

Andréa Arantes Severi

Mestre em Engenharia, EESC-USP, 1997

**Estudo dos Gradientes Térmicos em
Pavimentos de Concreto de Cimento
Portland no Ambiente Tropical**

Tese Apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para Obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
Junho de 2.002

Andréa Arantes Severi

Mestre em Engenharia, EESC-USP, 1997

**Estudo dos Gradientes Térmicos em
Pavimentos de Concreto de Cimento
Portland no Ambiente Tropical**

Tese Apresentada à Escda
Politécnica da Universidade de São
Paulo para Obtenção do Título de
Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes.

Orientador: José Tadeu Balbo

São Paulo
Junho de 2.002

Severi, Andréa Arantes

Estudo dos Gradientes Térmicos em Pavimentos de Concreto de Cimento Portland no Ambiente Tropical. São Paulo, 2.002.

256 p.

Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Orientador: José Tadeu Balbo.

1. Pavimentos de Concreto. 2. Gradientes Térmicos.
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II.t

© Copyright 2.002
All rights reserved

***“Isso de querer ser exatamente
aquilo que somos ainda vai
nos levar além”
(Leminski)***

***Ao amigo José Tadeu Balbo
A minha família: Pedro, Amália, Marcelo e Maira
Ao Fábio***

Agradecimentos

- Ao meu orientador José Tadeu Balbo, por toda sua dedicação;
- À equipe do LMP: Deividi, André, Marcos, Alexandre, Suyen e Tatiana;
- Ao Fábio e a Silvia, por me acolherem como uma filha;
- Às minhas irmãs de coração: Ana Carolina, Dani, Drica, Márcia e Priscila, pelo amor e paciência;
- Ao Deividi, meu amigo e irmão, presente em todos os momentos;
- À *Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton* – TFB – Wildegg: Dr. Fritz Hunkeler;
- Ao Dr. Maher Badawy pela sua orientação e amizade;
- Aos amigos: Peter, Doris, Karin, Monika, Dragan, Inês, Rolf, Frank e Esther;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de doutorado;
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio individual à pesquisa concedido ao Prof. José Tadeu Balbo (Processo nº 98/11629-5), para completo financiamento da construção da pista experimental;
- À Prefeitura do Campus da Capital do Estado de São Paulo da USP, em nome do Prof. Dr. Gil da Costa Marques e engenheiro Samir Hamzo;
- Ao Centro Tecnológico de Hidráulica em nome do Prof. Dr. Mário Thadeu Leme de Barros;
- À Lafarge Concreto em nome do engenheiro Hideo Utida, pelo auxílio na moldagem dos corpos de prova para ensaios.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Quadros	xvi
Lista de Fotografias	xvii
Lista de Abreviaturas	xviii
Lista de Símbolos	xx
Resumo	xxiii
Abstract	xxv
1. Introdução	1
2. Empenamento devido à Variação Térmica	7
2.1 Estudos Teóricos Clássicos	9
2.1.1 Soluções de Westergaard	9
2.1.2 Soluções de Bradbury	18
2.1.3 Soluções de Barber	19
3. Modelagem de Gradientes Térmicos	23
3.1 Modelagem Numérica	23
3.1.1 Modelagem de Faraggi	24
3.1.2 Modelagem de Ardkins e Merkley	32
3.1.3 Modelagem de Nishisawa e Fukuda	35
3.1.4 Modelagem de Harik	39

3.1.5 Modelagem de Masad	37
3.1.6 Modelagem de Mohamed e Hansen	40
3.1.7 Modelagem de Kuo	41
3.2 Modelagem Analítica	43
3.2.1 Modelagem de Faraggi	43
3.2.2 Modelagem de Liang e Niu	47
3.2.3 Modelagem de Mirambell	47
3.2.4 Modelagem de Richardson e Armaghani	48
3.2.5 Modelagem de Choubane e Tia	53
4. Pesquisas de Campo em Países com Clima Temperado	61
4.1 Estudos Experimentais Clássicos	61
4.1.1 Bates Test Road	62
4.1.2 Arlington Experimental Farm	64
4.1.3 Pavimento de Concreto Experimental do Estado do Kansas	70
4.1.4 Pavimento de Concreto Experimental do Estado de Minnesota	71
4.1.5 AASHO Test Road	73
4.2 Estudos Experimentais Recentes	75
4.2.1 Pista Experimental do Estado da Flórida	75
4.2.2 Experimento de Campo do Chile	79
4.2.3 Experimento de Campo do Estado de Illinois	81
4.2.4 Pista de Teste do LCPC – França	85
5. Condições Climáticas na Área de Pesquisa	87
5.1 Unidades Climáticas da Cidade de São Paulo	87
5.2 Classificação Climática da Área de Pesquisa	92
5.3 Estação Meteorológica do Centro Tecnológico de Hidráulica	103
6. Construção de uma Pista Experimental em São Paulo.....	108
6.1 Execução da Pista Experimental EPUSP	110
6.2 O Concreto Empregado na Construção da Pista Experimental EPUSP	119
6.3 Instrumentação da Pista Experimental	120

6.4 Sistema de Aquisição de Dados	124
7. Monitoração de Temperaturas: 1.999 – 2.001	128
7.1 Comutações no Sistema de Aquisição de Dados	129
7.2 Tratamento dos Dados do CTH	133
7.3 Temperaturas e Diferenciais Térmicos Observados	135
7.3.1 Temperaturas e Diferenciais Térmicos ao Longo das Estações Climáticas	138
7.3.2 Valores Extremos Obtidos	153
7.3.3 Taxas de Crescimento e Queda da Temperatura	154
7.3.4 Descrição dos Efeitos Específicos do Clima	158
7.3.4.1 Dia quente ensolarado	159
7.3.4.2 Efeitos de uma chuva tropical	161
7.3.4.3 Efeitos de ocorrência de múltipla inversão	162
7.3.4.4 Diferencial térmico positivo ou nulo o dia todo	164
7.3.4.5 Diferencial térmico negativo o dia todo	166
7.3.4.6 Efeito de um dia nublado	167
7.3.4.7 Efeito de um dia com chuvisco	170
7.4 Efeitos Relacionados à Presença de Umidade na Base	172
7.5 Não Linearidade dos Diferenciais Térmicos	175
7.6 Frequência de Distribuição dos Diferenciais Térmicos	181
8. Análise dos Efeitos do Clima em Regime Tropical	196
8.1 Clima Tropical <i>versus</i> Clima Temperado	196
8.2 Modelo de Previsão de Diferenciais Térmicos Positivos para a Área de Estudo	202
8.2.1 Modelos para previsão da temperatura de topo	204
8.2.2 Modelos de Previsão do Diferencial Térmico Máximo	207
8.2.3 Modelo de previsão do diferencial térmico positivo proposto por Kuo	209
8.2.4 Modelo proposto <i>versus</i> modelo de Kuo	211
8.3 Previsão dos Efeitos da Não Linearidade sobre os Pavimentos de Concreto de Cimento Portland	218
8.4 Resultados Obtidos <i>versus</i> Método de Projeto Vigente	222

Conclusões	228
Referências Bibliográficas	236
Anexo I – Controle Tecnológico do Concreto Empregado na Pista Experimental EPUSP.....	244
Anexo II – Dados Coletados na Pista Experimental EPUSP para as Seções A, C e D.....	249

Lista de Figuras

Figura 2.1	Empenamento diurno e noturno de placas de concreto (adaptada de Huang, 1993)	8
Figura 2.2	Empenamento diurno e ação do peso próprio da placa de CCP (adaptada de Rodolfo, 2001)	8
Figura 2.3	Coeficientes de Bradbury (adaptada de Bradbury, 1938).	19
Figura 2.4	Distribuição da Insolação (adaptada de Barber, 1957).....	21
Figura 3.1	Posicionamento das cargas (Adaptada de Faraggi <i>et al.</i> 1987)	25
Figura 3.2	Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego e gradientes térmicos – centro	27
Figura 3.3	Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego e gradientes térmicos – junta transversal	28
Figura 3.4	Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego – centro	28
Figura 3.5	Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego – junta transversal	29
Figura 3.6	Tensões máximas causadas pelo gradiente térmico – centro	29
Figura 3.7	Transferência de calor em pavimentos de concreto (adaptada de Adkins e Merkley, 1990)	33

Figura 3.8	Tensões devidas ao empenamento-Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard - Bradbury (1938) - espessura de 230 mm	37
Figura 3.9	Tensões devidas ao empenamento-Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard-Bradbury (1938) - espessura de 250 mm	37
Figura 3.10	Tensões devidas ao empenamento-Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard-Bradbury (1938) - espessura de 270 mm	38
Figura 3.11	Tensões devidas à temperatura em pavimentos de concreto (Fonte: Richardson e Armaghani, 1987)	52
Figura 3.12	Variação típica de temperatura através da placa e seus três componentes (Fonte:Choubane e Tia, 1992 e 1995)..	54
Figura 4.1	Variação da temperatura em pavimentos durante o <i>Bates Test Road</i> (adaptado de Older, 1924)	63
Figura 4.2	Posicionamento dos instrumentos (adaptado de Barenberg e Zollinger, 1990)	81
Figura 4.3	Deformações medidas em campo e calculadas utilizando o ILLI-SLAB (adaptado de Barenberg e Zollinger, 1990)..	84
Figura 5.1	Região Metropolitana e Município de São Paulo (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo - http://www.prodam.sp.gov.br)	88
Figura 5.2	Mapa das Unidades Climáticas Naturais da cidade de São Paulo (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo- http://www.prodam.sp.gov.br)..	89
Figura 5.3	Unidade Climática Natural da Área de Pesquisa-IB6a (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo- http://www.prodam.sp.gov.br)	90
Figura 5.4	Mapa das Unidades Climáticas Urbanas da cidade de São Paulo (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo- http://www.prodam.sp.gov.br).....	91

