzir altas tensões de tração tanto na base da placa quanto no topo quando comparadas com as tensões induzidas somente pelo gradiente térmico.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros podem ser apresentados os seguintes temas:

- Análise dinâmica do carregamento proveniente da aeronave.
- Trabalhar intervalos menores de LTE para observar o comportamento das placas.
- Verificar a eficiência de transferência entre as placas de agregado e por barra de transferência.
- Verificar o comportamento das tensões com a variação da geometria da placa.
- Implementar o NOLA para diferentes ambientes e temperaturas sazonais.
- Realizar este estudo nas seguintes aeronaves: MD-11 e B-777.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Air journal (2016). <http://www.air-journal.fr/2014-03-28-asiana-airlines-lairbus-a380-tout-beau-tout-neuf-5102791.html>. Acesso em setembro.

American, Association of State Highway Officials (1962). The AASHO Road Test- Report 5 Pavement Research. Special Report 61E, Washington D.C.

Ara, Inc. (2007). “Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Manual of Practice.” Final Draft. National Cooperative Highway Research Program Project - NCHRP 137A.

Asbahan, R.E e Vandenbossche, M (2008). “Effects of Temperature and Moisture Gradients on Slab Deformation for Jointed Concrete Pavements.” Em: *Journal of Transportation Engineering* , ASCE,137(8): 563-570.

Aure T. W. e Ioannides, A. M. (2016). “Curling Effects on Concrete Slab-on-Grade Fracture.” Em: *Materials and Structure*, Vol. 49, pp. 2991-3004.

Balbo, J. T. (1989). “Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Avaliação Estrutural de Pavimentos Rígidos Rodoviários”. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Balbo, J. T. (2007). “Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração”. São Paulo: Oficina de textos.

Boeing. (2016) Boeing Commercial Airplanes: Technical Information. [www.boeing.com/commercial/](http://www.boeing.com/commercial/). Acesso em setembro.

Bradbury, R.D (1938). “Reinforced Concrete Pavements.” Em: *Wire Reinforcement Institute*, Washington, D.C.

Choubane, B., e M. Tia (1992). “Nonlinear Temperature Gradient Effect on Maximum Warping Stresses in Rigid Pavements.” Em: *Transportation Research Record 1370*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-19.

Choubane, B., e M. Tia (1995). “Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement.” Em: *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 75-81.

Colim, G.M (2009). “Estudo dos Fatores que Afetam a Transferência de Carga em Juntas de Pavimento de Concreto Simples”. Em: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Colim, G.M., Balbo J. T. e Khazanovich L. (2011). “Efeito das variações de temperatura na transferência de cargas em juntas de pavimentos de concreto”. Em: *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, IBRACON, Vol. 4, pp, 407-439.

Daloglu, A. T., e Vallabhan, C. V. G. (2000). “Values of k for Slab on Winkler Foundation.” Em: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston, Vol. 126, No. 5.

Delatte, N (2008). “Concrete Pavement Design.” Construction and Performance. Em: *Edition Taylo E Frances*, London and New York.

DNIT (2006). “Manual de Pavimentos”. Em: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), Rio de Janeiro.

El-Maaty A. E. A., Hekal G. M. e El-Din E. M. S. (2016) “Modeling of Dowel Jointed Rigid Airfield Pavement under Thermal Gradient and Dynamic Loads.” Em: *Civil Engineering Journal*. Vol. 2, No. 2.

Evangelista, F. Jr. e Roesler, J. R. (2008). “Top-Down Cracking Critical on Airfield Rigid Pavements.” Em: *9th International Conference on Concrete Pavements*, San Francisco, Califórnia., International Society for Concrete Pavement, Washington, D.C.

Evangelista, F. Jr. e Roesler, J. R. (2009). “Top-Down Cracking Predictions for Airfield Rigid Pavements.” Em: *Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 13-23.

Evangelista, F. Jr. e Roesler, J. R. e Duarte, C. A. (2012). “Prediction of Potential Cracking Failure Modes in Three-Dimensional Airfield Rigid Pavements with Existing Cracks and Flaws.” Em: *Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 11-19.

Fabre, M. C., Maurice, M. d., Guedon, M. A. Mazard, e Petitjean M. J. (2005). “A380 Pavement. Experimental Programme, Rigid Phase.” Airbus Industrie/Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)/Service Technique des Bases Aérienn, Toulouse, France.

Federal Aviation Administration (FAA), (1995). “Airport Pavement Design and Evaluation.” Advisory Circular (AC) 150/5320-6f, FAA, Washington,DC.

Federal Aviation Administration (FAA), (2004). “Airport Pavement Design and Evaluation.” Advisory Circular (AC) 150/5320-10A, FAA, Washington,DC.

Federal Aviation Administration (FAA), (2016). “Airport Pavement Design and Evaluation.” Advisory Circular (AC) 150/5320-6D, FAA, Washington,DC.

Gupta, A.K, e Mamta (2013). “Effect of Exponential Temperature Variation on Frequencies of a Rectangular Plate of Non-linear Varying Thickness.” Em: *Asian Journal of Applied Sciences* .ISSN: 2321 – Vol. 01- Isseu 01, April.

Harik, I.E., P. Jianping, H. Southgate, e D. Allen (1994). “Temperature Effects on Rigid Pavements.” Em: *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 127-143.

Hiller, J. E. e Roesler J. R. (2010). “Simplified Nonlinear Temperature Curling Analysis for Jointed Concrete Pavements.” Em: *Journal of Transportation Engineering*, ASCE. Vol. 136, pp. 654-663.

Hiller, J.E (2007). "Development of Mechanistic-Empirical Principles for Jointed Plain Concrete Pavement Fatigue Design." Tese de doutorado. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Hoel, L.A. e Short, A.J (2006). "The Engineering of the Interstate Highway System." Em: *TR News*, Washington, DC: Transportation Research Board.

Huang, Y. H., 1973a. "Critical Tensile Strain in Asphalt Pavements," Em: *Transportation Engineering Journal*, ASCE, Vol. 99, No. TE3, pp. 553–569.

Huang YH, Wang ST (1974). "Finite element analysis of rigid pavements with partial subgrade contact." *Transp Res Rec* 485:39–54.

Huang, Y.H. e Wang, S.T (2004). "Pavement Analysis and Desing." Second Edition. Prentice Hall. Em: *New Jersey*.

Ioannides, A.M., e Khazanovich, L (1998). "Nonlinear Temperature Effects on Multilayered Concrete Pavements." Em: *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 128-136.

Ioannides, A.M., e R. Salsilli-Murua (1989). "Temperature Curling in Rigid Pavement An Application of Dimensional Analysis." Em: *Transportation Research Record 1227*, Transportation Research Board, pp. 1-11.

Janssen, D.J., e M.B. Snyder (2000). "Temperature-Moment Concept for Evaluating Pavement Temperature." Em: *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol. 6, No. 2, pp. 81-83.

Jeong, J. H. e Zollinger, D. G. (2004), "Insights on Early age Curling and Warping Behavior From Fully Instrumented Test Slab System." CD-ROM, *Transportation Research Board Meeting*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Korovesis GT (1990). “Analysis of slab-on-grade pavement system subjected to wheel and temperature loadings”. Em: Dissertação, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign.

Khazanovich, L. (1994). “Structural Analysis of Multi-Layered Concrete Pavement Systems.” Tese de doutorado. University of Illinois, Urbana, Ill.

Khazanovich, L., e Ioannides, A. M. (1994). “Structural Analysis of Unbonded Concrete Overlays Under Wheel and Environmental Loads.” Em: *Transp. Res.*

Khazanovich, L., Yu, H.T., Rao, S., Galasova K., Shats E., e Jones R (2000). “ISLAB2000-Finite Elemento Analysis Program for Rigid and Composite Pavements.” User’s Guide. Champaign, IL: ERES Consultants.

Kim, J. (2000). “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Multi-Layered Systems.” Em: Tese de Doutorado. University of Illinois, Urbana – Champaign.

Masad, E. R. Taha, e B. Muhunthan (1996). “Finite Element Analysis of Temperature Effects on Plain-Jointed Concrete Pavements.” Em: *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 388-398.

Mohamed, A. R., e Hansen, W. (1997). “Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavement.” Em: *Transportation Research Record*. 1568, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 65–71.

Mu, F., e Vandebossche, J. M. (2016) “Evaluation of the Approach Used for Modeling the Base Under Jointed Plain Concrete Pavements in the AASHTO Pavement ME Design Guide.” Em: *International Journal of Pavement Research and Technology*, China, D.C., 264-269.

Nasim, M. A., Karamihas, S. M., Gillespie, T. D., Hansen, W. e Cebon, D. (1991). “Behavior of a Rigid Pavement under Moving Dynamic Loads.” Em: *Transportation Research Record 1286*. Transportation Research Board, Washington, D.c.pp.129-135.

NCAT (2005). “Wheel Wander at the Test Track.” Em: *National Center Asphalt Technology* (NCAT), NCAT Report 05-02, April.

PEREIRA, D.S (2001). “Estudo de Gradientes Térmicos e Deformações em Whitetopping Ultradelgado.” Em: Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PEREIRA, D.S (2003). “Estudo do Comportamento de Pavimentos de Concreto Simples em Condições de Aderência entre Placa de Concreto e Base Cimentada ou Asfáltica”. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Petty, A. E. (2007). “Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System.” Em: *Transportation Research Circular*, July.

Pickett, G. e Ray G. K. (1951). “ Influence Charts for Concrete Pavements.” Em: *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. Vol.116.

Raia, F. (2010). “Estudo Experimental dos Efeitos da Temperatura em Pavimento de Concreto Instrumentado”. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo.

Rao, S. e Roesler J. R. (2005). “Characterizing Effective Built-in Curling from Concrete Pavement Field Measurements.” Em: *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 131, No. 4. pp. 320-327.

Rodolfo, M. P. e Balbo J. T. (2001). “Modelagem de Tensões em Pavimentos Concreto Submetidos a Gradientes Térmicos e Cargas Rodoviárias”. Em: *Laboratório de Mecânica de Pavimentos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Severi. A. A. (2002). “Estudo dos Gradientes Térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical”. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo.

Sheehan, M. J (1999). “Field Evaluation of Concrete Pavement Curling and Warping Responses.” Tese de doutorado. University of Minnesota, Minneapolis, Minn.

Snell, L.M. e Snell, B.G (2002). “Oldest Concrete Street in the United States.” Em: *Concrete International*, Vol. 24, No. 3, pp. 72–74.

Tia M, Armaghani JM, Wu CL, Lei S, Toye KL (1987) FEACONS III computer program for an analysis of jointed concrete pavements. *Transp Res Rec* 1136:12–22

Tabatabaie, A. M., (1977). “Structural Analysis of Concrete Pavement Joints.” Em: Tese de Doutorado; University of Illinois.

Thomlinson, L (1940). “Temperature Variations and Consequent Stresses Produced by Daily and Seasonal Temperature Cycles in Concrete Slabs.” Em: *Concrete Constructional Engineering*, London, U. K., Vol. 36. No. 6, pp. 298-307.

Thompson, M. R. e Barenberg E. J. (1992). “Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedure for Pavements – Phase 2.” Em: *Transportation Research Board*, National Research Council.

Thompson, M. R., Dempsey B. J., Hill H., e Vogel J. (1987). “Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design.” Em: *Transportation Research Record 1121*, TRB, National Research Council, Washington, D.C, pp 14-22.

Urugal, A.C. (1999). “Stresses in Plates and Shells. second edition.” WCB/McGraw Hill.

Vandenbossche, M. e Snyder (2005). “Comparison Between Measured Slab Profiles of Curled Pavementnts and Profiles Generated Using the Finite Element Method.” Em: *8<sup>a</sup> International Conference on Concrete Pavements*, Colorado Springs, Colorado, USA.

Westergaard, H. M. (1926). “Stresses in Concrete Pavement Computed by Theoretical Analysis.” Em: *Public Roads*, Vol. 7, No. 2. pp.25-35.

Westergaard, H. M. (1927). "Analysis of Stresses in Concrete Pavements Due To Variations of Temperature." Em: *Highway Research Board*, Vol. 6, Nacional Research Council, Washington D.C., pp. 201-217.

William, G. D., George M. T., e Joe P. M. (1998). "EverFer Rigid Pavement Three-Dimensional Finite Element Analysis Tool." Em: *Transportation Research Record* 1629, University of Washington, Washington.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE A – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES

Conforme exposto anteriormente para o caso do A380 TPC e TPP, as Figuras A.1 a A.8 mostram o comportamento das tensões na P11.

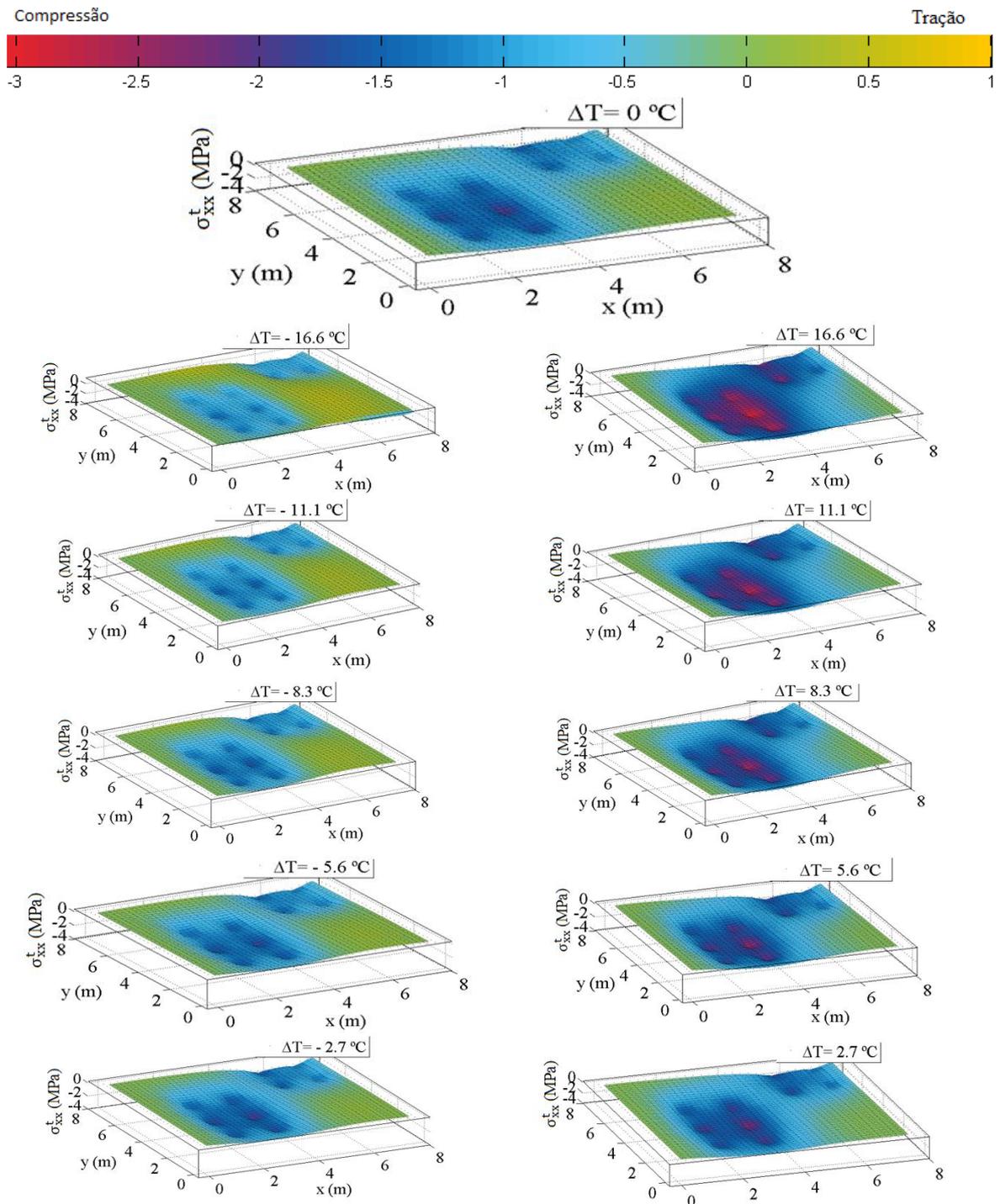


Figura A. 1- Comportamento das tensões (P11) com incidência de carga A380 TPC, LTE  
85 % E h= 50.8 cm.