Figura 5.5	Unidade Climática Urbana da Área de Pesquisa (ID2) (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo- http://www.prodam.sp.gov.br)	92
Figura 5.6	Insolação (1.999) em São Paulo (Fonte: www.inmet.gov.br)	98
Figura 5.7	Insolação (1.999) em Cuiabá (Fonte: www.inmet.gov.br)..	98
Figura 5.8	Insolação (1.999) em Belém (Fonte: www.inmet.gov.br)...	98
Figura 5.9	Insolação (1.999) em Porto Alegre (Fonte: www.inmet.gov.br)	99
Figura 5.10	Insolação (1.999) em Salvador (Fonte: www.inmet.gov.br)	99
Figura 5.11	Insolação (1.999) em Belo Horizonte (Fonte: www.inmet.gov.br)	99
Figura 5.12	Nebulosidade (1.999) em Porto Alegre (Fonte: www.inmet.gov.br)	100
Figura 5.13	Nebulosidade (1.999) em São Paulo (Fonte: www.inmet.gov.br)	100
Figura 5.14	Nebulosidade (1.999) em Brasília (Fonte: www.inmet.gov.br)	101
Figura 5.15	Níveis de Insolação média (horas/mês) (Fonte: www.inmet.gov.br)	102
Figura 5.16	Níveis de Precipitação média (mm/mês) (Fonte: www.inmet.gov.br)	102
Figura 5.17	Dados meteorológicos fornecidos pelo CTH	105
Figura 5.18	Fita do heliógrafo (CTH)	106
Figura 5.19	Histograma de temperatura e umidade relativa do ar (CTH)	107
Figura 6.1	Projeto da pista experimental EPUSP	110
Figura 6.2	Posicionamento dos instrumentos	121
Figura 6.3	Localização dos PT-100 em perfil, placa C2	122
Figura 6.5	Localização dos <i>strain gages</i> em perfil, placa C2	123

Figura 7.1	Gráfico com dados meteorológicos e leituras de Campo	138
Figura 7.2	Pontos limite para o cálculo das taxas de elevação e queda de temperaturas (esquemático)	155
Figura 7.3	Variação da temperatura - situação típica	159
Figura 7.4	Variação da temperatura ao longo da profundidade da placa para a situação típica (11/12/2.000)	159
Figura 7.5	Variação da temperatura em um dia quente ensolarado (08/02/2.001)	160
Figura 7.6	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia quente ensolarado (08/02/2.001)	160
Figura 7.7	Variação da temperatura em um dia de chuva tropical (23/01/2.001)	161
Figura 7.8	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante uma chuva tropical (23/01/2.001)	162
Figura 7.9	Variação da temperatura em um dia com múltipla inversão (10/12/2.000)	163
Figura 7.10	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa em um dia com múltipla inversão (10/12/2.000)	164
Figura 7.11	Variação da temperatura em um dia com gradiente positivo (16 a 19/10/2.000)	165
Figura 7.12	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para diferencial térmico positivo o dia todo (17/10/2.000)	165
Figura 7.13	Variação da temperatura em um dia com gradiente térmico negativo (13 e 14/12/2.000)	166
Figura 7.14	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para diferencial negativo o dia todo (14/11/2.000) ..	167
Figura 7.15	Variação da temperatura em um dia nublado (09/12/1.999)	168
Figura 7.16	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (09/12/1.999)	168

Figura 7.17	Variação da temperatura em um dia nublado (03/07/2.000)	169
Figura 7.18	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (03/07/2.000)	169
Figura 7.19	Variação da temperatura em um dia nublado (04/07/2.000)	170
Figura 7.20	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (04/07/2.000)	170
Figura 7.21	Variação da temperatura em um dia com chuvisco (01/12/2.000)	171
Figura 7.22	Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia com chuvisco (01/12/2.000)	171
Figura 7.23	Efeito de Presença de Umidade no Fundo da Placa (14/03/2.000)	174
Figura 7.24	Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de Primavera	177
Figura 7.25	Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de verão	178
Figura 7.26	Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de Outono	179
Figura 7.27	Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de inverno	180
Figura 7.28	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera - placas de 150 mm (todos os dias de leitura)	181
Figura 7.29	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão - placas de 150 mm (todos os dias de leitura)....	182
Figura 7.30	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono - placas de 150 mm (todos os dias de leitura) ...	182
Figura 7.31	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno - placas de 150 mm (todos os dias de leitura)	183

Figura 7.32	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera - placas de 250 mm (todos os dias de leitura)	183
Figura 7.33	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão - placas de 250 mm (todos os dias de leitura)	184
Figura 7.34	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono - placas de 250 mm (todos os dias de leitura)...	184
Figura 7.35	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno - placas de 250 mm (todos os dias de leitura) ..	185
Figura 7.36	Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras - placas de 150 mm	185
Figura 7.37	Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras - placas de 250 mm	186
Figura 7.38	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de primavera - placas de 150 mm	186
Figura 7.39	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de verão - placas de 150 mm	187
Figura 7.40	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de outono - placas de 150 mm	187
Figura 7.41	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de inverno - placas de 150 mm	188
Figura 7.42	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de primavera - placas de 250 mm	188
Figura 7.43	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de verão - placas de 250 mm	189
Figura 7.44	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de outono - placas de 250 mm	189
Figura 7.45	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de inverno - placas de 250 mm	190
Figura 7.46	Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos - placas de 150 mm	190

Figura 7.47	Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos - placas de 250 mm	191
Figura 7.48	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera - placa A3 (todas as leituras)	193
Figura 7.49	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão - placa A3 (todas as leituras)	193
Figura 7.50	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono - placa A3 (todas as leituras)	194
Figura 7.51	Freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno - placa A3 (todas as leituras)	194
Figura 7.52	Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras da placa A3	195
Figura 8.1	Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da espessura da placa ($T_{ar} = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 1500$ mm e $v_v = 1,1$ m/s)	210
Figura 8.2	Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da velocidade do vento ($h = 250$ mm, $T_{ar} = 20^{\circ}\text{C}$ e $P = 1500$ mm)	210
Figura 8.3	Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da temperatura do ar ($h = 250$ mm, $v_v = 1,1$ m/s e $P = 1500$ mm)	210
Figura 8.4	Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da precipitação ($h = 250$ mm, $v_v = 1,1$ m/s e $T_{ar} = 20^{\circ}\text{C}$) ...	211
Figura 8.5	Comparação entre o modelo de previsão de proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm e ano cheio	212
Figura 8.6	Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm e ano cheio	213

Figura 8.7	Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm, primavera/verão, com e sem presença de umidade de fundo	213
Figura 8.8	Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm, primavera/verão, com e sem presença de umidade de fundo	214
Figura 8.9	Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm, outono/inverno	214
Figura 8.10	Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm, outono/inverno	215
Figura 8.11	Tensão devida ao diferencial térmico linear e não linear	221
Figura 8.12	Tensões de tração na flexão calculadas a partir do método da PCA/84 e dos modelos propostos por Rodolfo (2001)	226

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	H/C em função de F (Fonte: Barber, 1957)	22
Tabela 3.1	Valores dos parâmetros de projeto considerados no estudo (Fonte: Faraggi <i>et al.</i> 1986; 1987)	24
Tabela 3.2	Acréscimos nas tensões obtidas pela ação simultânea das cargas do tráfego e gradientes térmicos comparadas as tensões obtidas separadamente (Fonte: Faraggi <i>et al.</i> , 1986; 1987)	30
Tabela 3.3	Valores de A, B, C e R^2 apresentados por Richardson e Armaghani (1987)	50
Tabela 3.4	Tensões obtidas utilizando o FEACONS IV e as equações de Westergaard-Bradbury (Fonte: Choubane e Tia, 1992)	58
Tabela 4.1	Valores médios de temperaturas e diferenciais térmicos obtidos entre 1.931 e 1.935 (Fonte: Teller e Sutherland, 1935)	67
Tabela 5.1	Condições climáticas no Estado de São Paulo (Setzer, 1960)	95
Tabela 7.1	Comutação realizada em 09/08/2.000	130
Tabela 7.2	Comutação realizada em 08/11/2.000	131
Tabela 7.3	Comutação realizada em 28/11/2.000	131
Tabela 7.4	Comutação realizada em 05/01/2.001	132
Tabela 7.5	Dias típicos para seção A – A1	139
Tabela 7.6	Dias típicos para seção A – A2	140

Tabela 7.7	Dias típicos para seção A – A3	141
Tabela 7.8	Dias típicos para seção C – C2a	142
Tabela 7.9	Dias típicos para seção C – C2b	143
Tabela 7.10	Dias típicos para seção D – D2c	144
Tabela 7.11	Dias típicos para seção D – D2d	145
Tabela 7.12	Valores de temperaturas e diferenciais térmicos - Seção A.	146
Tabela 7.13	Valores de temperaturas e diferenciais térmicos - Seção C2 e D2	147
Tabela 7.14	Gradientes térmicos obtidos	152
Tabela 7.15	Média dos gradientes térmicos positivos e negativos	153
Tabela 7.16	Taxas de elevação e decréscimo de temperaturas (°C/h).	156
Tabela 7.17	Resumo das freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos positivos	191
Tabela 8.1	Comparação entre análise linear e não linear (quadrática) de temperaturas	220
Tabela 8.2	Coeficientes de regressão para placa de 5,50 m de comprimento e subleito com módulo de reação de 30 MPa/m (Rodolfo, 2001)	225
Tabela 8.3	Tensões de tração na flexão calculadas a partir do método da PCA/84 e dos modelos propostos por Rodolfo (2001)	225
Tabela I.1	Resistência à compressão simples e módulo de deformação	244
Tabela I.2	Resistência à compressão simples da seção A aos 7 dias	244
Tabela I.3	Resistência à compressão simples da seção A aos 28 dias	245
Tabela I.4	Resistência à compressão simples da seção B aos 7 dias	245
Tabela I.5	Resistência à compressão simples da seção B aos 68 dias	245

Tabela I.6	Resistência à compressão simples da seção C aos 55 dias	245
Tabela I.7	Resistência à compressão simples da seção D aos 7 dias	245
Tabela I.8	Resistência à compressão simples da seção D aos 41 dias	246
Tabela I.9	Resistência à compressão simples da seção E aos 8 dias	246
Tabela I.10	Resistência à compressão simples da seção E aos 28 dias	246
Tabela I.11	Resistência à tração na flexão da seção A aos 27 dias	247
Tabela I.12	Resistência à tração na flexão da seção B aos 68 dias	247
Tabela I.13	Resistência à tração na flexão da seção C aos 55 dias	247
Tabela I.14	Resistência à tração na flexão da seção D aos 27 dias	247
Tabela I.15	Resistência à tração na flexão da seção E aos 28 dias	248
Tabela II.1	Todas as leituras da seção A - Placa A1	250
Tabela II.2	Todas as leituras da seção A - Placa A2	251
Tabela II.3	Todas as leituras da seção A - Placa A3	252
Tabela II.4	Todas as leituras da seção C - Placa C2a	253
Tabela II.5	Todas as leituras da seção C - Placa C2b	254
Tabela II.6	Todas as leituras da seção D - Placa D2c	255
Tabela II.7	Todas as leituras da seção D - Placa D2d	256

Lista de Quadros

Quadro 4.1	Estudos Experimentais Clássicos	61
Quadro 6.1	Informações sobre condições ambientais durante a concretagem	117
Quadro 6.2	Dosagem do concreto de cimento Portland da pista experimental	120
Quadro 6.3	Dosagem do concreto compactado com rolo da pista experimental	120
Quadro 7.1	Condições dos instrumentos de medida de temperatura (PT-100)	128
Quadro 7.2	Dias de leituras	129
Quadro 7.3	Dados meteorológicos	134
Quadro 7.4	Número de Horas de Insolação (NHI)	135
Quadro 7.5	Planilha eletrônica com os dados tabulados e Tratados.....	137
Quadro 8.1	Resultados em pistas experimentais construídas em climas temperados e a pista experimental em São Paulo ..	198

Lista de Fotografias

Foto 6.1	Terraplenagem e estação de coleta	111
Foto 6.2	Lançamento do CCR	112
Foto 6.3	Compactação do CCR	112
Foto 6.4	Espalhamento da BGS	113
Foto 6.5	Compactação da BGS	113
Foto 6.6	Aplicação da imprimação impermeabilizante na BGS	113
Foto 6.7	Lençol plástico	114
Foto 6.8	Detalhe da instalação dos <i>strain gages</i> e PT-100	114
Foto 6.9	Detalhe do sepultamento dos termoresistores (PT-100) e <i>strain gages</i>	115
Foto 6.10	Deempenho do concreto da seção A	115
Foto 6.11	Aplicação de produto de cura anti-sol	115
Foto 6.12	Detalhe da textura do pavimento acabado	116
Foto 6.13	Cura do concreto da seção A	116
Foto 6.14	Detalhe das cunhas para fechamento das canaletas	117
Foto 6.15	Guias e sarjeta	118
Foto 6.16	Execução de boca de lobo	118
Foto 6.17	Execução do acesso a pista experimental	118
Foto 6.18	Vista da pista experimental acabada	119
Foto 6.19	PT- 100	122
Foto 6.20	<i>Strain Gage</i>	123
Foto 6.21	Condicionador de Sinais e Conversor analógico Digital ...	125
Foto 6.22	Microcomputador e placas de terminais	125

Lista de Abreviaturas

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCP	Concreto de Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado Com Rolo
CPqDCC	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEACONS	Finite Element Analysis Of Concrete Slabs
FFLCH-USP	Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LMP	Laboratório de Mecânica de Pavimentos

NI	Não Inversão
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
TFB	<i>Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton</i>

Lista de Símbolos

α	Coeficiente de expansão térmica
DT_0	Variação da temperatura do ar
DT	Gradiente térmico
e_x	Deformação específica na direção X
e_y	Deformação específica na direção Y
μ	Coeficiente de <i>Poisson</i>
l	Condutividade térmica
r	Massa específica
σ	Tensão de tração na flexão
σ_x	Tensão na direção X
σ_y	Tensão na direção Y
σ_{axial}	Tensão devida a componente de temperatura axial
σ_{emp}	Tensão devida a componente de temperatura que causa empenamento
σ_{nl}	Tensão devida a componente de temperatura não linear
a	Difusividade térmica
$A, B e C$	Fatores de ajuste da regressão linear
b	Largura da placa
C	Calor específico do corpo
C_1, C_2, C_3	Constantes de regressão PCA/84 (Balbo, 2002)

C_x e C_y	Coeficientes de Bradbury
DT	Diferencial Térmico
$DT+$	Diferencial térmico positivo
$DT-$	Diferencial térmico negativo
E	Módulo de elasticidade, módulo de deformação (do CCP)
E_b	Módulo de elasticidade da base
$f_{ct,M}$	Resistência média à tração na flexão do concreto
h	Espessura da placa de CCP
H	Umidade relativa do ar
h	Coeficiente superficial de transmissão de calor
h_b	Espessura da base
H_f	Umidade de fundo (sob a placa de CCP)
$I, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$	Constantes de regressão (Rodolfo, 2001)
I	Radiação solar
I_0	Constante solar
k	Módulo de reação do subleito
l	Raio de rigidez relativo da placa de CCP sobre uma fundação de Winkler
M	Momento fletor
M_x	Momento fletor na direção x
M_y	Momento fletor na direção y
NHI	Número de Horas de Insolação
P	Carga por eixo
P	Precipitação
Q	Carga
R	Contribuição da temperatura efetiva do ar
Rs	Absorção superficial da radiação solar
s	Calor específico
s	Desvio padrão
T	Temperatura
t	Tempo
T_0	Variação da temperatura na superfície do pavimento

T_{0t}	Temperatura na superfície do pavimento no instante t
$T1$	Taxa de elevação da temperatura de topo
$T2$	Taxa de elevação da temperatura de fundo
$T3$	Taxa de decréscimo de temperatura de topo
$T4$	Taxa de decréscimo de temperatura de fundo
T_{ar}	Temperatura do ar
T_{axial}	Componente de temperatura que causa deslocamentos axiais
t_c	Período de variação de ciclos de temperatura
T_{emp}	Componente de temperatura que causa empenamento
T_f	Temperatura na base da placa
T_I	Acréscimo de temperatura devido à insolação
T_M	Temperatura média
T_m	Temperatura no meio da placa
$T_{máx}$	Temperatura máxima efetiva
T_{nl}	Componente de temperatura não linear
T_R	Amplitude de variação senoidal da temperatura do ar no tempo
T_t	Temperatura no topo da placa
$T_{t,máx}$	Temperatura de topo máxima
T_v	Variação máxima de temperatura do ar em relação à média T_M
T_{zt}	Temperatura na profundidade z no instante t
v_v	Velocidade do vento
x	Coordenada na direção X
y	Profundidade abaixo da superfície
y	Coordenada na direção Y
Z	Coordenada perpendicular ao plano xy
z	Deslocamento vertical

Resumo

Setenta e nove anos após a realização do primeiro experimento em clima temperado no qual foi considerado o efeito térmico em pavimentos de concreto de cimento Portland, constrói-se a primeira pista experimental em clima tropical com o intuito de verificar os efeitos térmicos para este regime climático. O presente trabalho apresenta os resultados de mais de um ano de monitoração em uma pista experimental construída no campus da Universidade de São Paulo em São Paulo, uma região de clima tropical úmido de altitude.

Foram avaliados os padrões de distribuição da temperatura ao longo das estações climáticas e como estas distribuições são afetadas pela temperatura do ar, pela umidade relativa do ar e pela radiação solar. Resultados obtidos em pista indicaram por diferenciais térmicos positivos atingindo 25°C durante o verão bem como gradientes térmicos não lineares em 95% do tempo.

Apresentam-se modelos empírico-estatísticos para a previsão da temperatura máxima de topo e dos diferenciais térmicos positivos máximos em pavimentos de concreto em clima tropical. Análises das tensões de empenamento considerando a não linearidade do gradiente térmico

resultaram em tensões até 100% superiores em relação à análise puramente linear.

O presente trabalho venceu a complexidade da análise experimental mencionada no método de dimensionamento atualmente utilizado no Brasil, mostrando que o efeito combinado das cargas e dos gradientes térmicos positivos eleva expressivamente a tensão de tração na flexão nas placas de concreto, exigindo a partir de sua conclusão esforços de pesquisa para a construção de um método menos deficiente de projeto para as condições do Brasil.

Abstract

Almost eighty years after the first American research into climate effects on plain jointed concrete pavements, the first similar experiment was built in a tropical climate. This work aims to systematically present and discuss the results obtained from more than one year records of temperature monitoring at the concrete pavement experimental site on the campus of the University of São Paulo in São Paulo, Brazil, near the Tropic of Capricorn (parallel $23^{\circ}27'$ S).