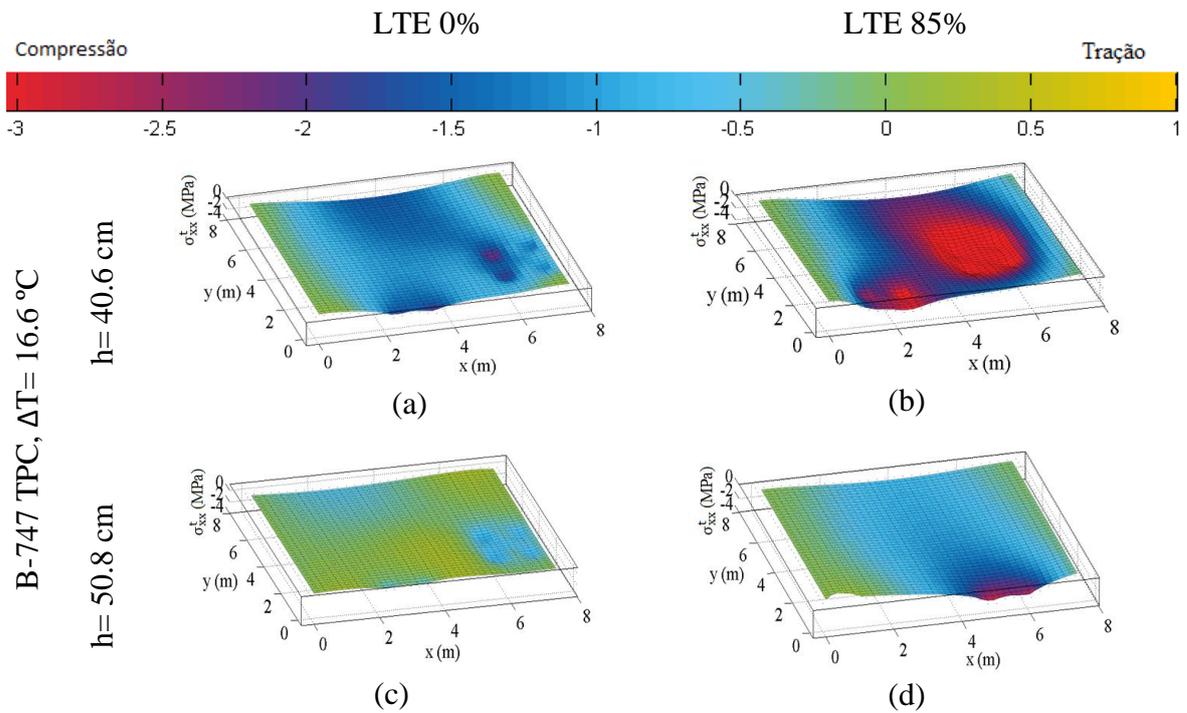


Figura A. 2- Eficiência de transferência de carregamento entre as placas com incidência de carga do TPC do B747.

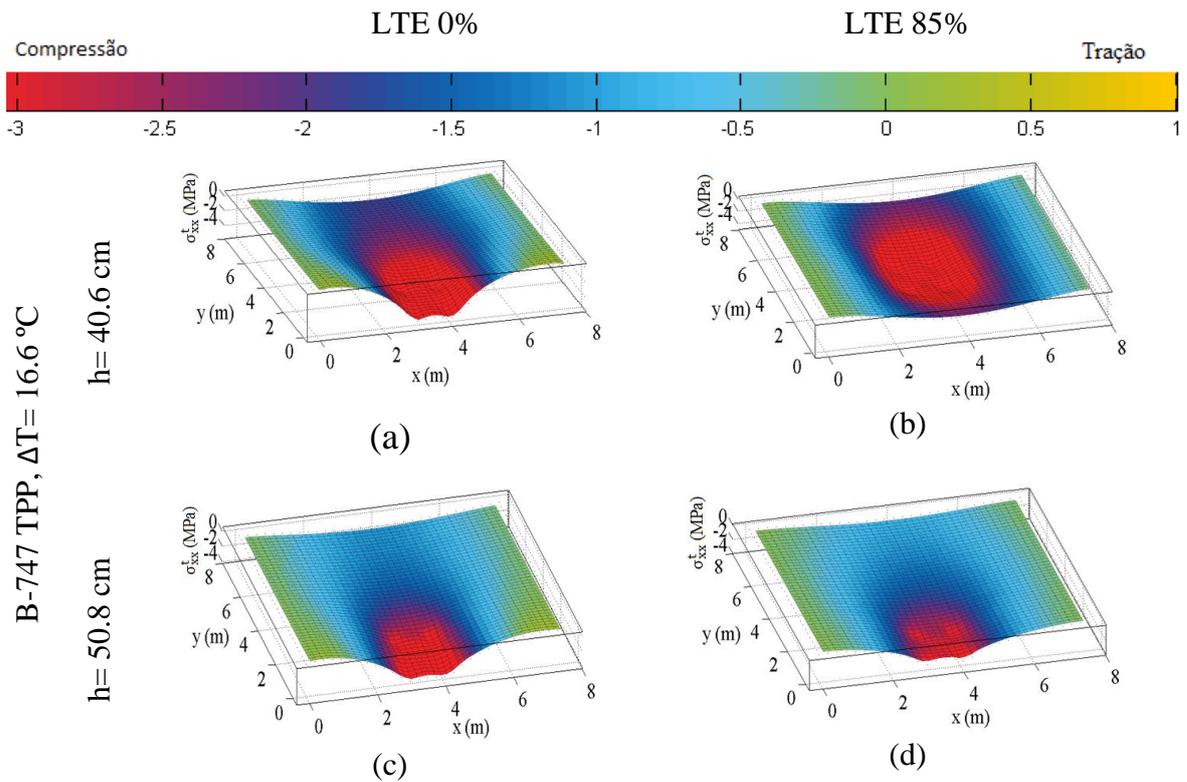


Figura A. 3- Eficiência de transferência de carregamento entre as placas com incidência de carga do TPP do B747.

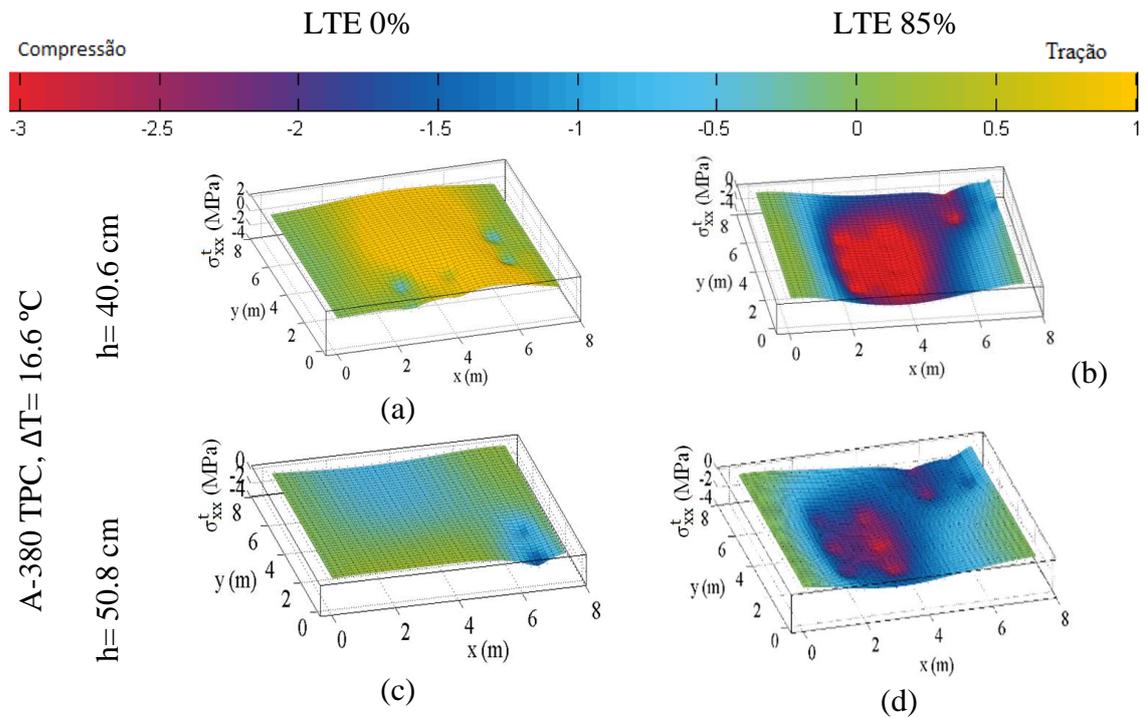


Figura A. 4- Eficiência de transferência de carregamento entre as placas com incidência de carga do TPC do A380.

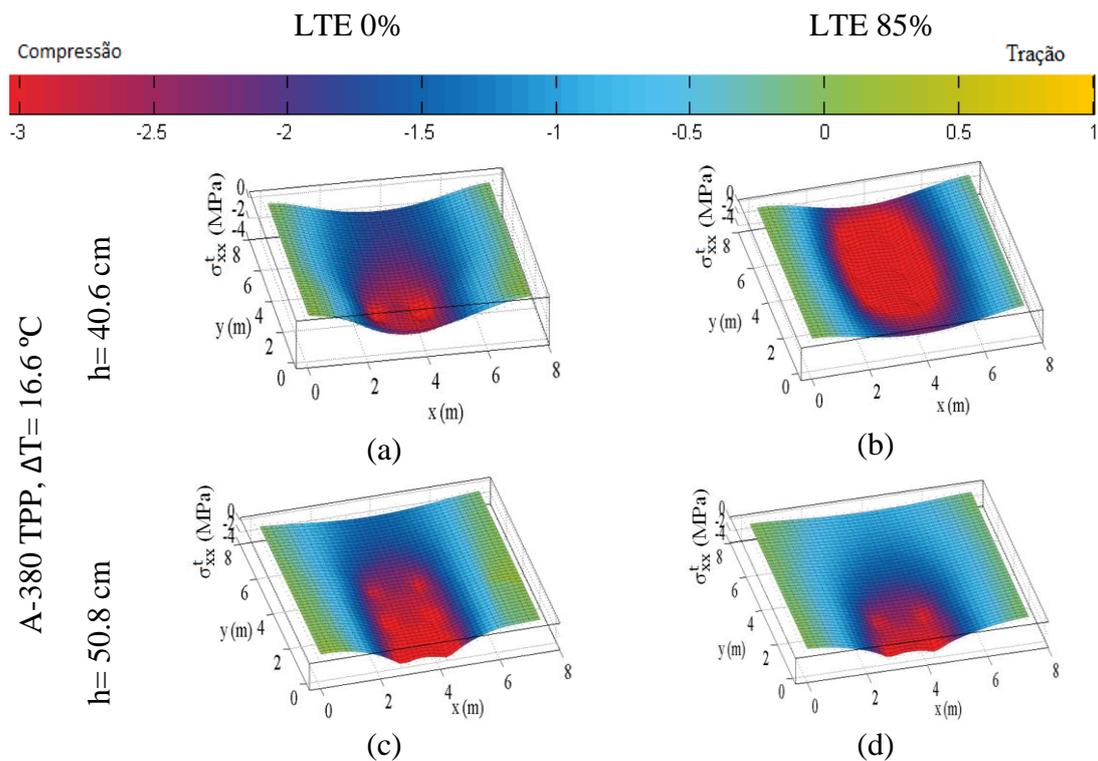


Figura A. 5- Eficiência de transferência de carregamento entre as placas com incidência de carga do TPP do A380.

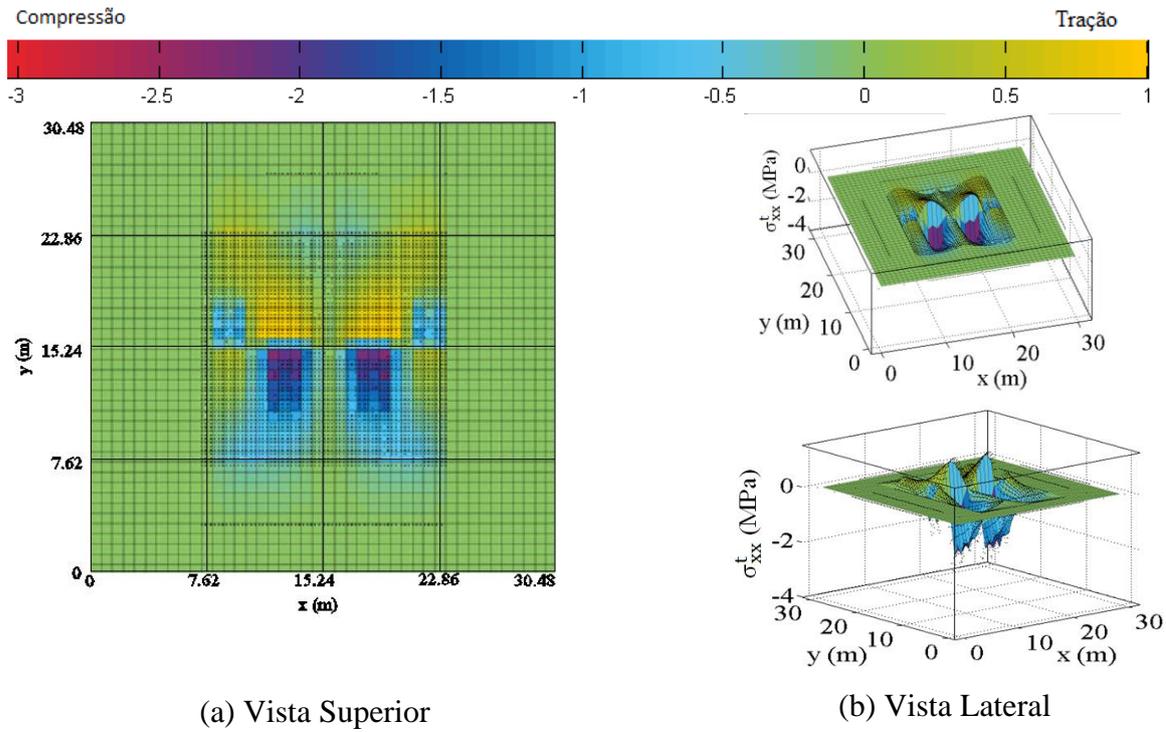


Figura A. 6- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , para A380 TPC, LTE 0 % e  $h = 50.8$  cm.

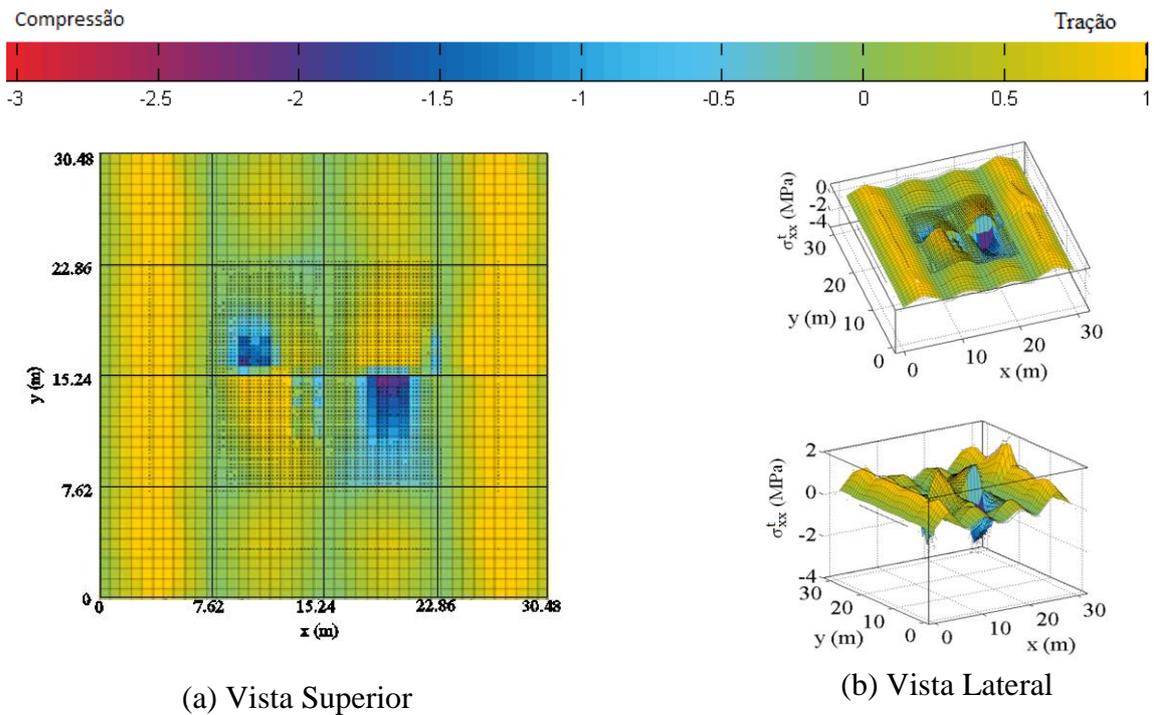
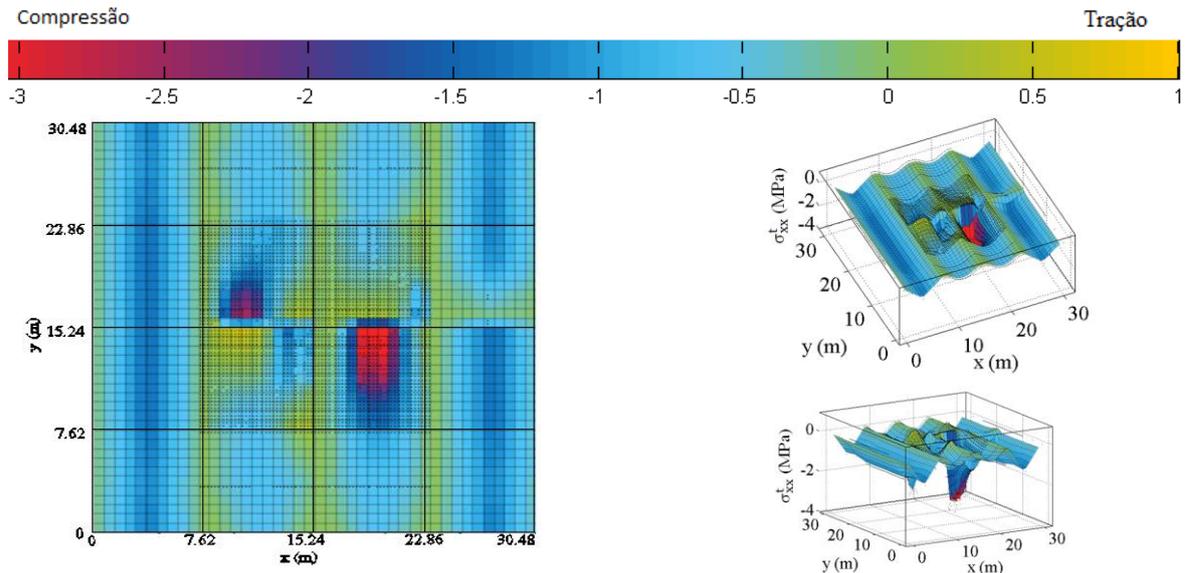


Figura A. 7 - Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T = -16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , para A380 TPC, LTE 0% e  $h = 50.8$  cm.