Temperature distribution patterns through slab thicknesses were evaluated, as well as how these patterns are influenced by weather conditions such as air temperature and moisture and solar radiation. Positive thermal differentials of 25°C were often recorded during the summer, and nonlinear distributions for thermal gradients were observed for almost all days during which measurements were obtained.

Empirical-statistical models based on both concrete pavement temperatures and daily climate data were developed in order to allow the prediction of slab top temperature and thermal differential through the slabs for tropical climates. Stress analysis of curling, using a finite element program, and taking into account the typical results obtained during the research, demonstrated the dramatic increase in stresses due to curling, especially for nonlinear thermal gradients.

The present research overcomes the complexities often mentioned as being associated with the design method currently used in Brazil, by showing how the combined effects of loads and positive thermal gradients can be taken into account in calculation of stresses in concrete slabs. This research demonstrates the need for development of a new concrete pavement design procedure more appropriate to the conditions in Brazil.

1

Introdução

“... ao longo dos últimos dez anos, os pavimentos de concreto de cimento Portland vêm ocupando um espaço cada vez mais amplo no processo de desenvolvimento urbano e rodoviário ... o que certamente os tornarão objeto de inúmeras investigações científico - tecnológicas ...” Balbo (1989).

Cinco anos depois, tem início o processo de concessões rodoviárias, fazendo com que venha à tona o interesse das empresas, que pretendem participar ou já estão participando de processos licitatórios, por pavimentos de concreto.

O interesse atual pelos pavimentos de concreto deve preceder de pesquisa tecnológica e aplicada, principalmente relacionada à análise das variáveis consideradas nos métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto utilizados no Brasil pois, o maior fator considerado na escolha de que tipo de pavimento utilizar é o seu custo inicial e este, está diretamente ligado ao dimensionamento.

É sabido que os pavimentos de concreto, quando corretamente dimensionados e construídos suportam um grande número de solicitações de tráfego sem requerer atividades de manutenção pesada. Estas características são devidas, em parte, ao fato de pavimentos de concreto não estarem sujeitos a deformações plásticas e também pelo fato de o concreto, do ponto de vista de danificação por fadiga, tratar-se de material com características mais precisamente mensuráveis em laboratório e menos afetadas por condições de campo relacionadas à geometria dos elementos construtivos, por condições de carregamento e por condições ambientais.

Estudos realizados por Severi (1997) mostraram que o pavimento de concreto torna-se ainda mais interessante quando considerados os menores montantes de recursos exigidos no futuro a serem aplicados com medidas de reabilitação de pavimentos, principalmente para níveis de tráfego comercial elevados.

Uma preocupação com as variáveis consideradas nos métodos de dimensionamento faz surgir, neste momento, dificuldades relacionadas às questões como o desconhecimento da magnitude e da significância das tensões geradas pelo empenamento de placas para as condições brasileiras pois, a posição crítica de cargas sobre as placas e efeitos de tensões combinadas devidas às cargas e gradientes térmicos presentes, poderiam alterar brutalmente as hipóteses de projeto.

Balbo (1996), partindo soluções analíticas e numéricas, verificou que as tensões devidas a gradientes térmicos chegariam a representar ao menos 33% da tensão gerada devida às cargas, portanto bastante significativas.

Apesar de estarem disponíveis modelos para o cálculo de tensões em placas de concreto, resultantes de gradientes térmicos lineares ou não, os gradientes térmicos que de fato ocorrem em campo, tipicamente para o

clima brasileiro, durante o dia, noite, estação do ano ou ainda durante todo o ano, são desconhecidos por projetistas.

Não pode ser esquecido que o método de dimensionamento de pavimentos de concreto mais utilizado no Brasil atualmente, o ET- 97 Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84, em sua segunda edição, publicada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1.996, desconsidera o efeito das tensões de empenamento devido aos gradientes térmicos, sendo comentada a dificuldade e falta de precisão no cálculo das tensões e deformações que o empenamento acarreta.

Até mesmo R. G. Packard, autor do método da PCA/84, considerava difícil o cômputo ou medida das tensões devido ao empenamento, com algum grau de confiabilidade, devido à complexidade das condições dos gradientes térmicos entre o topo e fundo de uma placa somadas à incerteza sobre a previsão de medidas de temperatura (Packard, 1984; Packard e Tayabji, 1985). Segundo Bright *et al.*(1997), os projetistas de pavimentos de concreto deveriam checar os projetos quanto às tensões termicamente induzidas para prevenir a ruptura precoce do pavimento.

O aprimoramento dos critérios de projeto com base na realidade de campo, para o clima brasileiro é, portanto, de suma importância para trazer respostas às dificuldades existentes quanto a projetar pavimentos de concreto simples.

Um trabalho experimental, pioneiro no Brasil, está sendo desenvolvido na Universidade de São Paulo, nos domínios da Escola Politécnica, com o intuito de trazer novas respostas às presentes dificuldades existentes quanto ao projeto de pavimentos de concreto simples.

Foi construído, em uma área próxima ao Edifício Paula Souza na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, um pavimento experimental em concreto de cimento Portland, totalmente instrumentado com medidores de temperatura e medidores de deformação, o que permite a análise e implicações dos gradientes térmicos no estado de tensões de placas de concreto para pavimentos, em situação real de campo, para as condições brasileiras, analisando também a sua influência no comportamento estrutural de placas de concreto.

Objetivos da Pesquisa

A presente pesquisa pretende utilizar os dados coletados nesta pista experimental para chegar aos seguintes objetivos:

- determinar e caracterizar os gradientes térmicos ao longo da profundidade das placas de concreto durante um período mínimo de doze meses consecutivos e completos; estes gradientes térmicos foram avaliados em diversas posições (borda transversal, borda longitudinal e centro) em relação à superfície das placas de concreto;
- desenvolver uma modelagem dimensional dos efeitos de gradientes térmicos em placas de concreto simples, empregando modelos independentes de dimensões de placa e de tensões ocorrentes;
- avaliar e quantificar os efeitos do empenamento noturno e diurno e a partir desta avaliação consolidar uma consciência crítica sobre os métodos de projeto vigentes.

Como uma resposta envolvendo todo o Território Nacional exigiria muitos experimentos, dadas as diversas condições climatológicas predominantes no país, e sendo evidente que em diversas regiões uma pesquisa como esta não seria facilmente viável, especialmente devido aos custos para sua

execução, seria importante uma tentativa de extrapolação destes resultados tendo em vista outras condições climáticas.

Pretende-se portanto utilizar os parâmetros, análises e valores provenientes desta pesquisa, que está sendo realizada na Região Metropolitana de São Paulo, para extrapolar os resultados para outras regiões do estado ou mesmo do país onde as condições climáticas apresentem similaridade àquelas do local dos experimentos. Para que possamos fazer esta extrapolação, alguns dados complementares como temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar estão sendo coletados em uma estação hidro-meteorológica completa instalada a 200 m da pista experimental, no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Universidade de São Paulo.

Na organização dessa tese de doutorado, sua apresentação foi estruturada em oito capítulos, onde no Capítulo 2 define-se empenamento devido a variação térmica e também são apresentados os estudos teóricos clássicos de Westergaard (1926), Bradbury (1938) e Barber (1957) para consideração do efeito da temperatura em pavimentos de concreto.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão dos trabalhos relacionados à modelagem do gradiente térmico, tanto numérica quanto analítica. São apresentados os trabalhos desenvolvidos por Faraggi *et al.* (1986), Ardkins e Merkley (1990), Nishisawa e Fukuda (1994), Masad (1996), Mohamed e Hansen (1998) e Kuo (1998), que apresentou um modelo de previsão de diferenciais térmicos em placas de pavimentos de concreto. Quanto à modelagem analítica, são apresentados os trabalhos desenvolvidos por Faraggi (1986), por Liang e Niu (1998), por Mirambell (1990), por Richardson e Armaghani (1987) e por Choubane e Tia (1992).

No Capítulo 4 são descritos os experimentos de campo realizados em países com clima temperado, como os clássicos: *Bates Test Road* (1.924),

Arlington Experimental Farm (1935), Kansas (1.943), Minnesota (1.940) e *AASHO Road Test* (1.958) e também os mais recentes na Flórida (1.982), no Chile (1.986), em Illinois (1.986) e na França (1.991).

O Capítulo 5 descreve as condições climáticas na área de pesquisa; são descritas as Unidades Climáticas da Cidade de São Paulo, baseando-se no Atlas Ambiental desenvolvido por Tarifa e Armani (2000), bem como uma análise da classificação climática da área de pesquisa. Ao final apresenta-se uma breve consideração a respeito dos dados meteorológicos obtidos junto ao Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo empregados na presente pesquisa.

Descreve-se, no Capítulo 6, a construção da pista experimental, objeto de estudo deste trabalho. Apresenta-se a concepção do projeto, método de execução, controle tecnológico do concreto e do concreto compactado com rolo, bem como o método de instrumentação.

No Capítulo 7 é descrita a monitoração das temperaturas entre outubro de 1.999 a fevereiro de 2.001. Apresenta-se o tratamento dos dados obtidos, as taxas de elevação e queda das temperaturas de topo e fundo, a descrição de efeitos específicos do clima observados durante a monitoração, a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa e também as freqüências de distribuição dos gradientes térmicos.

No Capítulo 8 apresenta-se a discussão dos resultados obtidos, os modelos de previsão de temperaturas e diferenciais térmicos desenvolvidos, a análise do efeito da não linearidade da temperatura ao longo da espessura da placa e por fim, as implicações dos gradientes térmicos quanto às análises estruturais de pavimentos de concreto, realizando-se uma confrontação com o método de projeto vigente.

Ao final são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2

Empenamento Devido à Variação Térmica

Muitas vezes deformações de pavimentos são associadas a variações de temperatura, sendo que o empenamento de placas de pavimentos de concreto tem uma grande influência na resposta dos mesmos às cargas do tráfego.

O empenamento devido à variação de temperatura em pavimentos de concreto simples ocorre quando a placa curva suas bordas para cima ou para baixo dependendo da temperatura que está ocorrendo no topo e no fundo da mesma.

Durante o dia, quando a temperatura no topo da placa de CCP é maior que a temperatura no fundo, o topo tende a expandir-se, enquanto o fundo tende a contrair-se, ocasionando um empenamento das bordas da placa para baixo (curvatura convexa) entretanto, o peso próprio da placa restringe esta expansão e contração, induzindo tensões de compressão no topo da placa e tensões de tração na flexão no fundo da placa, conforme apresentado nas Figuras 2.1 (adaptada de Huang, 1993) e 2.2 (adaptada de Rodolfo, 2001). Durante a noite, quando o topo da placa está mais frio que o fundo, o efeito

é contrario àquele durante o dia, o topo tende a contrair-se e o fundo a expandir-se (curvatura côncava), sendo estes movimentos novamente restringidos pelo peso próprio da placa, ocasionando, nesse caso, tensões de tração no topo e de compressão no fundo, conforme Figura 2.1 (adaptada de Huang, 1993).

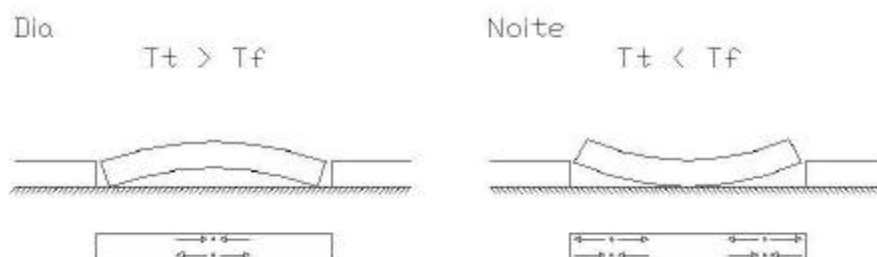


Figura 2.1 Empenamento diurno e noturno de placas de concreto (adaptada de Huang, 1993)

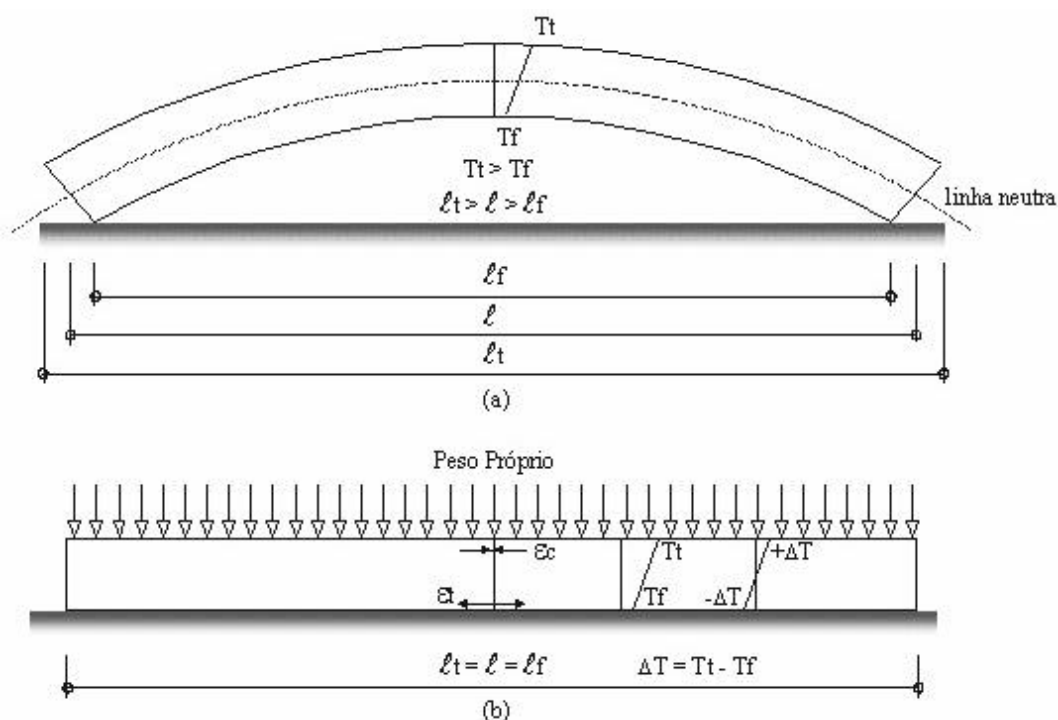


Figura 2.2 Empenamento diurno e ação do peso próprio da placa de CCP (adaptada de Rodolfo, 2001)

Segundo Armaghani *et al.* (1987), a resposta estrutural do pavimento de concreto de cimento Portland sobre as cargas do tráfego é altamente dependente das variações térmicas.

Em análises realizadas por Balbo (1996), que comparou modelos analíticos e numéricos, as tensões devidas ao empenamento das placas causado por gradientes térmicos tornavam-se um fator limitante no projeto de pavimentos de concreto e deveriam ser consideradas e adicionadas às tensões devidas às cargas de projeto.

2.1 Estudos Teóricos Clássicos

Os principais estudos teóricos clássicos sobre o efeito do empenamento em tensões nas placas de CCP tiveram seu início em 1.926 com a publicação do artigo escrito por Westergaard. Os estudos de Westergaard (1926;1927a, b), bem como os estudos de Bradbury (1938) e Barber (1957), são descritos na seqüência.

2.1.1 Soluções de Westergaard

Dois anos após o término do *Bates Test Road*, em 1.926, Westergaard publicou um trabalho intitulado "*Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*" na revista *Public Roads* e também no *Highway Research Board*, neste com o título de "*Computation of Stresses in Concrete Roads*".

Nestes trabalhos, Westergaard realizou análises em placas de pavimentos de concreto de cimento Portland sobre fundação elástica baseado nas seguintes suposições:

- as dimensões de placas seriam semi-infinitas;

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

Em 1.927, Westergaard, ainda preso às suposições de 1.926, adicionou em um trabalho suplementar, publicado no HRB e na *Public Roads*, mais quatro novas suposições:

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

Pioneiro na discussão do efeito de tensões e deformações devidas à variação térmica em pavimentos de concreto, Westergaard (1927 a, b) verificou que tais tensões eram muito importantes quando se observavam fissuras em pavimentos de concretos que ainda não haviam sido liberadas ao tráfego.

Westergaard (1927 a, b) não considerou em seus estudos as tensões devidas à variação da umidade no concreto e às tensões devidas à retração do concreto; analisou somente as tensões devidas às variações de temperatura, pois em sua opinião estas tensões eram mais críticas.

Para o pavimento que ainda não atingiu a resistência de projeto e não foi solicitado por cargas, Westergaard (1927 a, b) analisou somente as tensões devidas às variações térmicas; quando o pavimento atingiu a resistência de

projeto e foi liberado ao tráfego, a análise foi realizada a partir do efeito conjunto da tensão devida à variação de temperatura e a da tensão devida às cargas do tráfego.

Westergaard (1927 a, b) analisou três posições: no canto, na metade da borda (longitudinal ou transversal) e no centro da placa; analisou também variações sazonais de temperatura (variações mais lentas) e variações diárias de temperatura (mais rápidas).

No caso de variações sazonais de temperatura, Westergaard (1927 a, b) considerou uma placa de concreto sujeita a uma variação de temperatura uniforme ao longo da sua profundidade, ou seja, a um gradiente térmico linear.

Segundo Westergaard (1927 a, b), o aumento ou diminuição na temperatura na placa faz a mesma expandir-se e contrair-se, respectivamente, nas direções longitudinal e transversal e esta tendência será combatida pelo atrito existente entre a placa e o subleito gerando assim tensões no concreto.

Se o subleito restringe expansão da placa, tensões transversais de compressão e tensões longitudinais de tração são geradas em ambas as direções. Mas, se ao contrário de expansão ocorrer contração, seriam induzidas tensões de tração na flexão no concreto, tendendo a alongar a placa na direção transversal e a contraí-la na direção longitudinal.

Assumido um decréscimo linear da temperatura em toda a profundidade do pavimento, Westergaard (1927 a, b) propôs a seguinte equação para o cálculo das deformações nas direções x e y:

$$e_x = \frac{1}{E}(s_x - ms_y) - a\Delta T \quad [2.1]$$

$$e_y = \frac{1}{E}(s_y - ms_x) - a\Delta T \quad [2.2]$$

onde:

x, y = direções planas perpendiculares;

s_x, s_y = tensões de tração na flexão nas direções x e y , respectivamente;

e_x, e_y = deformações nas direções x e y , respectivamente;

E = módulo de elasticidade do concreto;

m = coeficiente de Poisson do concreto;

a = coeficiente de expansão térmica do concreto;

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

Para a posição central, Westergaard (1927 a, b) supôs que o atrito gerado pelo subleito fosse suficiente para impedir a tendência de movimento da placa em ambas as direções; desta forma as deformações seriam nulas ($e_x = 0$ e $e_y = 0$); logo:

$$s_x = s_y = \frac{E \cdot a \cdot \Delta T}{1 - m} \quad [2.3]$$

Para a posição de borda, ao longo do eixo x e a uma distância considerável dos cantos, Westergaard (1927 a, b) supôs que o atrito era suficiente para que não houvesse movimento na direção x ($\varepsilon_x=0$), desta maneira a tensão perpendicular à borda (σ_y) seria zero; logo:

$$s_x = E \cdot a \cdot \Delta T \quad [2.4]$$

Westergaard (1927 a, b) não analisou a posição de canto pois a variação uniforme de temperatura provavelmente não seria a causa mais importante da quebra dos cantos das placas.