(a) Vista Superior

(b) Vista Lateral

Figura A. 8- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  com  $\Delta T= 16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , para A380 TPC, LTE 0 % e  $h= 50.8 \text{ cm}$ .

A não simetria das maiores tensões dos carregamentos acontecem pelo fato da disposição do centro de gravidade do trem de pouso. As tensões críticas para um diferencial térmico positivo com LTE 0% podem ser visualizadas de acordo com Figura A. 8. Quando é inserido um  $\Delta T= 16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , as tensões máximas de tração incidem nas juntas longitudinais (eixo y) do conjunto de placas. Já na P11, as maiores tensões acontecem no decorrer da LP1, conforme a Figura A. 8, resultando em compressão no topo e tração na base do conjunto de placa ( $T_t > T_b$ ). O comportamento das tensões na Figura A. 8, indica que as tensões de tração máxima acontecem imediatamente após a aplicação da carga do trem de pouso do A380 TPC. Isto ocorre pela ineficiência da LTE, as deflexões das placas carregadas são evidentes causando uma tensão de compressão; já nas placas sem carregamento, ocorrem tensões de tração, logo após o carregamento.

## APÊNDICE B- TENSÕES DE TRACÇÃO MÁXIMAS PARA AS AERONAVES A380 E B747.

Nesta seção apresenta o comportamento das tensões máximas de tração durante as linhas de passagens (LP) na placa 11, proveniente dos carregamentos TPC e TPP das aeronaves A380 e B747.

### Casos A380 TPC

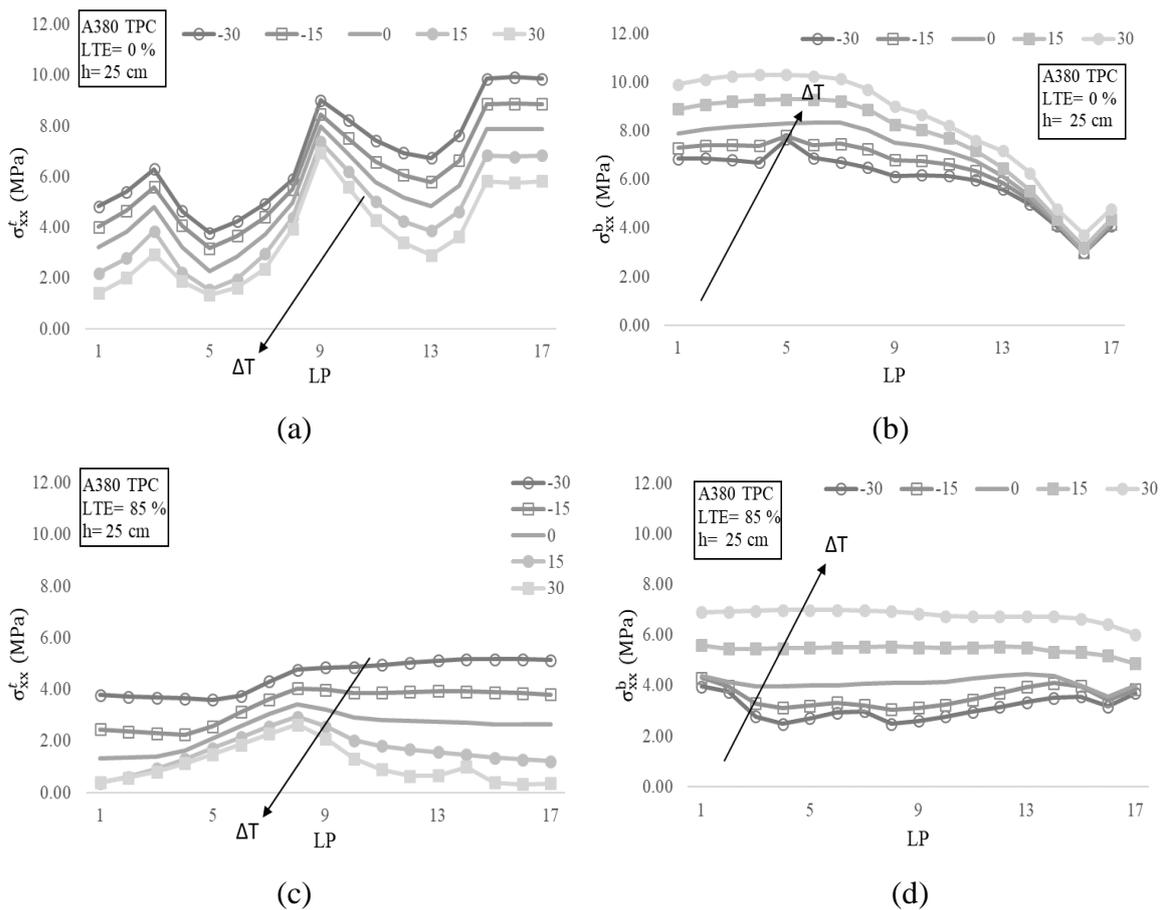


Figura B. 1- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC, h= 25 cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

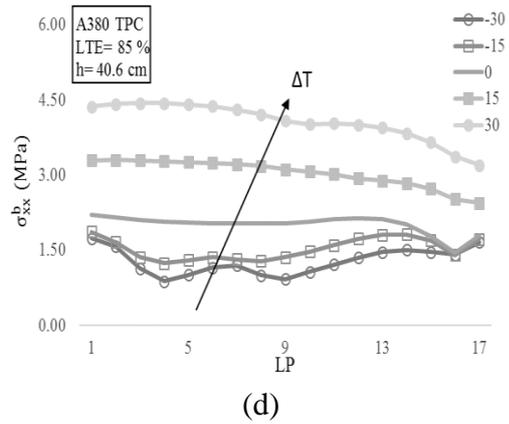
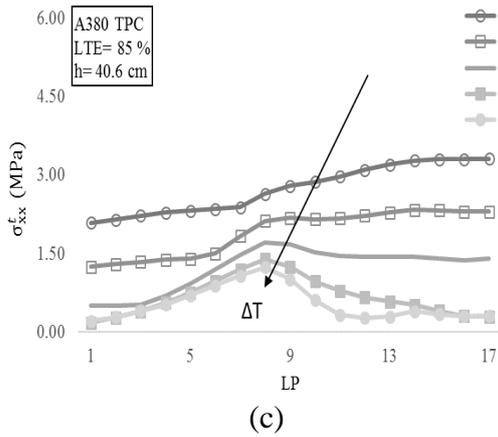
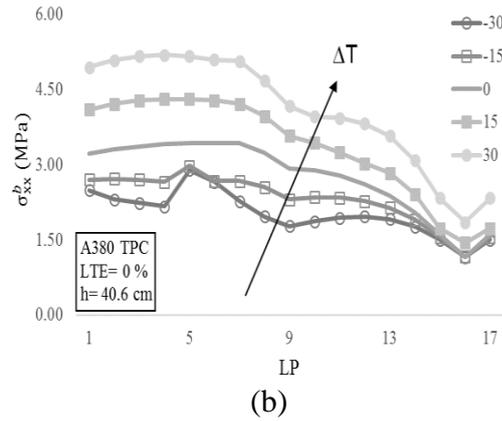
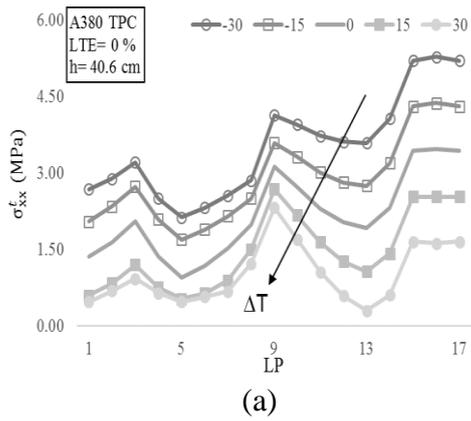


Figura B.2- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC  $h=40.6$  cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 40.7$  MPa/m

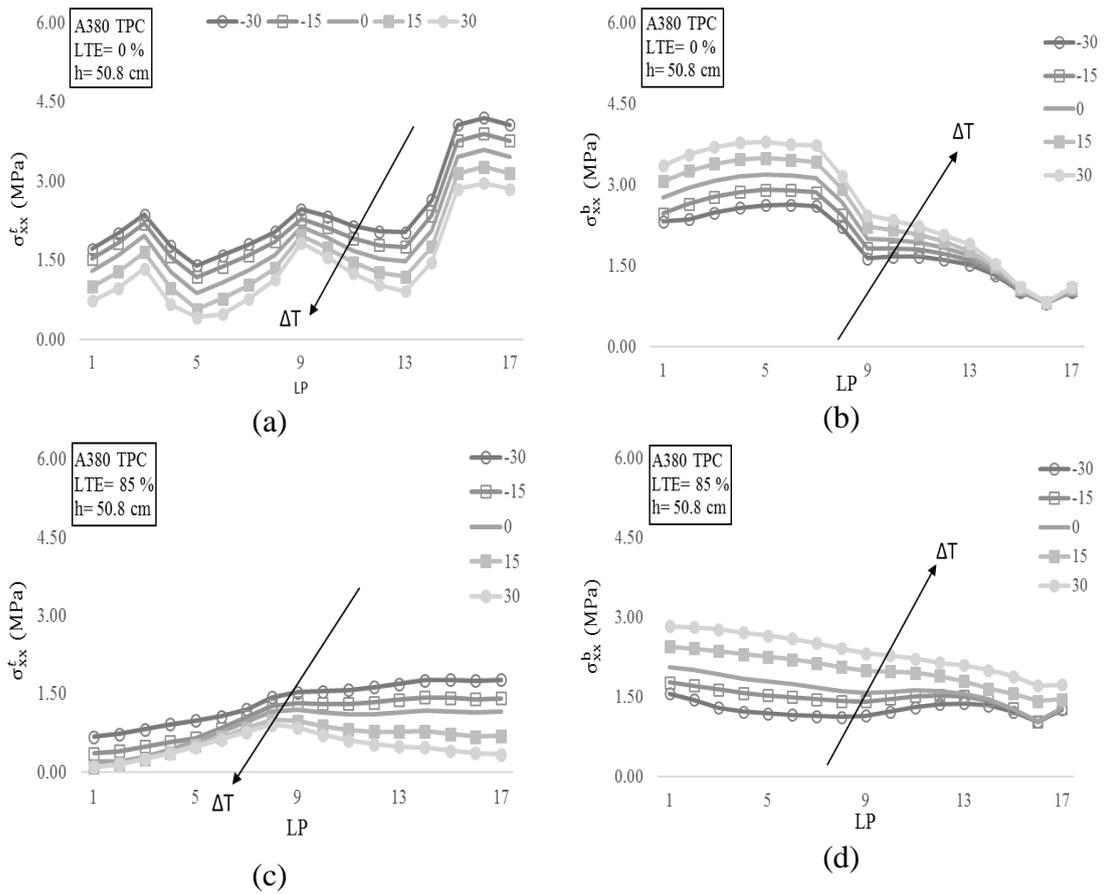


Figura B. 3- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPC h= 50.8 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

**Casos B747 TPC**

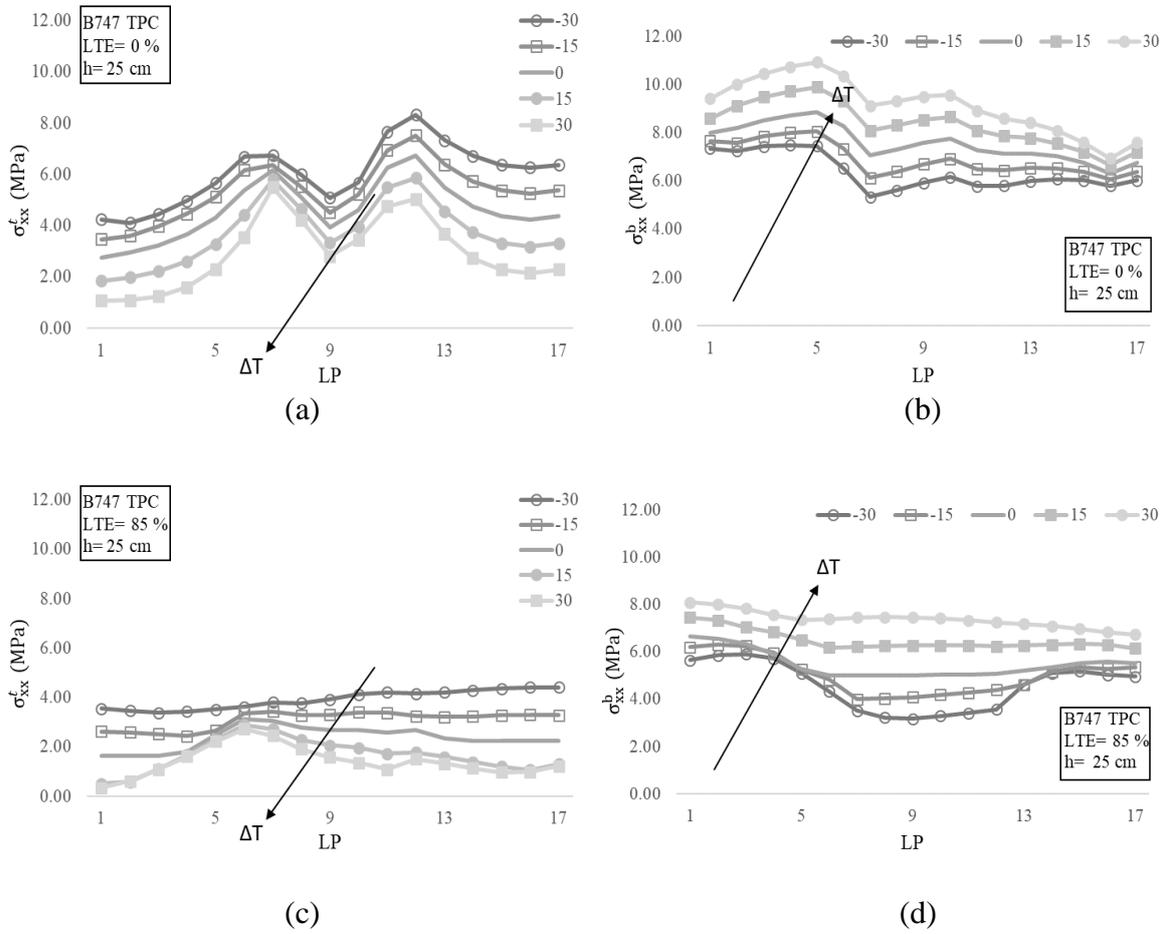


Figura B. 1.1- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC,  $h = 25$  cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k = 13.6$  MPa/m.

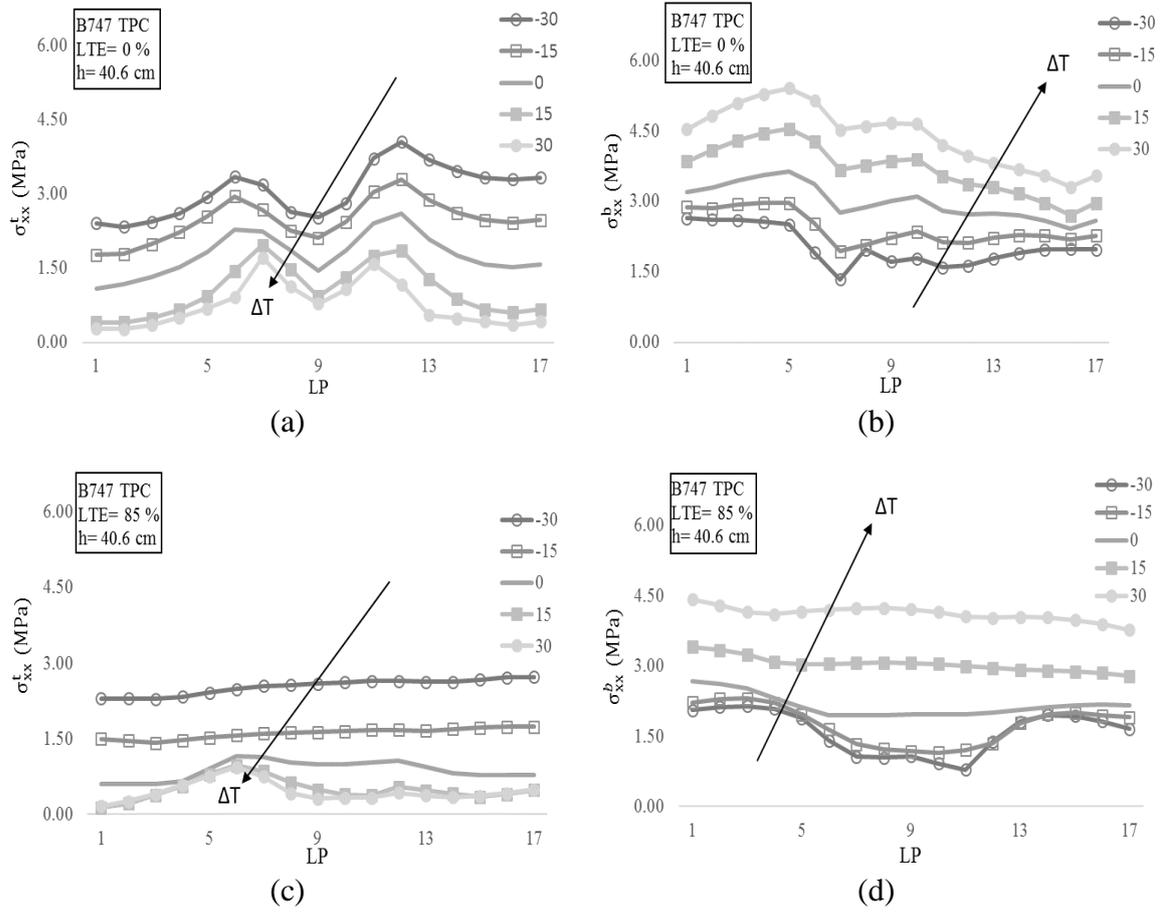


Figura B. 2.1 - Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC,  $h = 40.6$  cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k = 40.7$  MPa/m.