Para Westergaard (1927 a, b), as tensões dadas pelas equações de borda e centro poderiam ser somadas às tensões causadas pelas cargas do tráfego.

Para o caso de variações diárias de temperatura, Westergaard (1927 a, b) analisou uma placa infinita, sujeita a um diferencial de temperatura entre topo e fundo, supondo um gradiente térmico uniforme ao longo da espessura (h) da placa e que a mesma encontrava-se à temperatura ambiente sem nenhuma tensão atuando sobre ela. Na hipótese de haver um contato da base com a placa, apesar da ação do gradiente térmico, a reação do subleito (k) seria proporcional ao deslocamento vertical (z) considerado positivo para baixo.

Para analisar esta situação, Westergaard (1927 a, b) assumiu uma temperatura no fundo da placa maior que a temperatura no topo, assim as bordas tenderiam a curvar-se para cima.

A curvatura da superfície no plano médio da placa, nas direções x e y é dada pelas seguintes equações:

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{12}{E \cdot h^3} (M_x - m M_y) + \frac{a \cdot \Delta T}{h} \quad [2.5]$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{12}{E \cdot h^3} (M_y - m M_x) + \frac{a \cdot \Delta T}{h} \quad [2.6]$$

onde:

M_x, M_y = momento fletor (por unidade de largura da seção transversal) nas direções x e y , respectivamente

h = espessura da placa

A torção nas direções xy é dada por:

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x \cdot \partial y} = \frac{12 \cdot (1 + m)}{E \cdot h^3} \cdot M_{xy} \quad [2.7]$$

M_{xy} = momento torçor (por unidade de largura da seção transversal) no plano xy.

Considerando a espessura e o diferencial de temperatura como sendo os mesmos em todos os pontos da placa, Westergaard (1927 a, b) analisou novamente as três posições tomadas anteriormente.

Para a posição central, Westergaard (1927 a, b) supôs que o deslocamento vertical devido ao gradiente térmico e a curvatura, a uma certa distância das bordas de uma placa infinita sujeita a tensões devidas a gradientes térmicos, deveria ser nulo; assim:

$$M_x = M_y = -\frac{E \cdot h^2 \cdot a \cdot \Delta T}{12 \cdot (1 - m)} \quad [2.8]$$

$$M_{xy} = 0 \quad [2.9]$$

A partir de um gradiente térmico positivo, as tensões de tração na flexão no topo da placa são obtidas dividindo-se o momento fletor pelo momento de inércia da seção (por unidade de largura - $h^2/6$), que será a mesma em todas as direções horizontais, resultando em:

$$s_0 = \frac{E \cdot a \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - m)} \quad [2.10]$$

Considerando a borda da placa, Westergaard (1927 a, b) supôs que existiria ao longo do eixo x (sendo x a direção do tráfego) de uma placa semi - infinita (direções positiva e negativa de x e direção positiva de y), durante todo o período de influência da temperatura, total contato entre a placa e o subleito

e que o diferencial de temperatura entre o topo e a base seria o mesmo para qualquer posição (x, y) na placa.

Como a diferença de temperatura entre o topo e o fundo é a mesma em toda a placa, o deslocamento (z) será função apenas de (y) e a única força externa considerada nessa análise é a reação do subleito dada pelo produto do deslocamento pelo módulo de reação do subleito (k). Esta reação é válida mesmo quando o deslocamento (z) é negativo devido à hipótese de existência de total contato entre a placa e o subleito. Este contato pode ser garantido pelo peso próprio da placa ou pelo efeito combinado das cargas do tráfego com a variação de temperatura.

Se o equilíbrio de um pequeno elemento da placa é dado por:

$$\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = kz \quad [2.11]$$

A análise do deslocamento é apenas uma função da distância da borda ao ponto de análise, isto é, de (y), sendo portanto o deslocamento a uma distância y da borda dado em função do deslocamento na borda (z_0 , z para $y = \infty$) e do raio de rigidez relativo (l) que relaciona a rigidez da placa com a rigidez do subleito, conforme se segue:

$$z = -z_0 \cdot \sqrt{2} \cos\left(\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}} + \frac{\pi}{4}\right) \cdot h^{\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}}} \quad [2.12]$$

para

$$z_0 = \frac{(1+m) \cdot a \cdot \Delta T}{h} \cdot l^2 = a \cdot \Delta T \cdot \sqrt{\frac{(1+m) \cdot E \cdot h}{12 \cdot (1-m) \cdot k}} \quad [2.13]$$

onde

$$l = \left(\frac{E \cdot h^3}{12(1 - m^2) \cdot k} \right)^{1/4} \quad [2.14]$$

A tensão de tração na flexão no topo da placa, na direção y, que é dada em termos da tensão no centro da placa (σ_0), será:

$$s_y = s_0 \cdot \left(1 - \sqrt{2} \cdot \text{sen} \left(\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}} + \frac{p}{4} \right) h^{\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}}} \right) \quad [2.15]$$

A tensão de tração no topo da placa, na direção x, é dada por:

$$s_x = s_0 \cdot \left(1 - m \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen} \left(\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}} + \frac{p}{4} \right) \cdot h^{\frac{y}{l \cdot \sqrt{2}}} \right) \quad [2.16]$$

As tensões σ_x e σ_y são as tensões principais, sendo que uma é maior do que a outra para um ponto específico do pavimento e não existe tensão de cisalhamento nas direções x e y (estado plano de deformações).

Em uma outra análise, Westergaard (1927 a, b) supôs uma placa infinita na direção x (direção correspondente ao seu comprimento) e finita na direção y (correspondente a sua largura), e o eixo x estaria posicionado no ponto médio de uma placa de largura b; desta forma foram obtidas outras equações para a posição central. Assumindo novamente a existência de um gradiente térmico constante entre topo e fundo, o deslocamento será dado por:

$$z = -z_0 \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\text{sen} 2\lambda + \text{senh} 2\lambda} \left[(-\tan \lambda + \tanh \lambda) \cos \frac{y}{l\sqrt{2}} \cosh \frac{y}{l\sqrt{2}} + (\tan \lambda + \tanh \lambda) \text{sen} \frac{y}{l\sqrt{2}} \text{senh} \frac{y}{l\sqrt{2}} \right] \quad [2.17]$$

$$y = \pm \frac{b}{2} \quad [2.18]$$

onde

$$l = \frac{b}{l \cdot \sqrt{8}} \quad [2.19]$$

$$z_0 = \frac{(1+m) \cdot a \cdot \Delta T}{h} \cdot l^2 \quad [2.20]$$

A tensão principal no topo da placa é dada por:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[1 - \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\sin 2\lambda + \sinh 2\lambda} (\tan \lambda + \tanh \lambda) \cos \frac{y}{l\sqrt{2}} \cosh \frac{y}{l\sqrt{2}} + (\tan \lambda - \tanh \lambda) \sin \frac{y}{l\sqrt{2}} \sinh \frac{y}{l\sqrt{2}} \right] \quad [2.21]$$

$$s_x = s_0 + (s_y - s_0) \cdot m \quad [2.22]$$

Westergaard (1927 a, b) analisou duas placas, sendo que uma tinha metade da outra, e observou que o deslocamento não variou muito, mas a tensão máxima na direção perpendicular à borda foi reduzida em cerca de 50% quando se diminuiu a largura pela metade; entretanto a tensão na direção paralela à borda se tornou maior. Portanto esta tensão passou a ser a tensão crítica induzindo ao aparecimento de fissuras transversais.

Westergaard (1927 a, b) considerou o diferencial térmico entre topo e fundo linear, mas conforme o presente estudos (com resultados apresentados no decorrer deste texto), este gradiente térmico linear apenas se aproxima da realidade, pois o que realmente ocorre é uma distribuição não linear de temperatura ao longo da espessura da placa.

2.1.2 Soluções de Bradbury

Aproximadamente dez anos depois de Westergaard apresentar sua teoria, Bradbury apresentou em 1938 soluções para o caso de placa finita nas direções x e y, soluções estas baseadas naquelas de Westergaard.

Bradbury (1938) considerou que para um ponto no centro da placa, a tensão total na direção x, assumida como sendo a direção do tráfego, e a tensão na direção y (ambas as tensões relacionadas aos gradientes térmicos), seriam respectivamente:

$$s_x = \frac{E \cdot a \cdot \Delta T}{2(1 - m^2)} \cdot (C_x + m \cdot C_y) \quad [2.23]$$

$$s_y = \frac{E \cdot a \cdot \Delta T}{2(1 - m^2)} \cdot (C_y + m \cdot C_x) \quad [2.24]$$

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

Os coeficientes de Bradbury C_x e C_y são fatores de correção para o caso de placa finita, sendo função de seu comprimento e de seu raio de rigidez relativo (l), podendo ser obtidos através de um ábaco específico apresentado por Bradbury em 1938 (Figura 2.3).

Para um ponto localizado na metade da borda livre (longitudinal ou transversal), a tensão (σ), que poderá ocorrer em x ou em y, dependendo da borda considerado, é dada por:

$$s = \frac{C \cdot E \cdot a \cdot \Delta T}{2} \quad [2.25]$$

Atualmente as equações de Bradbury-Westergaard são freqüentemente utilizadas em análises de modo comparativo com soluções numéricas.

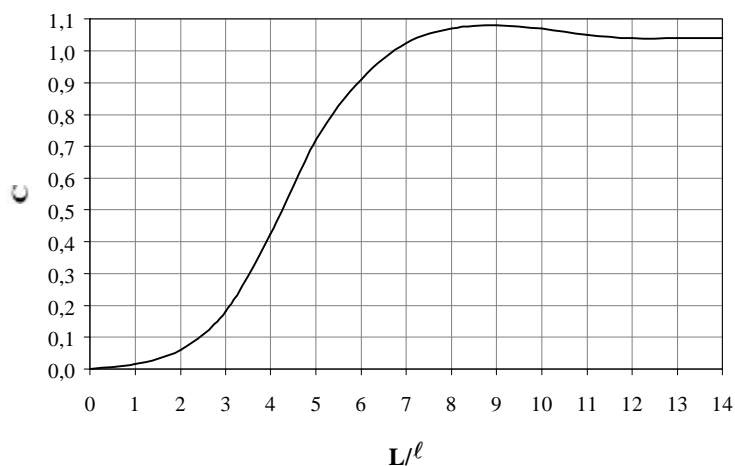


Figura 2.3 Coeficientes de Bradbury (adaptada de Bradbury, 1938)

2.1.3 Soluções de Barber

Barber (1957) relacionou temperatura do pavimento, velocidade do vento, precipitação, temperatura do ar e radiação solar. Considerou que para uma massa semi-infinita em contato com ar a uma temperatura $T = T_m + T_v \cdot \text{sen } 0,262 \cdot t$, a temperatura da massa em um período de 24 horas seria:

$$T = T_m + T_v \cdot \left[\frac{H^{-z \cdot C}}{\sqrt{(H + C)^2 + C^2}} \right] \cdot \text{sen} \left[0,262 \cdot t - (z \cdot C) - \text{arctg} \left(\frac{C}{H + C} \right) \right] \quad [2.26]$$

onde

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

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

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

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

z = profundidade abaixo da superfície (pés);

$$H = \frac{h}{l} \quad [2.27]$$

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

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

$$C = \left(\frac{0,131}{l/sr} \right)^{1/2} \quad [2.28]$$

s = calor específico (BTU/lbx°F);

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

Segundo Barber (1957), para o caso de uma transmissão forçada, deve ser incluída a média da irradiação de calor observada na superfície, sendo a densidade o fluxo de calor, para a velocidade do vento (v_v) em mph, dada por:

$$d_f = 6,35 + 2,11 \cdot v_v^{3/4} \quad [2.29]$$

Como a superfície do pavimento recebe calor através de radiação solar (Figura 2.4), a temperatura efetiva do ar será:

$$T_E = T_{ar} + \frac{R_s \cdot I}{h} \quad [2.30]$$

onde:

T_E = temperatura efetiva do ar (°F);

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

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

R_s = coeficiente de absorção superficial da radiação solar;

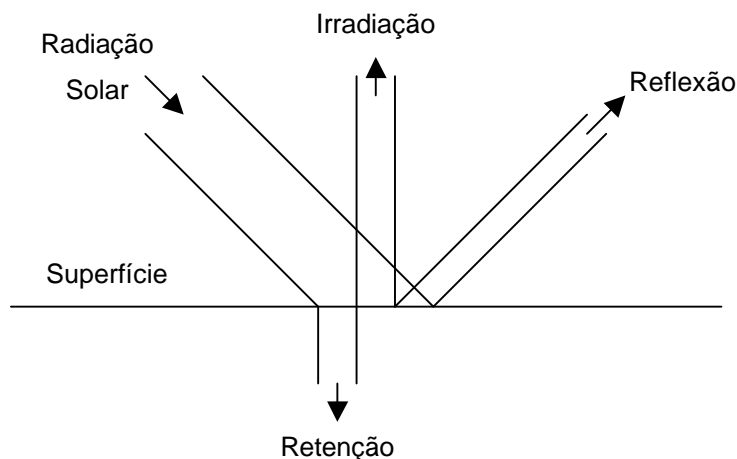


Figura 2.4 Distribuição da Insolação (adaptada de Barber, 1957)

Segundo Barber (1957), a contribuição média da temperatura efetiva do ar deve considerar uma perda de 1/3 da irradiação solar devida à reflexão, sendo assim, a contribuição da irradiação solar (R) para a temperatura efetiva será dada por:

$$R = 0,67 \cdot R_s \quad [2.31]$$

Portanto a temperatura máxima de um pavimento ($T_{m\acute{a}x}$) e variação máxima de temperatura do ar em relação à média poderão ser calculadas a partir das Equações 2.32 e 2.33, respectivamente:

$$T_{m\acute{a}x} = T_{ar} + R \quad [2.32]$$

$$T_V = 0,5 \cdot T_R + 3 \cdot R \quad [2.33]$$

onde T_R é a variação diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{F}$).

A máxima temperatura na superfície, quando a função seno é 1 e a profundidade (z) é zero, será:

$$T_m = T_{ar} + R + F(0,5T_R + 3R) \quad [2.34]$$

onde:

$$F = \frac{H}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}} = \frac{H/C}{\sqrt{(H/C+1)^2 + 1}} \quad [2.35]$$

H/C pode ser obtido na Tabela 2.1

Tabela 2.1 H/C em função de F (Fonte: Barber, 1957)

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

Segundo Barber (1957), os cálculos realizados com as equações acima indicaram a possibilidade de correlação entre temperaturas na superfície do pavimento com valores de temperatura informados pelas agências meteorológicas, sendo assim, possível extrapolar as temperaturas observadas em campo para lugares com outras temperaturas diferentes, sendo necessário para esta correlação, ser conhecidas as propriedades térmicas do material e as condições ambientais.

3

Modelagem do Gradiente Térmico

Após a década de 50, estudos sobre o empenamento de placas de pavimentos de concreto de cimento Portland, causado por variações térmicas, foi aparentemente esquecido pelos pesquisadores por aproximadamente 25 anos, quando então na década de 80 este tema voltou a ser motivo de estudos e discussões.

Passaram a ser considerados outros fatores, tal como o efeito combinado das cargas do tráfego e dos gradientes térmicos. Foram desenvolvidos, até o presente momento, vários modelos numéricos e analíticos, bem como foram realizados vários outros experimentos de campo, agora saindo do domínio americano e partindo para a Europa e para a América Latina.

3.1 Modelagem Numérica

Vários pesquisadores desenvolveram modelagens numéricas dos efeitos da temperatura em pavimentos de concreto. Os trabalhos aqui apresentados sintetizam as mais relevantes pesquisas encontradas na literatura técnica internacional.

3.1.1 Modelagem de Faraggi

Faraggi *et al.* (1986; 1987) apresentaram trabalhos que objetivaram verificar o comportamento de pavimentos de concreto à ação simultânea de tráfego e dos gradientes térmicos, além de desenvolverem um novo método de projeto estrutural para pavimentos de concreto na Espanha.

Nos métodos de projeto, tanto as tensões devidas ao tráfego quanto às tensões devidas a gradientes térmicos, segundo Faraggi *et al.* (1986; 1987), devem ser consideradas simultaneamente; mas no método de projeto espanhol, ambas são consideradas separadamente.

Matematicamente, para o caso de pavimentos de concreto aderidos sobre base cimentada, Faraggi *et al.* (1986; 1987) afirmam que as tensões e deformações resultantes do tráfego e dos gradientes térmicos aplicados simultaneamente não são as mesmas quando calculadas em separado. Em alguns casos as tensões calculadas através da somatória de efeitos individuais levam a valores subestimados.

Para o cômputo das tensões causadas pelo efeito combinado das cargas do tráfego e gradientes térmicos, Faraggi *et al.* (1986; 1987) consideraram os parâmetros apresentados na Tabela 3.1 para cargas posicionadas no centro e na borda transversal da placa de CCP (Figura 3.1).

Tabela 3.1 Valores dos parâmetros de projeto considerados no estudo
(Fonte: Faraggi *et al.* 1986; 1987)

Comprimento da Placa (m)	Espessura da Placa (m)	Carga por Eixo (kN)	Posição da Carga	Gradiente Térmico (°C/mm)
3,50	0,23	0	centro	0
4,50	0,25	80	junta	0,03
5,50	0,28	130		0,06
		160		0,08
				-0,04

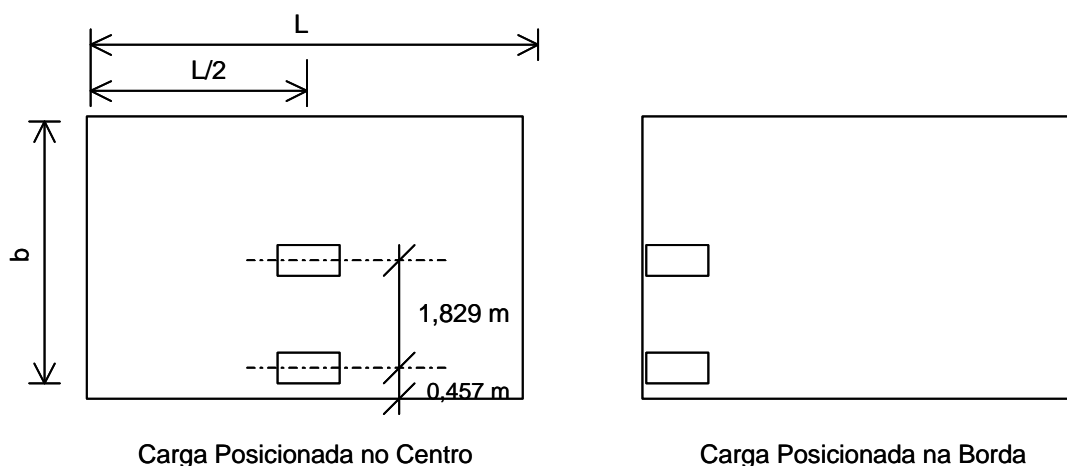


Figura 3.1 Posicionamento das cargas (adaptada de Faraggi *et al.* 1987)

Comparado-se estes casos com os estudos clássicos de Westergaard, o caso da carga no centro pode ser assimilado a uma combinação de carga central e carga de borda e o caso de carga na junta, uma combinação de carga de borda e carga de canto.