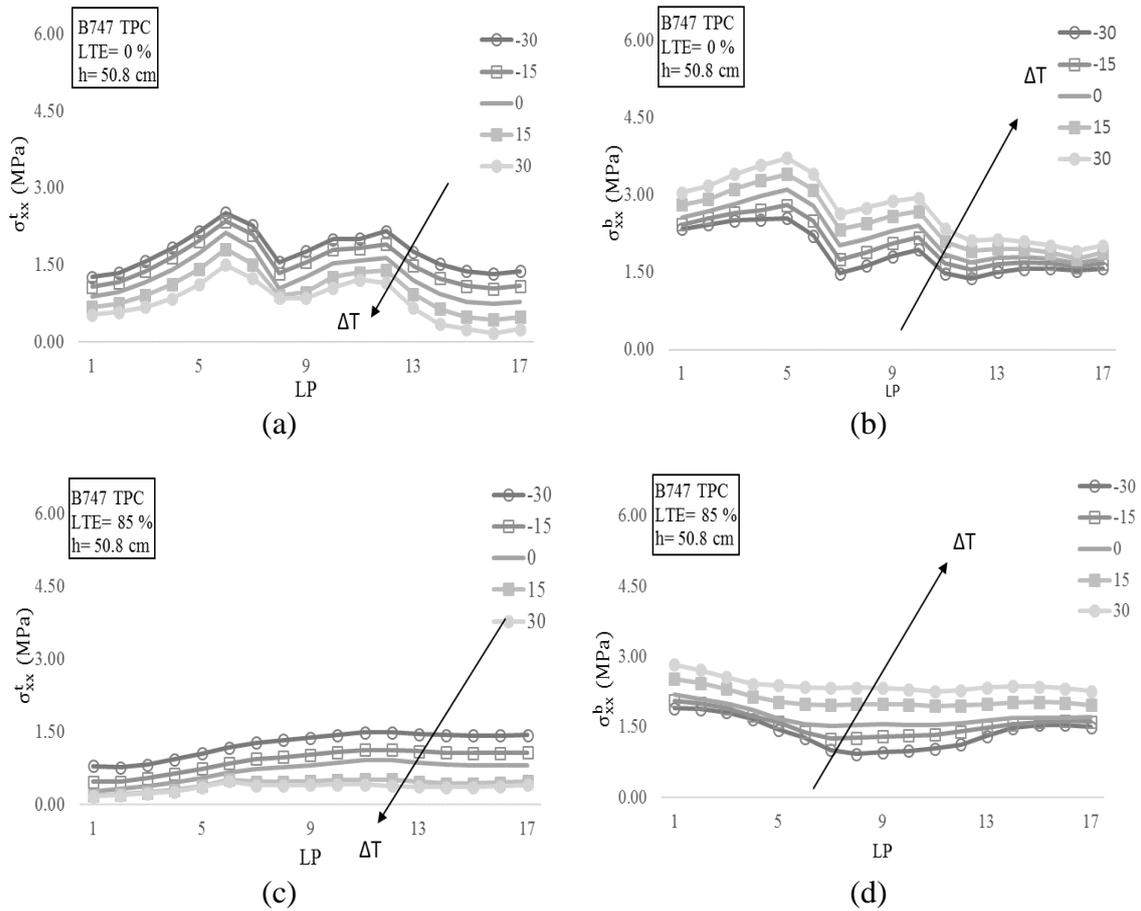


Figura B. 3.1 - Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPC, h= 50.8 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

**Casos A380 TPP**

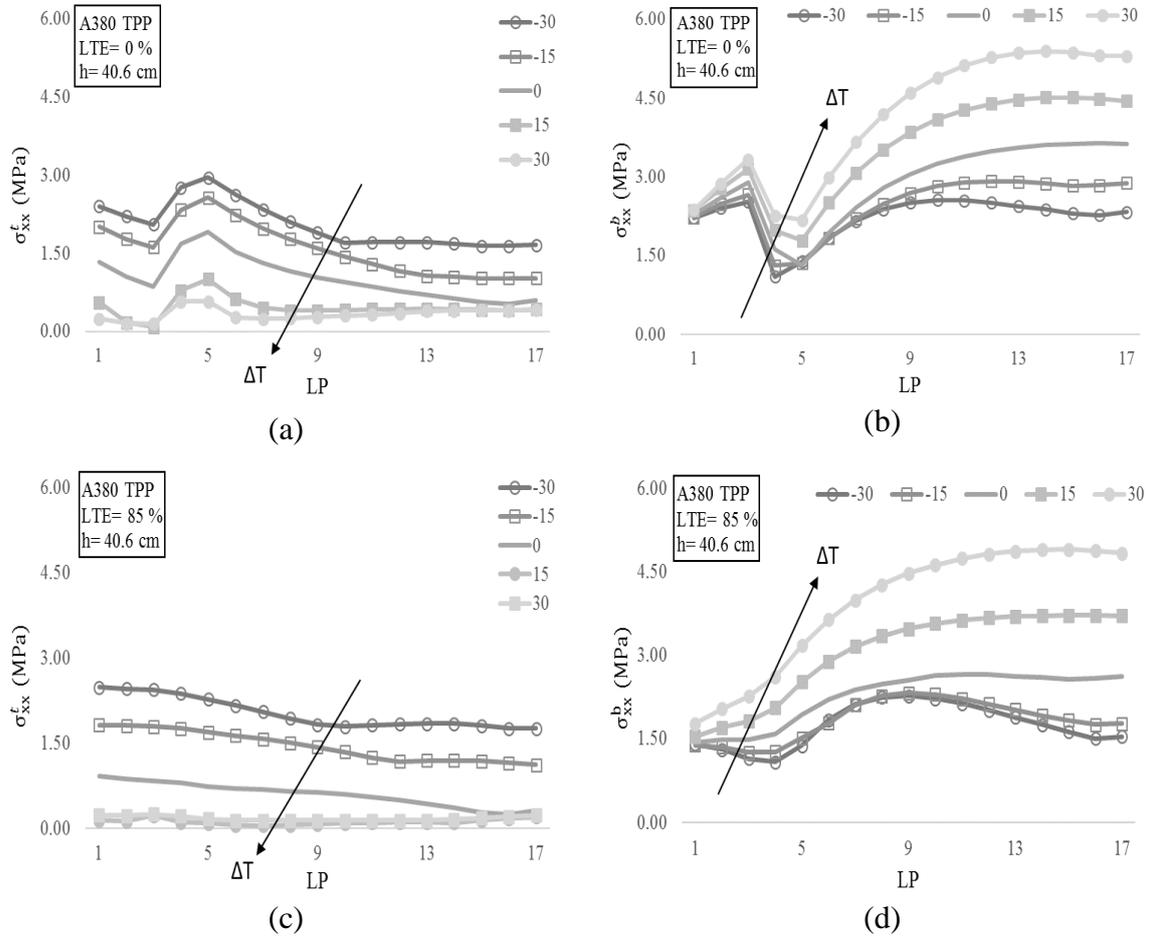


Figura B. 2.2- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPP, h= 40.6 cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com k= 40.7 MPa/m.

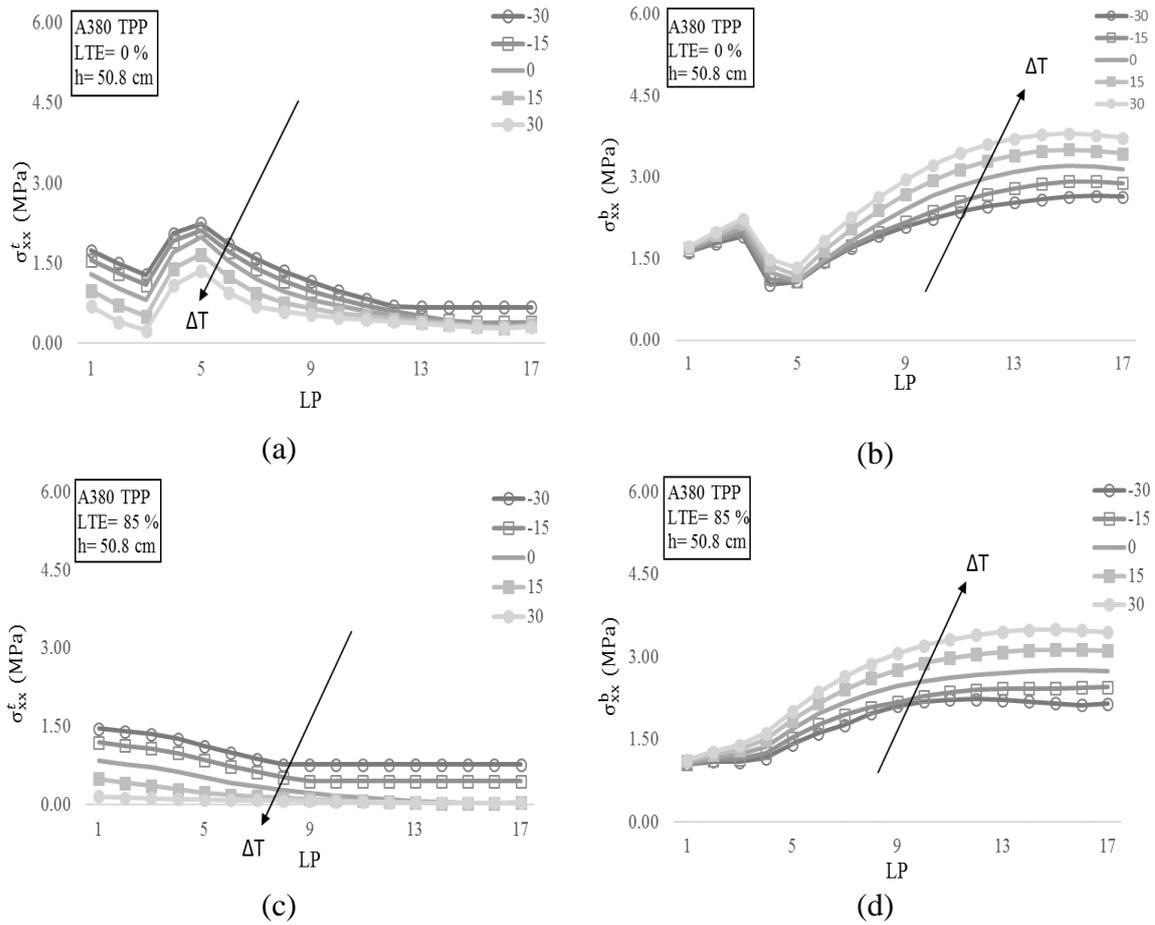


Figura B. 2.2- Tensões de tração máximas na placa 11 do A380 TPP, h=50.8 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 13.6$  MPa/m.

**Casos B747 TPP**

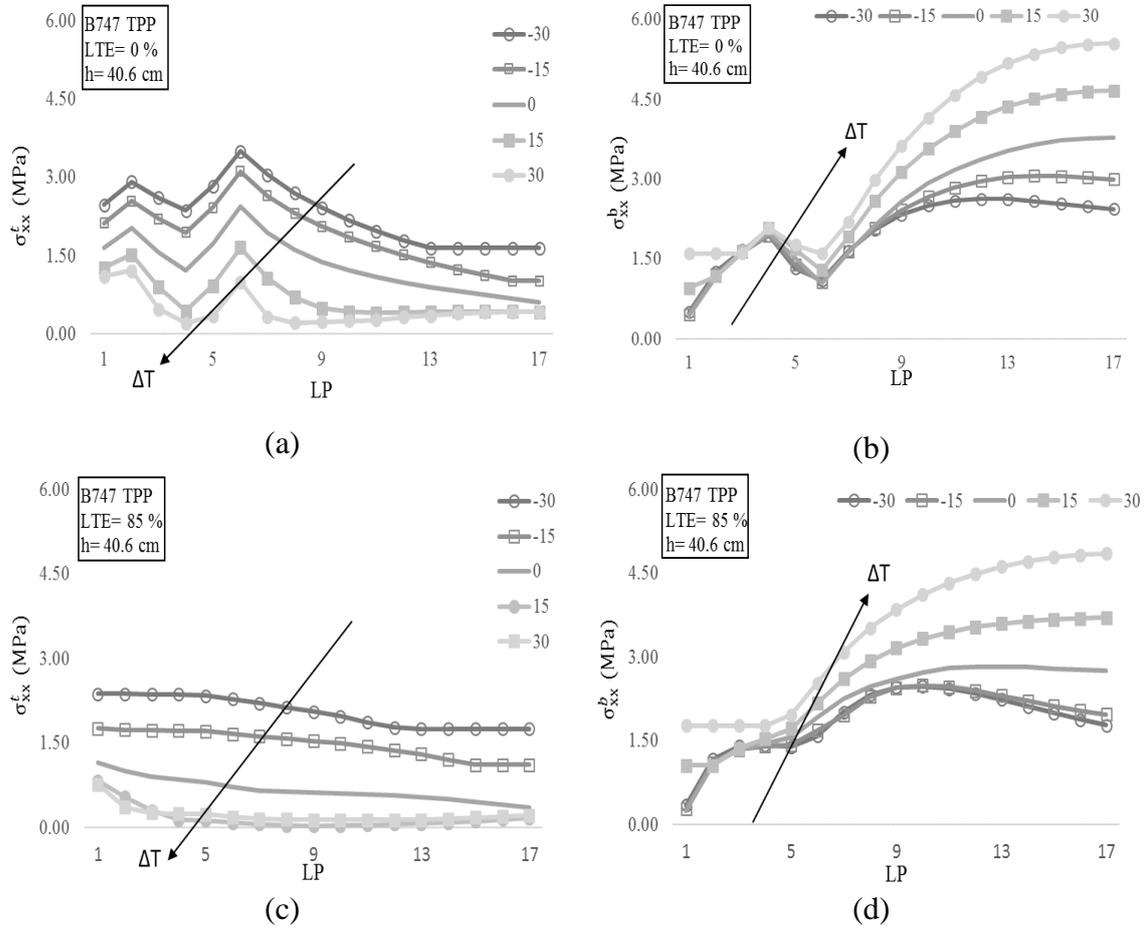


Figura B. 2.3 - Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPP, h= 40.6 cm: (a) e (c)

$\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k= 40.7$  MPa/m.

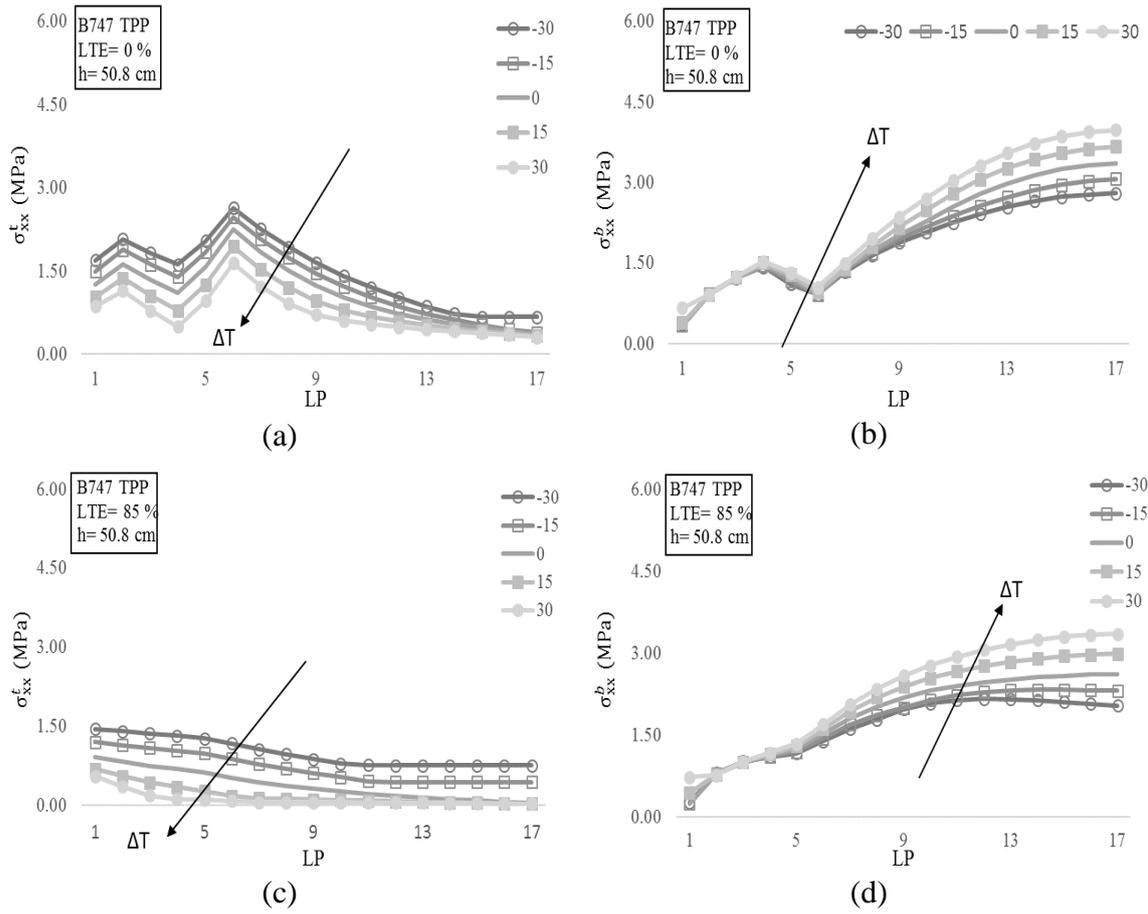


Figura B. 3.3- Tensões de tração máximas na placa 11 do B747 TPP,  $h = 50.8$  cm: (a) e (c)  $\sigma_{xx}^t$  e (b) e (d)  $\sigma_{xx}^b$  com  $k = 13.6$  MPa/m.

**Casos A380 TPC**

Tabela B 1- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE 0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h=25 e LTE 0%	-5.40	8.22	8.01	9.85	-0.13	8.09	7.88
		-4.78	8.18	8.04	12.12	-0.16	8.02	7.88
		7.97	7.40	8.83	118.96	-1.57	5.83	7.26
		10.99	7.22	9.03	53.04	-0.70	6.52	8.33
		11.63	7.24	9.07	81.08	-1.07	6.17	8.00
Sacramento	h=25 e LTE 0%	-4.16	8.15	8.08	-25.76	0.34	8.50	8.42
		5.55	7.68	8.67	-99.26	1.31	8.99	9.98
		6.22	7.60	8.72	57.59	-0.76	6.84	7.96
		13.88	7.34	9.22	-21.22	0.28	7.61	9.50
		15.01	7.38	9.30	-93.96	1.24	8.62	10.54

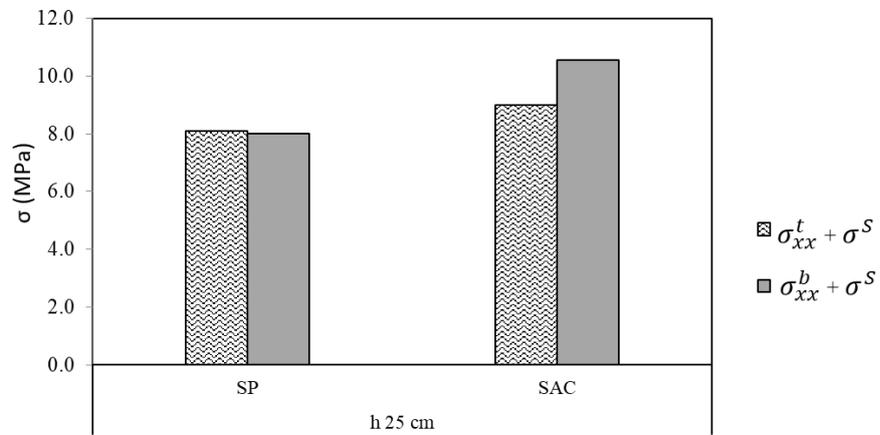


Figura B. 1.2- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 0%.

Tabela B 2- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE85% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 25 e LTE 85%	-5.40	3.81	4.45	9.85	-0.13	3.68	4.32
		-4.78	3.76	4.48	12.12	-0.16	3.60	4.32
		7.97	2.95	5.54	118.96	-1.57	1.38	3.97
		10.99	2.82	5.98	53.04	-0.70	2.12	5.29
		11.63	2.80	6.09	81.08	-1.07	1.73	5.02
Sacramento	h= 25 e LTE 85%	-4.16	3.72	4.51	-25.76	0.34	4.06	4.86
		5.55	3.09	5.21	-99.26	1.31	4.40	6.52
		6.22	3.05	5.30	57.59	-0.76	2.29	4.54
		13.88	2.72	6.50	-21.22	0.28	3.00	6.77
		15.01	2.69	6.69	-93.96	1.24	3.93	7.93

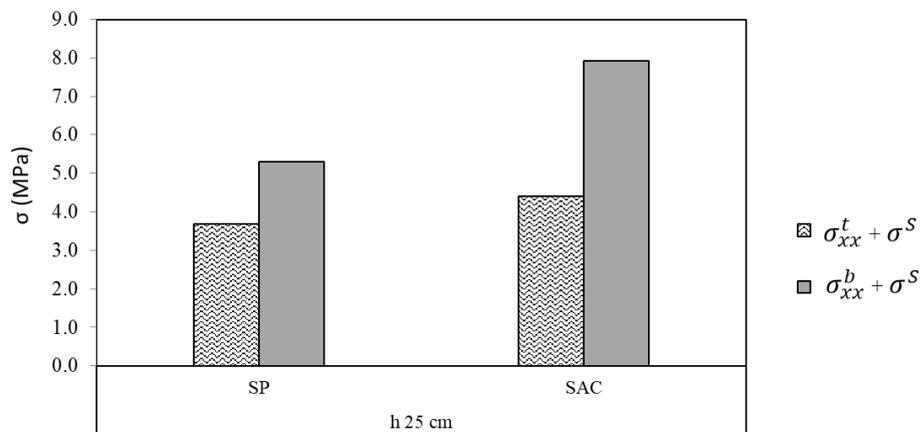


Figura B. 1.3- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 85%.

Tabela B 3- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE0% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm, LTE 0%	-5.40	3.75	3.06	16.07	-0.13	3.62	2.93
		-4.78	3.56	3.15	19.77	-0.16	3.40	2.99
		7.97	3.08	3.58	194.03	-1.57	1.51	2.01
		10.99	2.93	3.86	86.51	-0.70	2.23	3.16
		11.63	2.85	3.97	132.24	-1.07	1.78	2.90
Sacramento		-4.16	3.51	3.24	-42.02	0.34	3.85	3.58
		5.55	3.33	3.38	-161.90	1.31	4.64	4.69
		6.22	3.24	3.45	93.93	-0.76	2.48	2.69
		13.88	2.79	4.14	-34.60	0.28	3.07	4.42
		15.01	2.70	4.31	-153.25	1.24	3.94	5.55

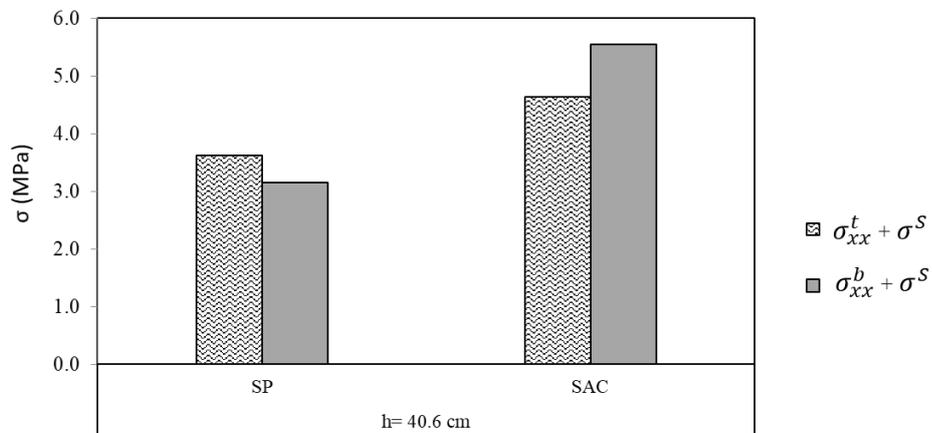


Figura B. 2.4- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 0%.

Tabela B 4- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE85% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h=40.6 cm, LTE 85%	-5.40	2.01	1.97	16.07	-0.13	1.88	1.84
		-4.78	1.96	2.00	19.77	-0.16	1.80	1.84
		7.97	1.40	3.26	194.03	-1.57	-0.17	1.68
		10.99	1.32	3.65	86.51	-0.70	0.62	2.96
		11.63	1.31	3.74	132.24	-1.07	0.23	2.67
Sacramento		-4.16	1.92	2.03	-42.02	0.34	2.26	2.38
		5.55	1.47	2.94	-161.90	1.31	2.78	4.25
		6.22	1.45	3.03	93.93	-0.76	0.69	2.27
		13.88	1.27	4.06	-34.60	0.28	1.55	4.33
		15.01	1.26	4.21	-153.25	1.24	2.50	5.45

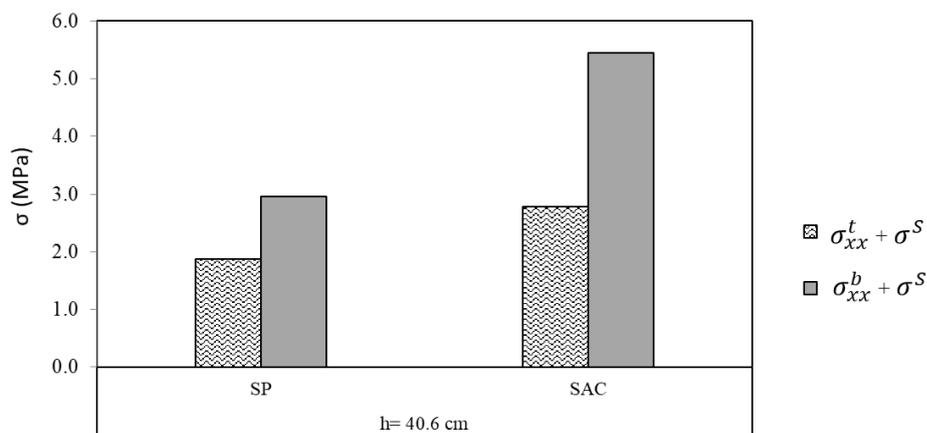


Figura B. 2.5- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 85%.

Tabela B 5- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm, LTE 0 %	-5.40	3.76	2.98	20.10	-0.13	3.63	2.85
		-4.78	3.67	3.12	24.74	-0.16	3.51	2.96
		7.97	3.40	3.35	242.78	-1.57	1.83	1.78
		10.99	3.35	3.39	108.24	-0.70	2.65	2.69
		11.63	3.31	3.43	165.46	-1.07	2.24	2.36
Sacramento	h= 50.8 cm, LTE 0 %	-4.16	3.62	3.15	-52.58	0.34	3.96	3.49
		5.55	3.45	3.30	-202.57	1.31	4.76	4.61
		6.22	1.03	3.32	117.52	-0.76	0.27	2.56
		13.88	3.29	3.46	-43.30	0.28	3.57	3.74
		15.01	3.25	3.49	-191.75	1.24	4.49	4.73

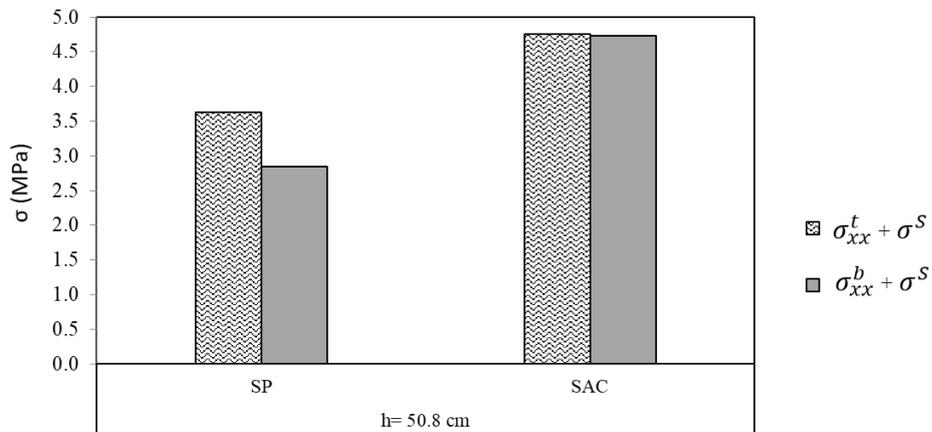


Figura B. 3.4- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 0%.

Tabela B 6- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPC com LTE85% com  $k= 13.6 \text{ MPa/m}$ .

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h = 50.8 cm, LTE 85 %	-5.40	1.32	1.89	20.10	-0.13	1.19	1.76
		-4.78	1.29	1.92	24.74	-0.16	1.13	1.76
		7.97	1.00	2.44	242.78	-1.57	-0.57	0.87
		10.99	0.96	2.57	108.24	-0.70	0.27	1.87
		11.63	0.96	2.59	165.46	-1.07	-0.12	1.52
Sacramento	h = 50.8 cm, LTE 85 %	-4.16	1.27	1.94	-52.58	0.34	1.61	2.29
		5.55	1.03	2.34	-202.57	1.31	2.34	3.65
		6.22	1.03	2.37	117.52	-0.76	0.27	1.61
		13.88	0.93	2.70	-43.30	0.28	1.21	2.98
		15.01	0.92	2.75	-191.75	1.24	2.16	3.99

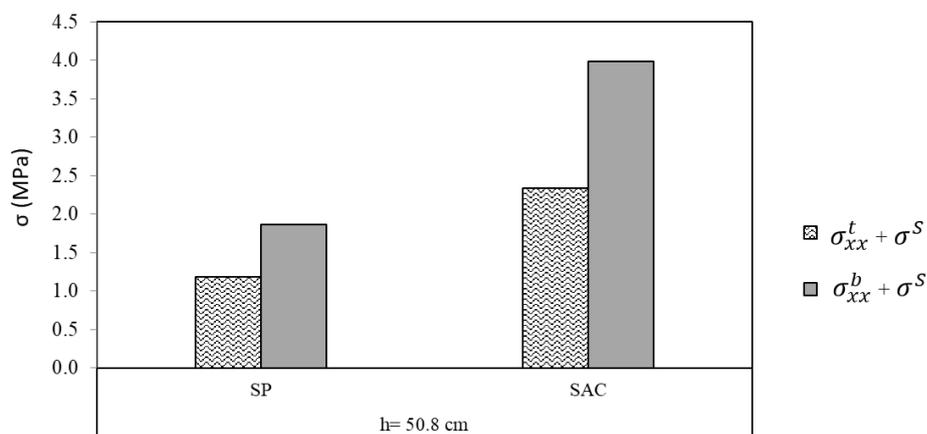


Figura B. 3.5- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPC e LTE 85%.

**Casos B747 TPC**

Tabela B 7- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE 0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h=25 e LTE 0%	-5.40	7.01	8.27	9.85	-0.13	6.88	8.14
		-4.78	6.89	8.59	12.12	-0.16	6.73	8.43
		7.97	6.65	9.28	118.96	-1.57	5.08	7.71
		10.99	6.08	9.61	53.04	-0.70	5.38	8.91
		11.63	5.97	9.75	81.08	-1.07	4.90	8.68
Sacramento	h=25 e LTE 0%	-4.16	6.78	8.31	-25.76	0.34	7.12	8.65
		5.55	6.69	9.25	-99.26	1.31	8.00	10.56
		6.22	6.09	9.43	57.59	-0.76	5.33	8.67
		13.88	5.97	9.75	-21.22	0.28	6.25	10.03
		15.01	5.85	9.88	-93.96	1.24	7.09	11.12

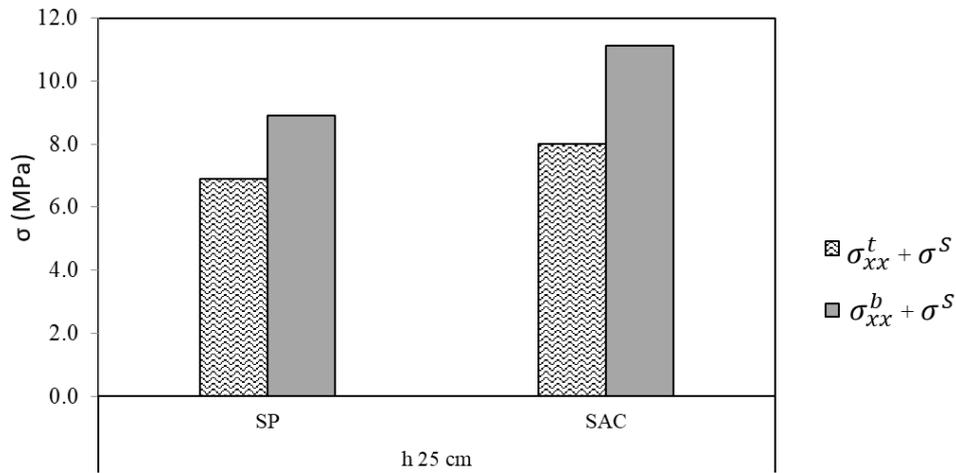


Figura B. 1.4- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 0%.

Tabela B 8- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE85% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 25 e LTE 85%	-5.40	3.17	6.62	9.85	-0.13	3.04	6.49
		-4.78	3.16	6.64	12.12	-0.16	3.00	6.48
		7.97	2.98	7.15	118.96	-1.57	1.41	5.58
		10.99	2.94	7.28	53.04	-0.70	2.24	6.58
		11.63	2.93	7.30	81.08	-1.07	1.86	6.23
Sacramento		-4.16	3.15	6.64	-25.76	0.34	3.49	6.98
		5.55	3.01	7.05	-99.26	1.31	4.32	8.36
		6.22	3.00	7.09	57.59	-0.76	2.24	6.33
		13.88	2.90	7.40	-21.22	0.28	3.18	7.68
		15.01	2.89	7.45	-93.96	1.24	4.13	8.69

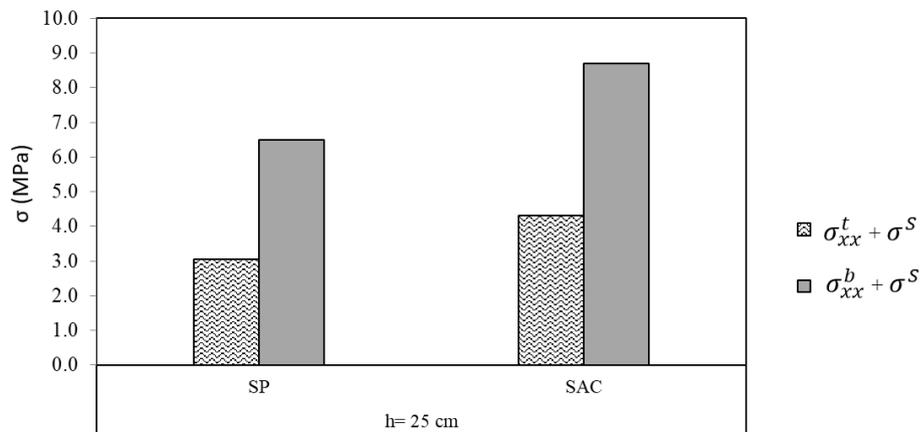


Figura B. 1.5- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 85%.

Tabela B 9- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE0% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^s$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^s$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^s$ (MPa)
São Paulo	h = 40.6 cm e LTE 0%	-5.40	2.88	3.29	16.07	-0.13	2.75	3.16
		-4.78	2.76	3.41	19.77	-0.16	2.60	3.25
		7.97	2.25	4.03	194.03	-1.57	0.68	2.46
		10.99	2.02	4.28	86.51	-0.70	1.32	3.58
		11.63	2.00	4.35	132.24	-1.07	0.93	3.28
Sacramento		-4.16	2.68	3.48	-42.02	0.34	3.02	3.82
		5.55	2.34	3.98	-161.90	1.31	3.65	5.29
		6.22	2.29	4.01	93.93	-0.76	1.53	3.25
		13.88	1.99	4.41	-34.60	0.28	2.27	4.69
		15.01	1.97	4.54	-153.25	1.24	3.21	5.78

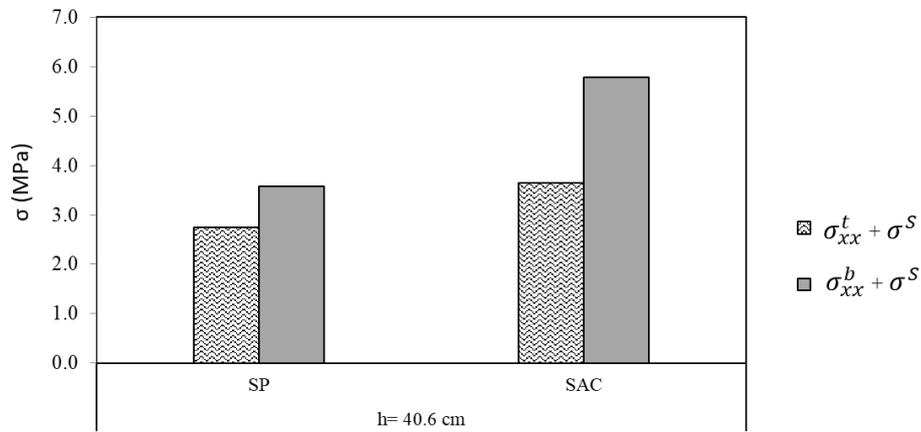


Figura B. 2.6- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 0%.

Tabela B 10- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE85% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm e LTE 85%	-5.40	1.34	2.51	16.07	-0.13	1.21	2.38
		-4.78	1.17	2.62	19.77	-0.16	1.01	2.46
		7.97	1.05	2.98	194.03	-1.57	-0.52	1.41
		10.99	1.01	3.09	86.51	-0.70	0.31	2.39
		11.63	0.98	3.14	132.24	-1.07	-0.09	2.07
Sacramento	h= 40.6 cm	-4.16	1.14	2.65	-42.02	0.34	1.48	2.99
		5.55	1.08	2.93	-161.90	1.31	2.39	4.24
		6.22	1.06	2.96	93.93	-0.76	0.30	2.20
		13.88	0.96	3.27	-34.60	0.28	1.24	3.55
		15.01	0.94	3.40	-153.25	1.24	2.18	4.64

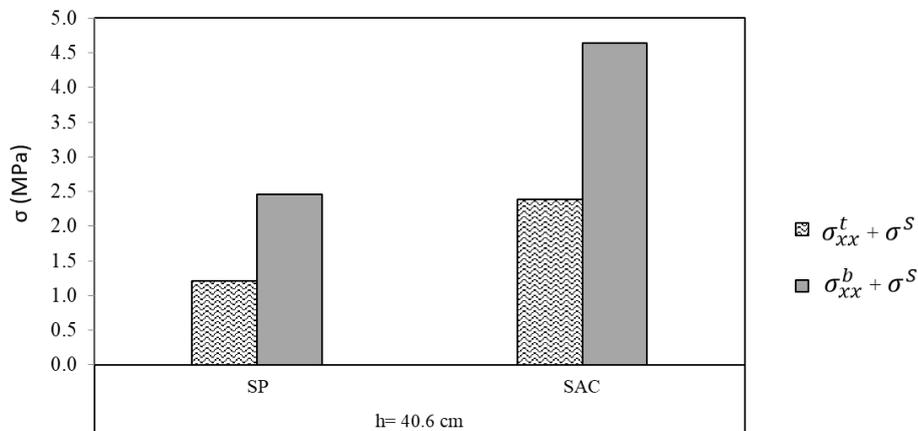


Figura B. 2.7- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 85%.

Tabela B 11- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^s$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^s$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^s$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 0%	-5.40	2.19	2.98	20.10	-0.13	2.06	2.85
		-4.78	2.18	2.99	24.74	-0.16	2.02	2.83
		7.97	1.19	3.26	242.78	-1.57	-0.38	1.69
		10.99	1.89	3.32	108.24	-0.70	1.19	2.62
		11.63	1.87	3.33	165.46	-1.07	0.80	2.26
Sacramento		-4.16	2.17	3.01	-52.58	0.34	2.51	3.35
		5.55	1.99	3.21	-202.57	1.31	3.30	4.52
		6.22	1.97	3.22	117.52	-0.76	1.21	2.46
		13.88	1.84	3.38	-43.30	0.28	2.12	3.66
		15.01	1.82	3.41	-191.75	1.24	3.06	4.65

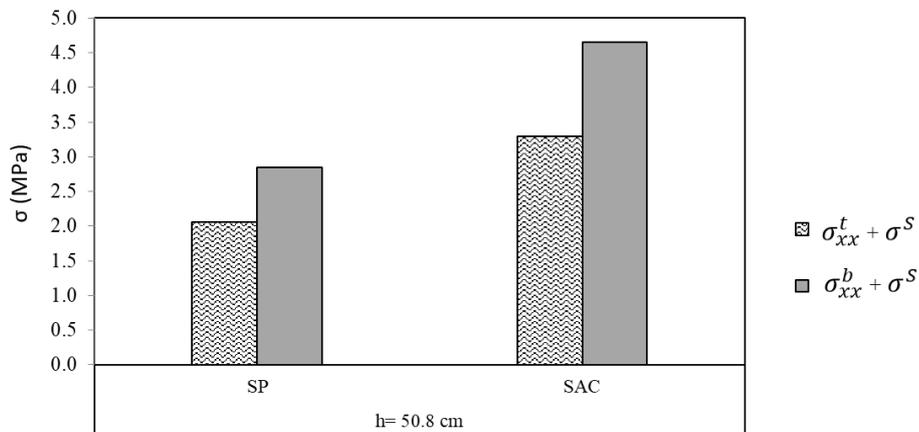


Figura B. 3.6- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 0%.

Tabela B 12- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPC com LTE85% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 85%	-5.40	0.90	2.18	20.10	-0.13	0.77	2.05
		-4.78	0.89	2.19	24.74	-0.16	0.73	2.03
		7.97	0.61	2.37	242.78	-1.57	-0.96	0.80
		10.99	0.57	2.44	108.24	-0.70	-0.13	1.74
		11.63	0.56	2.45	165.46	-1.07	-0.51	1.38
Sacramento		-4.16	0.90	2.19	-52.58	0.34	1.24	2.53
		5.55	0.65	2.33	-202.57	1.31	1.96	3.64
		6.22	0.64	2.34	117.52	-0.76	-0.12	1.58
		13.88	0.53	2.51	-43.30	0.28	0.80	2.79
		15.01	0.51	2.53	-191.75	1.24	1.75	3.77

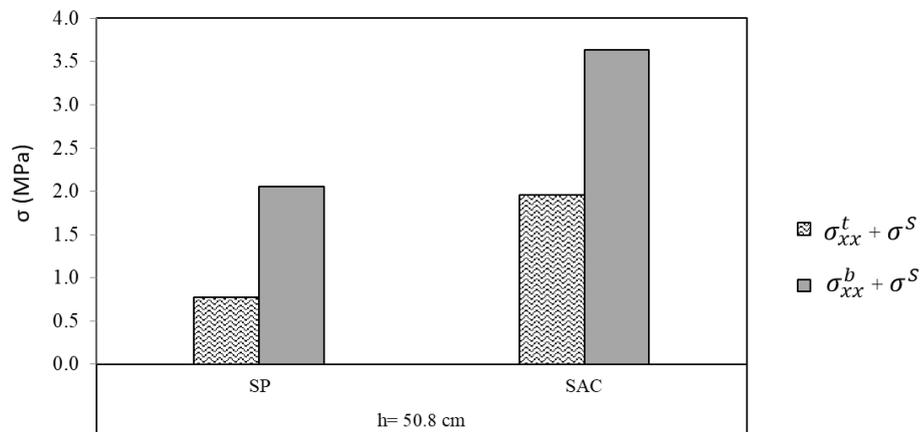


Figura B. 3.7- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPC e LTE 85%.

**Casos A380 TPP**

Tabela B 13- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPP com LTE0% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm e LTE 0%	-5.40	2.18	3.35	16.07	-0.13	2.05	3.22
		-4.78	2.16	3.38	19.77	-0.16	2.00	3.22
		7.97	1.42	4.10	194.03	-1.57	-0.15	2.53
		10.99	1.24	4.28	86.51	-0.70	0.55	3.58
		11.63	1.20	4.31	132.24	-1.07	0.13	3.24
Sacramento		-4.16	2.12	3.41	-42.02	0.34	2.47	3.76
		5.55	1.56	3.95	-161.90	1.31	2.87	5.26
		6.22	1.52	3.99	93.93	-0.76	0.77	3.24
		13.88	1.07	4.45	-34.60	0.28	1.35	4.72
		15.01	1.01	4.51	-153.25	1.24	2.25	5.75

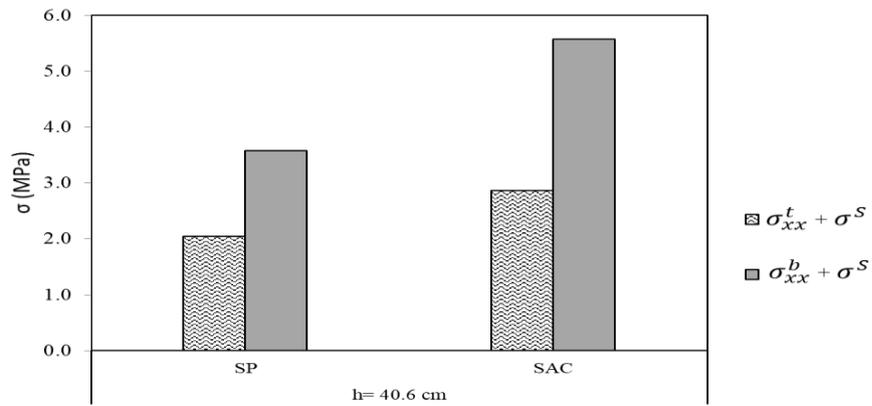


Figura B. 2.8- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPP e LTE 0%.

Tabela B 14- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPP com LTE85% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm e LTE 85%	-5.40	1.23	2.50	16.07	-0.13	1.10	2.37
		-4.78	1.19	2.52	19.77	-0.16	1.03	2.35
		7.97	0.51	3.20	194.03	-1.57	-1.06	1.63
		10.99	0.39	3.42	86.51	-0.70	-0.31	2.73
		11.63	0.36	3.47	132.24	-1.07	-0.71	2.40
Sacramento		-4.16	1.15	2.53	-42.02	0.34	1.49	2.88
		5.55	0.61	3.02	-161.90	1.31	1.92	4.33
		6.22	0.58	3.07	93.93	-0.76	-0.18	2.32
		13.88	0.27	3.63	-34.60	0.28	0.54	3.91
		15.01	0.22	3.72	-153.25	1.24	1.46	4.96

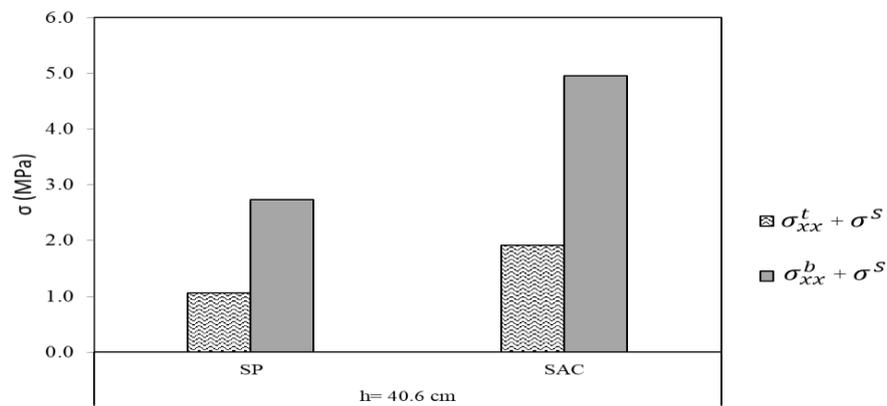


Figura B. 2.9- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPP e LTE 85%.

Tabela B 15- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPP com LTE0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 0%	-5.40	2.01	3.11	20.10	-0.13	1.88	2.97
		-4.78	2.01	3.12	24.74	-0.16	1.84	2.96
		7.97	1.79	3.37	242.78	-1.57	0.22	1.80
		10.99	1.74	3.43	108.24	-0.70	1.04	2.73
		11.63	1.72	3.44	165.46	-1.07	0.65	2.37
Sacramento		-4.16	2.00	3.13	-52.58	0.34	2.35	3.47
		5.55	1.83	3.32	-202.57	1.31	3.14	4.63
		6.22	1.82	3.34	117.52	-0.76	1.06	2.58
		13.88	1.68	3.49	-43.30	0.28	1.96	3.76
		15.01	1.66	3.51	-191.75	1.24	2.90	4.75

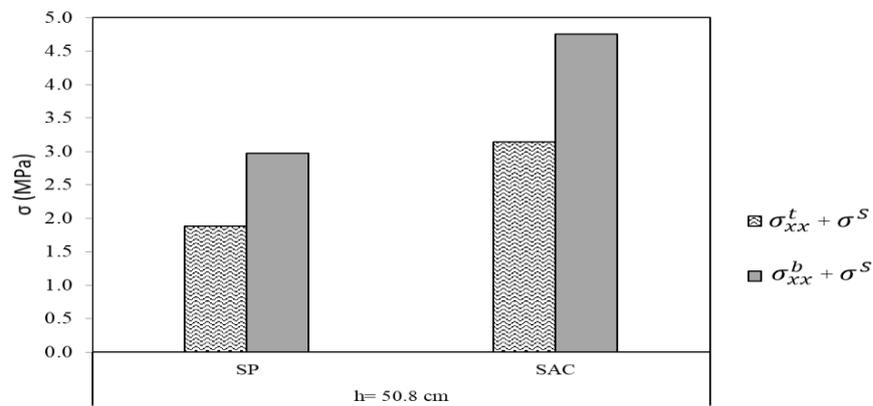


Figura B. 3.8-Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPP e LTE 0%.

Tabela B 16- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para A380 TPP com LTE85% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 85%	-5.40	1.08	2.56	20.10	-0.13	0.95	2.43
		-4.78	1.06	2.57	24.74	-0.16	0.90	2.41
		7.97	0.65	2.96	242.78	-1.57	-0.92	1.39
		10.99	0.58	3.04	108.24	-0.70	-0.12	2.34
		11.63	0.56	3.05	165.46	-1.07	-0.51	1.98
Sacramento		-4.16	1.03	2.59	-52.58	0.34	1.38	2.94
		5.55	0.70	2.90	-202.57	1.31	2.01	4.21
		6.22	0.69	2.92	117.52	-0.76	-0.07	2.16
		13.88	0.51	3.11	-43.30	0.28	0.79	3.38
		15.01	0.49	3.13	-191.75	1.24	1.73	4.38

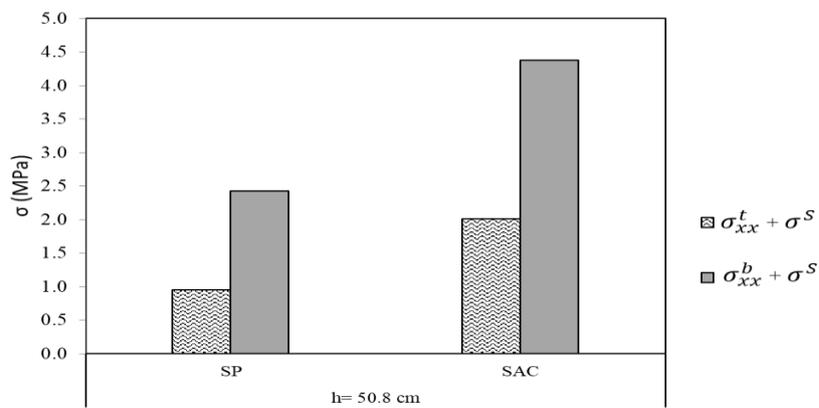


Figura B. 3.9- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do A380 TPP e LTE 85%.

**Casos TPP B747**

Tabela B 17- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPP com LTE0% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm e LTE 0%	-5.40	2.73	3.49	16.07	-0.13	2.60	3.35
		-4.78	2.70	3.52	19.77	-0.16	2.54	3.36
		7.97	1.97	4.24	194.03	-1.57	0.40	2.67
		10.99	1.78	4.42	86.51	-0.70	1.08	3.73
		11.63	1.74	4.46	132.24	-1.07	0.67	3.39
Sacramento		-4.16	2.67	3.55	-42.02	0.34	3.01	3.89
		5.55	2.13	4.09	-161.90	1.31	3.44	5.40
		6.22	2.09	4.14	93.93	-0.76	1.33	3.38
		13.88	1.59	4.60	-34.60	0.28	1.87	4.87
		15.01	1.52	4.67	-153.25	1.24	2.76	5.91

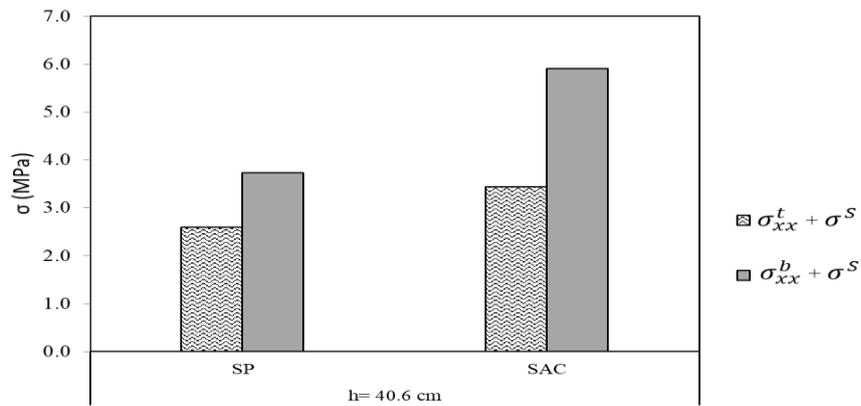


Figura B. 2.10- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPP e LTE 85%.

Tabela B 18- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPP com LTE85% com k= 40.7 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 40.6 cm e LTE 85%	-5.40	1.34	2.67	16.07	-0.13	1.20	2.54
		-4.78	1.31	2.69	19.77	-0.16	1.15	2.53
		7.97	0.96	3.25	194.03	-1.57	-0.61	1.67
		10.99	0.90	3.44	86.51	-0.70	0.21	2.75
		11.63	0.89	3.49	132.24	-1.07	-0.18	2.42
Sacramento		-4.16	1.29	2.71	-42.02	0.34	1.63	3.05
		5.55	1.00	3.09	-161.90	1.31	2.31	4.40
		6.22	0.99	3.13	93.93	-0.76	0.23	2.37
		13.88	0.85	3.64	-34.60	0.28	1.13	3.91
		15.01	0.83	3.71	-153.25	1.24	2.07	4.95

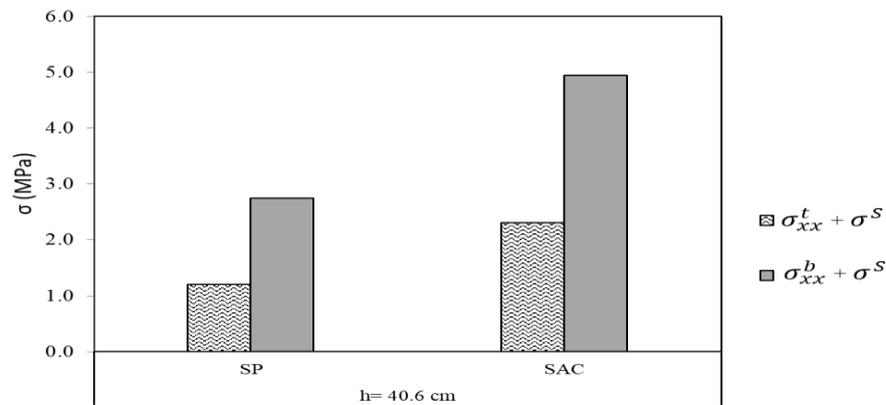


Figura B. 2.11- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPP e LTE 85%.

Tabela B 19- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPP com LTE0% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 0%	-5.40	2.32	3.25	20.10	-0.13	2.19	3.12
		-4.78	2.31	3.27	24.74	-0.16	2.15	3.10
		7.97	2.07	3.52	242.78	-1.57	0.50	1.95
		10.99	2.02	3.58	108.24	-0.70	1.32	2.89
		11.63	2.00	3.60	165.46	-1.07	0.93	2.53
Sacramento	h= 50.8 cm	-4.16	2.31	3.28	-52.58	0.34	2.65	3.62
		5.55	2.12	3.47	-202.57	1.31	3.43	4.78
		6.22	2.11	3.49	117.52	-0.76	1.35	2.73
		13.88	1.96	3.64	-43.30	0.28	2.23	3.92
		15.01	1.94	3.67	-191.75	1.24	3.18	4.91

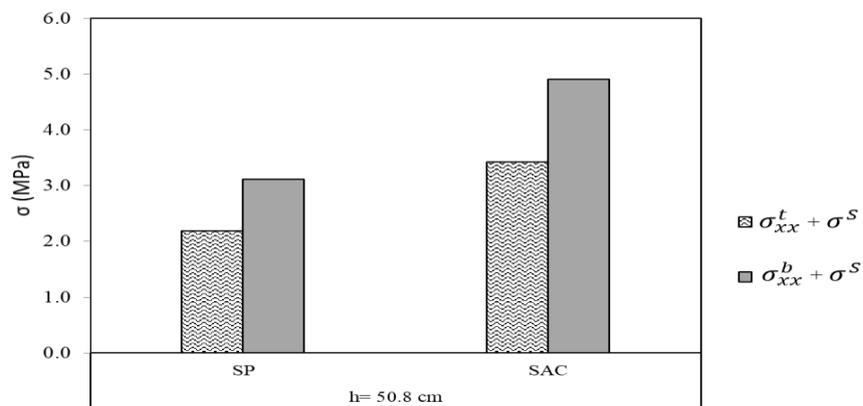


Figura B. 3.10- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPP e LTE 0%.

Tabela B 20- Tensões máximas nas cidades de São Paulo e Sacramento para B747 TPP com LTE85% com k= 13.6 MPa/m.

Cidade	h (cm)	$\Delta T$ (°C)	$\sigma_{xx}^t$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b$ (MPa)	NOLA (°C.cm)	$\sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ (MPa)	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ (MPa)
São Paulo	h= 50.8 cm e LTE 85%	-5.40	1.01	2.52	20.10	-0.13	0.88	2.39
		-4.78	1.00	2.53	24.74	-0.16	0.84	2.37
		7.97	0.79	2.82	242.78	-1.57	-0.78	1.25
		10.99	0.75	2.89	108.24	-0.70	0.05	2.19
		11.63	0.74	2.91	165.46	-1.07	-0.33	1.83
Sacramento		-4.16	0.99	2.54	-52.58	0.34	1.33	2.88
		5.55	0.82	2.76	-202.57	1.31	2.13	4.07
		6.22	0.81	2.77	117.52	-0.76	0.06	2.02
		13.88	0.71	2.96	-43.30	0.28	0.98	3.24
		15.01	0.69	2.99	-191.75	1.24	1.93	4.23

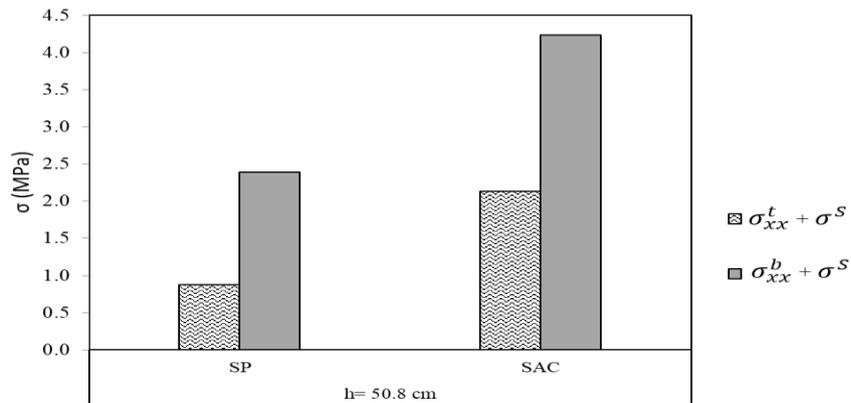


Figura B. 3.11- Comportamento das tensões para as cidades de São Paulo e Sacramento do B747 TPP e LTE 85%.

Tabela B 21- Influência da  $\sigma^S$  na espessura da placa, para TPC do B747, LTE 85%.

Profundidade (cm)		25		40		50	
Cidade	$\Delta T$ (°C)	Razão		Razão		Razão	
		$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$
São Paulo	-5.40	-0.041	-0.020	-0.098	-0.052	-0.146	-0.060
	-4.78	-0.051	-0.024	-0.137	-0.061	-0.180	-0.073
	7.97	-0.527	-0.220	-1.497	-0.527	-2.568	-0.663
	10.99	-0.237	-0.096	-0.690	-0.225	-1.231	-0.285
	11.63	-0.366	-0.147	-1.094	-0.341	-1.924	-0.437
Sacramento	-4.16	0.109	0.052	0.302	0.130	0.385	0.157
	5.55	0.435	0.186	1.212	0.447	2.011	0.562
	6.22	-0.253	-0.107	-0.715	-0.256	-1.184	-0.324
	13.88	0.095	0.037	0.287	0.084	0.524	0.110
	15.01	0.429	0.166	1.319	0.365	2.432	0.490

Tabela B 22- Razão das  $(\sigma_{xx}^t + \sigma^S / \sigma_{xx}^b + \sigma^S)$ , para TPC do B747, LTE 85%.

Profundidade (cm)		25	40	50
Cidade	$\Delta T$ (°C)	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$
		São Paulo	-5.40	0.468
-4.78	0.463		0.410	0.360
7.97	0.252		-0.370	-1.202
10.99	0.341		0.131	-0.075
11.63	0.298		-0.044	-0.373
Sacramento	-4.16	0.500	0.496	0.489
	5.55	0.517	0.564	0.539
	6.22	0.354	0.137	-0.075
	13.88	0.414	0.348	0.288
	15.01	0.475	0.470	0.464

Tabela B 23- Influência da  $\sigma^S$  na espessura da placa, para TPC do B747, LTE 0%.

Profundidade (cm)		25		40		50	
Cidade	$\Delta T$ (°C)	Razão		Razão		Razão	
		$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^t}$	$\frac{\sigma^S}{\sigma_{xx}^b}$
São Paulo	-5.40	-0.019	-0.016	-0.046	-0.040	-0.060	-0.044
	-4.78	-0.023	-0.019	-0.058	-0.047	-0.074	-0.054
	7.97	-0.236	-0.169	-0.699	-0.390	-1.321	-0.482
	10.99	-0.115	-0.072	-0.345	-0.163	-0.369	-0.210
	11.63	-0.180	-0.110	-0.536	-0.246	-0.573	-0.322
Sacramento	-4.16	0.051	0.041	0.129	0.099	0.159	0.114
	5.55	0.196	0.142	0.559	0.329	0.658	0.408
	6.22	-0.124	-0.080	-0.331	-0.189	-0.385	-0.235
	13.88	0.046	0.028	0.138	0.062	0.150	0.082
	15.01	0.212	0.126	0.630	0.273	0.681	0.364

Tabela B 24- Razão das  $(\sigma_{xx}^t + \sigma^S / \sigma_{xx}^b + \sigma^S)$ , para TPC do B747, LTE 0%.

Profundidade (cm)		25	40	50
Cidade	$\Delta T$ (°C)	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$	$\frac{\sigma_{xx}^t + \sigma^S}{\sigma_{xx}^b + \sigma^S}$
		São Paulo	-5.40	0.845
-4.78	0.798		0.800	0.714
7.97	0.659		0.276	-0.226
10.99	0.604		0.369	0.455
11.63	0.564		0.283	0.354
Sacramento	-4.16	0.823	0.791	0.750
	5.55	0.758	0.690	0.730
	6.22	0.615	0.471	0.492
	13.88	0.623	0.484	0.579
	15.01	0.638	0.555	0.658

## APÊNDICE C – TENSÕES PARA DIFERENCIAIS TÉRMICOS LINEARES PARA A CIDADE DE SÃO PAULO E SACRAMENTO

Nesta item serão mostrados os comportamentos das tensões para a cidade de São Paulo e Sacramento para diversas espessuras.

Tabela C. 1- Tensões para gradientes lineares na cidade de São Paulo com h= 25 cm e k= 13.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-5.40	3.81	4.45	16.24	-0.13	3.68	4.32
-5.17	3.79	4.47	0.00	0.00	3.79	4.47
-4.78	3.76	4.48	12.18	-0.16	3.60	4.32
-3.91	3.70	4.53	-13.53	0.18	3.87	4.71
-3.88	3.70	4.53	-13.53	0.18	3.87	4.71
-2.59	3.60	4.57	-8.12	0.11	3.71	4.68
3.23	3.22	4.96	-6.77	0.09	3.31	5.05
4.65	3.14	5.11	59.55	-0.79	2.35	4.33
7.97	2.95	5.54	119.09	-1.57	1.38	3.97
8.27	2.94	5.57	75.79	-1.00	1.94	4.57
10.99	2.82	5.98	52.78	-0.70	2.12	5.29
11.63	2.80	6.09	81.20	-1.07	1.73	5.02

Tabela C. 2- Tensões para gradientes lineares na cidade de Sacramento com h= 25 cm e k= 13.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-4.16	3.72	4.51	-26.10	0.34	4.06	4.86
-2.77	3.62	4.58	0.47	-0.01	3.61	4.58
-0.83	3.49	4.50	-62.65	0.83	4.31	5.32
0.22	3.42	4.50	40.09	-0.53	2.89	3.97
1.38	3.34	4.69	73.35	-0.97	2.37	3.72
5.55	3.09	5.21	-99.19	1.31	4.40	6.52
6.00	3.06	5.27	41.14	-0.54	2.52	4.73
6.22	3.05	5.30	57.43	-0.76	2.29	4.54
13.88	2.72	6.50	-20.88	0.28	3.00	6.77
14.05	2.72	6.53	10.44	-0.14	2.58	6.39
15.01	2.69	6.69	-93.97	1.24	3.93	7.93
16.66	2.64	6.99	-52.21	0.69	3.33	7.67

Tabela C. 3- Tensões para gradientes lineares na cidade de São Paulo com h= 40 cm e k= 40.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-5.40	2.01	1.97	16.24	-0.13	1.88	1.84
-5.17	1.99	1.98	0.00	0.00	1.99	1.98
-4.78	1.96	2.00	12.18	-0.16	1.80	1.84
-3.91	1.90	2.05	-13.53	0.18	2.07	2.23
-3.88	1.90	2.05	-13.53	0.18	2.07	2.23
-2.59	1.81	2.11	-8.12	0.11	1.92	2.22
3.23	1.56	2.63	-6.77	0.09	1.65	2.72
4.65	1.51	2.82	59.55	-0.79	0.72	2.03
7.97	1.40	3.26	119.09	-1.57	-0.17	1.68
8.27	1.39	3.29	75.79	-1.00	0.39	2.29
10.99	1.32	3.65	52.78	-0.70	0.62	2.96
11.63	1.31	3.74	81.20	-1.07	0.23	2.67

Tabela C. 4- Tensões para gradientes lineares na cidade de Sacramento com h= 40 cm e k= 40.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-4.16	1.92	2.03	-26.10	0.34	2.26	2.38
-2.77	1.82	2.11	0.47	-0.01	1.81	2.10
-0.83	1.74	2.18	-62.65	0.83	2.57	3.00
0.22	1.70	2.24	40.09	-0.53	1.17	1.71
1.38	1.64	2.39	73.35	-0.97	0.67	1.42
5.55	1.47	2.94	-99.19	1.31	2.78	4.25
6.00	1.46	3.00	41.14	-0.54	0.92	2.45
6.22	1.45	3.03	57.43	-0.76	0.69	2.27
13.88	1.27	4.06	-20.88	0.28	1.55	4.33
14.05	1.27	4.08	10.44	-0.14	1.13	3.94
15.01	1.26	4.21	-93.97	1.24	2.50	5.45
16.66	1.24	4.44	-52.21	0.69	1.93	5.13

Tabela C. 5- Tensões para gradientes lineares na cidade de São Paulo com h= 50 cm e k= 13.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-5.40	1.32	1.89	16.24	-0.13	1.19	1.76
-5.17	1.31	1.90	0.00	0.00	1.31	1.90
-4.78	1.29	1.92	12.18	-0.16	1.13	1.76
-3.91	1.26	1.96	-13.53	0.18	1.44	2.13
-3.88	1.26	1.96	-13.53	0.18	1.44	2.13
-2.59	1.21	2.00	-8.12	0.11	1.32	2.11
3.23	1.08	2.24	-6.77	0.09	1.17	2.33
4.65	1.05	2.30	59.55	-0.79	0.27	1.52
7.97	1.00	2.44	119.09	-1.57	-0.57	0.87
8.27	1.00	2.45	75.79	-1.00	0.00	1.45
10.99	0.96	2.57	52.78	-0.70	0.27	1.87
11.63	0.96	2.59	81.20	-1.07	-0.12	1.52

Tabela C. 6- Tensões para gradientes lineares na cidade de Sacramento com h= 50 cm e k= 13.7 MPa/m.

$\Delta T$ °C	$\sigma_{xx}^t$ MPa	$\sigma_{xx}^b$ MPa	NOLA °C.cm	$\sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ MPa	$\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ MPa
-4.16	1.27	1.94	-26.10	0.34	1.61	2.29
-2.77	1.21	2.00	0.47	-0.01	1.21	1.99
-0.83	1.20	2.05	-62.65	0.83	2.02	2.87
0.22	1.18	2.08	40.09	-0.53	0.65	1.55
1.38	1.14	2.15	73.35	-0.97	0.17	1.18
5.55	1.03	2.34	-99.19	1.31	2.34	3.65
6.00	1.03	2.36	41.14	-0.54	0.49	1.81
6.22	1.03	2.37	57.43	-0.76	0.27	1.61
13.88	0.93	2.70	-20.88	0.28	1.21	2.98
14.05	0.93	2.71	10.44	-0.14	0.79	2.57
15.01	0.92	2.75	-93.97	1.24	2.16	3.99
16.66	0.91	2.83	-52.21	0.69	1.60	3.52

## APÊNDICE D - TABELAS E GRÁFICOS PARA A CIDADE DE SÃO PAULO

Neste item serão mostrados os resultados analíticos e numéricos da influência dos diferenciais térmicos nas tensões lineares e não lineares para uma incidência de carga de uma aeronave A380 TPC com LTE 85% da cidade de São Paulo com uma variação na espessura da placa. A Figura D.1 demonstra o comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  para um dia ensolarado (DS) na cidade São Paulo.

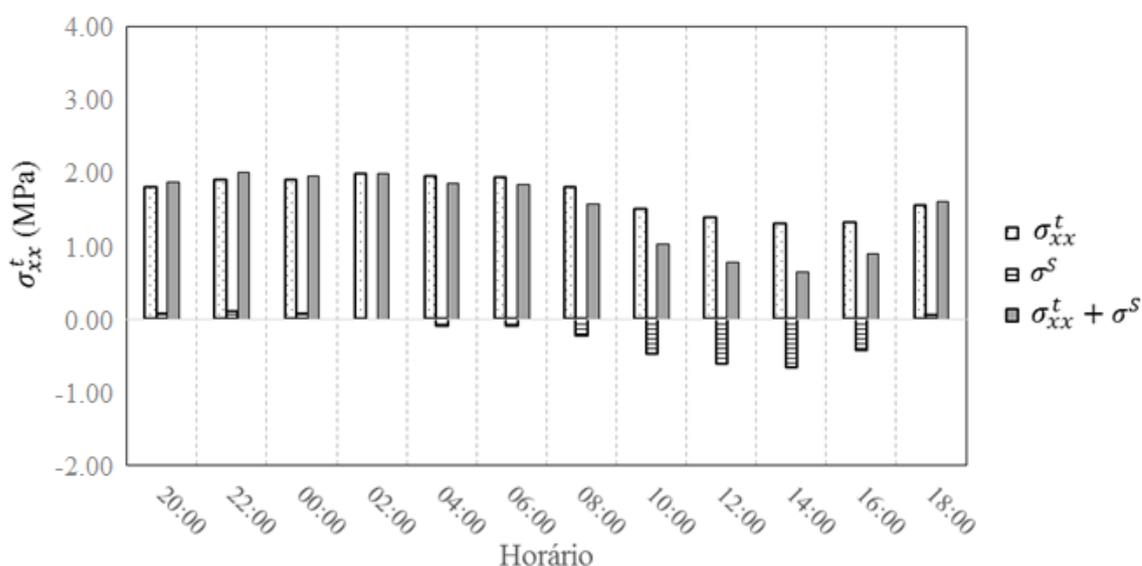


Figura D. 1- Componente de  $\sigma_{xx}^t$  e as tensões totais ( $\sigma_{xx}^t + \sigma^S$ ) em um dia ensolarado, para TPC A380, LTE 85% e  $h= 40.6$  cm.

Na Figura D. 1 apresenta que, as  $\sigma^S$  de tração sucedem no período noturno durante os horários de 18:00 às 00:00hs. Às 02:00hs acontecem a maior  $\sigma_{xx}^t$ , enquanto a  $\sigma^S$  é zero, devido as temperaturas serem análogas, ocasionando um equilíbrio térmico na placa. Já nos horários de 04:00 às 16:00hs as  $\sigma^S$  são de compressão, sendo mais significativa às 14:00hs, quando a incidência de temperatura no topo da placa aumenta, a tensão não linear reduz com a adição da  $\sigma^S$  de compressão.

O gráfico da Figura D. 2 ilustra o comportamento das  $\sigma_{xx}^b$  para um dia ensolarado (DS) na cidade São Paulo.

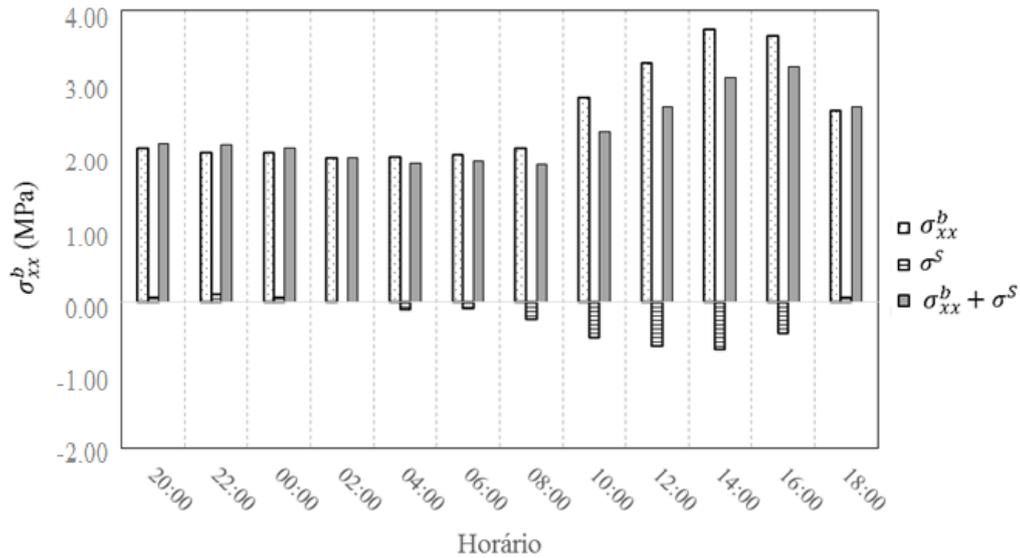


Figura D. 2- Componente de  $\sigma_{xx}^b$  e as tensões totais ( $\sigma_{xx}^b + \sigma^S$ ) em um dia ensolarado, para TPC A380, LTE 85% e h= 40.6 cm.

O gráfico da Figura D. 2 mostra que nos horários de 10:00 às 14:00hs a um incremento de tensões, enquanto das 16:00 às 18:00hs decorrem um decréscimo, isto acontece em função do decremento das temperaturas atuantes na placa. Na Figura D. 3 mostram comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  para um dia ensolarado com chuva no período (DSC) na cidade de São Paulo.

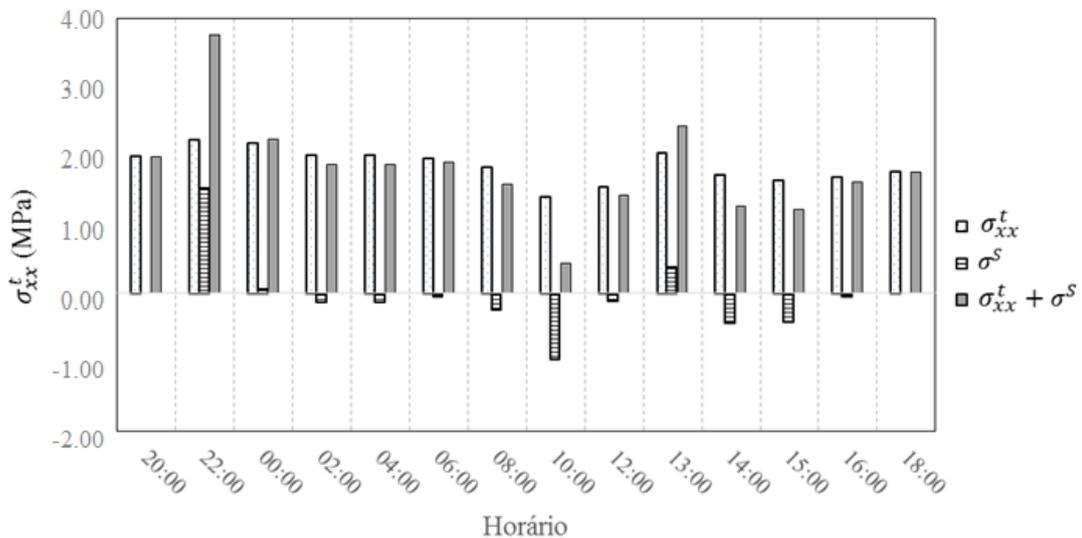


Figura D. 3- Comportamento das  $\sigma_{xx}^t$  em um dia ensolarado com chuva no período, para TPC A380, LTE 85% e h= 40.6 cm.

As tensões apresentadas no gráfico da Figura D. 3 mostra que as maiores  $\sigma_{xx}^t$  e  $\sigma^S$  são às 22:00hs pelo fato das intercorrências das temperaturas em um dia ensolarado com chuva no período. No horário das 10:00hs acontece a maior  $\sigma^S$  de compressão, devido diferenciais térmicos. Às 18:00 e 20:00hs as temperaturas de  $T_t = T_b$  provendo uma estabilidade térmica na placa, resultando em uma  $\sigma^S$  igual a zero. Na Figura D. 4 exhibe o Comportamento das  $\sigma_{xx}^b$  em um dia ensolarado com chuva no período (DSC).

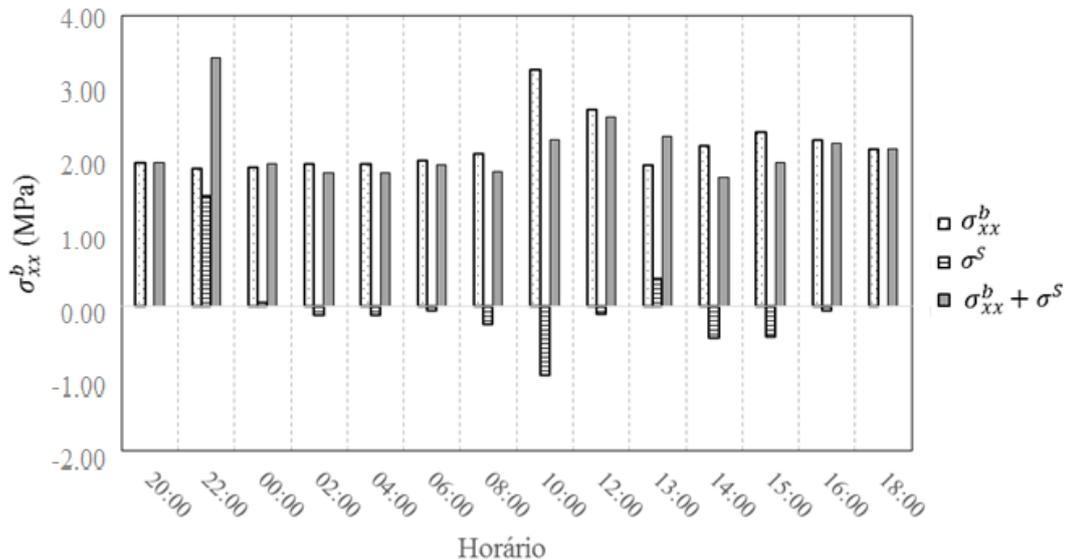


Figura D. 4- Comportamento das  $\sigma_{xx}^b$  em um dia ensolarado com chuva no período, para TPC A380, LTE 85% e h= 40.6 cm.

Diante das semelhanças da figura antecedente, percebe-se que há algumas diferenças no comportamento das tensões, citadas a seguir: a  $\sigma_{xx}^b$  máxima acontece às 10:00hs da manhã, enquanto ocorre a maior  $\sigma^S$  de compressão. Destaca-se que às 22:00hs a  $\sigma^S$  é de tração, produzindo um incremento na temperatura não linear.

AsFigura D. 5 e Figura D. 6 exibem as tensões críticas do dia ensolarado (DS) e dia ensolarado com chuva no período (DSC) para aeronave A380 TPC com LTE 85% e espessura de 40.6 cm.

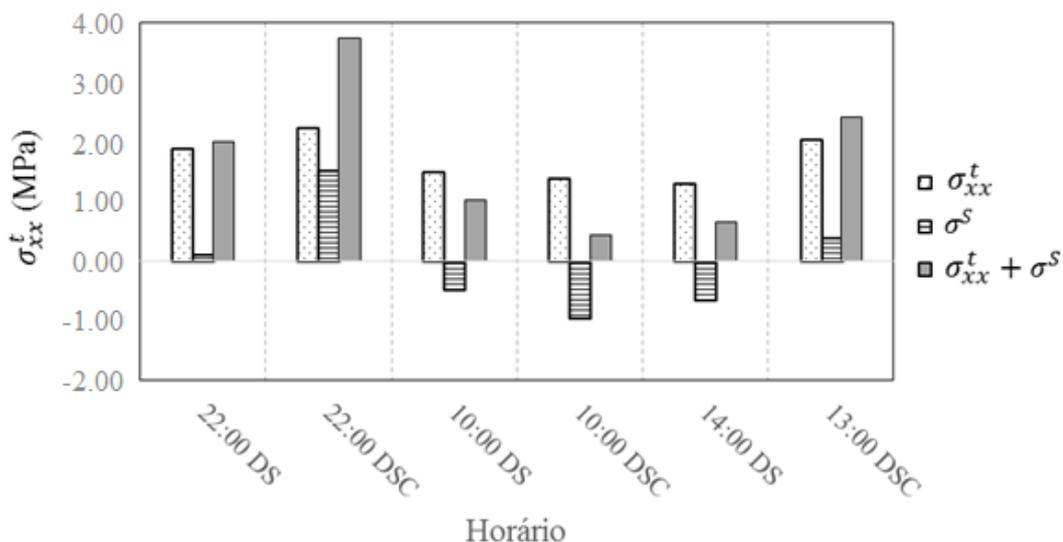


Figura D. 5- Comparação das  $\sigma_{xx}^t$  no DS e DSC, para TPC A380, LTE 85% e h= 40.6 cm.

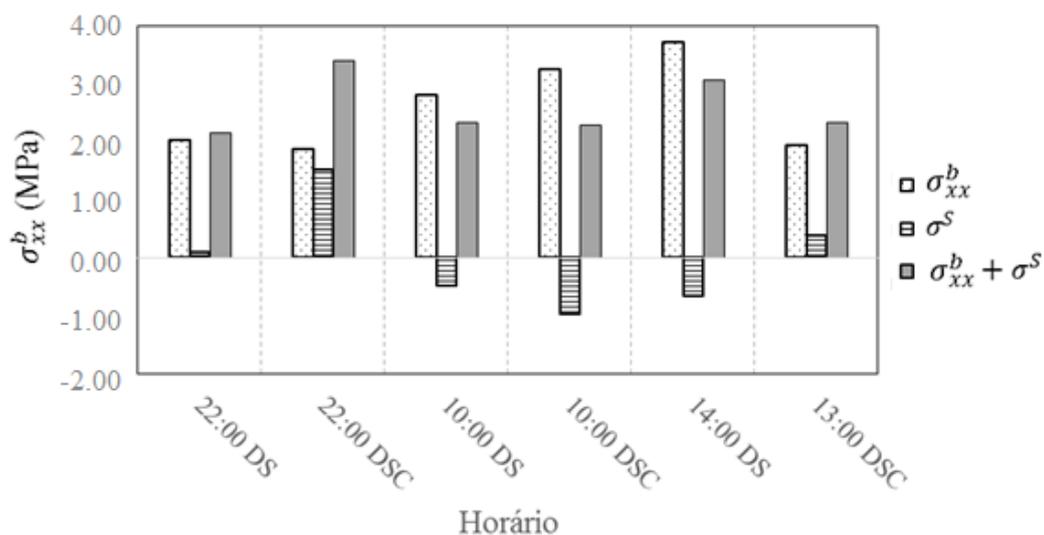


Figura D. 6- Comparação das  $\sigma_{xx}^b$  no DS e DSC, para TPC A380, LTE 85% e h= 40.6 cm.

Nos gráficos das Figura D. 5 e Figura D. 6 são os resumos das Figura D. 1 a Figura D. 4 supracitadas, sendo as maiores tensões para um dia ensolarado (DS) e um dia ensolarado com chuva no período (DSC). Nota-se que nas Figura D. 5 e Figura D. 6, no horário de 22:00hs a  $\sigma^S$  é de tração, enquanto que às 10:00hs é de compressão para os dois casos analisados DS e DSC, observa-se que às 14:00hs DS as  $\sigma^S$  são de compressão, ocorrendo o oposto às 13:00hs DSC. Isto ocorre em função das mudanças frenéticas de temperatura.