Faraggi *et al.* (1986; 1987) utilizaram as combinações da carga de tráfego com gradientes térmicos nulos para comparar resultados de tensões provenientes de análise por elementos finitos com as tensões obtidas por outros procedimentos verificando que ambas se adaptavam bem.

Entretanto para combinações de gradientes térmicos com carga de tráfego nula, quando comparados os resultados de tensões obtidos por elementos finitos com aqueles obtidos pela teoria de Westergaard-Bradbury, notou-se que esta última subestimava os efeitos.

Através das combinações de cargas de tráfego e gradientes térmicos nulos e gradientes térmicos e cargas de tráfego nulas, foi possível a comparação das tensões resultantes da adição dos valores obtidos separadamente para os dois casos bem como das tensões calculadas considerando a presença simultânea de carga de tráfego e gradiente térmico.

Para todos os casos analisados, assumiu-se uma placa única, sem transferência de carga nas juntas transversais, composto de 230 mm, 250 mm ou 280 mm de concreto de cimento Portland, 150 mm de base tratada com cimento e 150 mm de sub-base em solo-cimento, apoiado sobre fundação elástica.

Os autores propuseram equações para obtenção dos máximos valores de tensão, todas em função dos parâmetros carga por eixo (P), gradiente térmico (DT), espessura da placa (h) e largura da placa (b). As tensões calculadas a partir destas equações são expressas em MPa.

Foram analisadas as tensões devidas apenas as cargas de tráfego, apenas aos gradientes térmicos e devidas à combinação de ambas; as posições de carga foram aquelas definidas anteriormente.

1. Cargas de tráfego sem considerar os gradientes térmicos:

- carga no centro:

$$s_c = 1,4276 \frac{P^{1,046} \cdot b^{0,128}}{h^{1,219}} \quad (R^2 = 0,985) \quad [3.1]$$

- carga posicionada na borda transversal:

$$s_j = 7,7060 \frac{P^{0,802} \cdot b^{0,0403}}{h^{1,215}} \quad (R^2 = 0,890) \quad [3.2]$$

2. Cargas de tráfego combinadas com gradientes térmicos:

- carga no centro da placa:

$$s_c = 0,8244 \frac{P^{0,360} \cdot b^{0,250} \cdot \Delta T^{0,589}}{h^{0,180}} \quad (R^2 = 0,956) \quad [3.3]$$

- carga posicionada na borda transversal:

$$s_j = 33,2150 \frac{P^{0,357} \cdot b^{-0,079} \cdot \Delta T^{0,507}}{h^{0,701}} \quad (R^2 = 0,886) \quad [3.4]$$

3. Gradientes térmicos sem cargas de tráfego:

- carga no centro da placa:

$$s_c = 0,0022 \frac{b^{1,125} \cdot \Delta T^{0,319}}{h^{0,028}} \quad (R^2 = 0,886) \quad [3.5]$$

A equação para cálculo da tensão para carga na borda transversal, quando se consideram apenas os gradientes térmicos, não foi fornecida devida à baixa correlação encontrada. Nas Figuras 3.2 a 3.6 estão representados graficamente alguns casos empregando as equações acima.

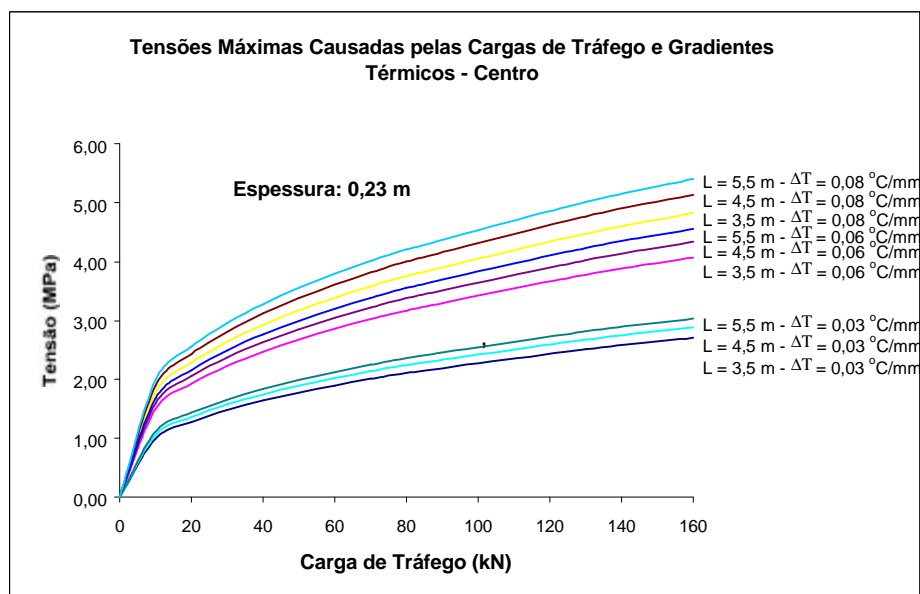


Figura 3.2 Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego e gradientes térmicos – Equação 3.3

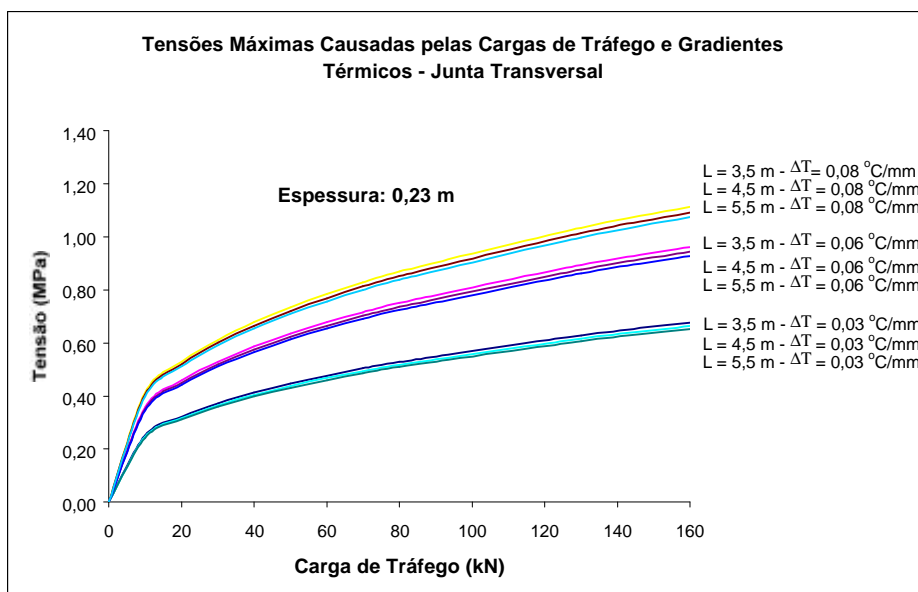


Figura 3.3 Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego e gradientes térmicos – Equação 3.4

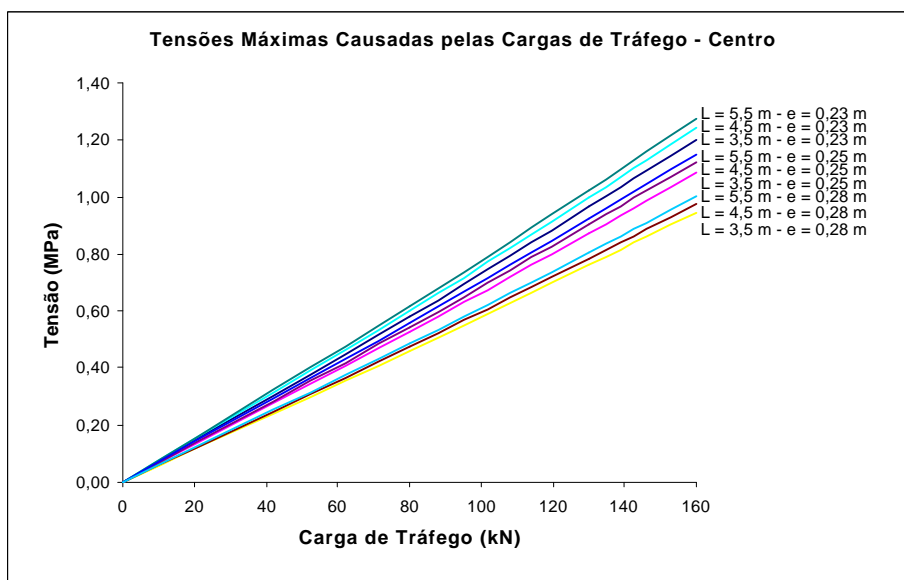


Figura 3.4 Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego – Equação 3.1

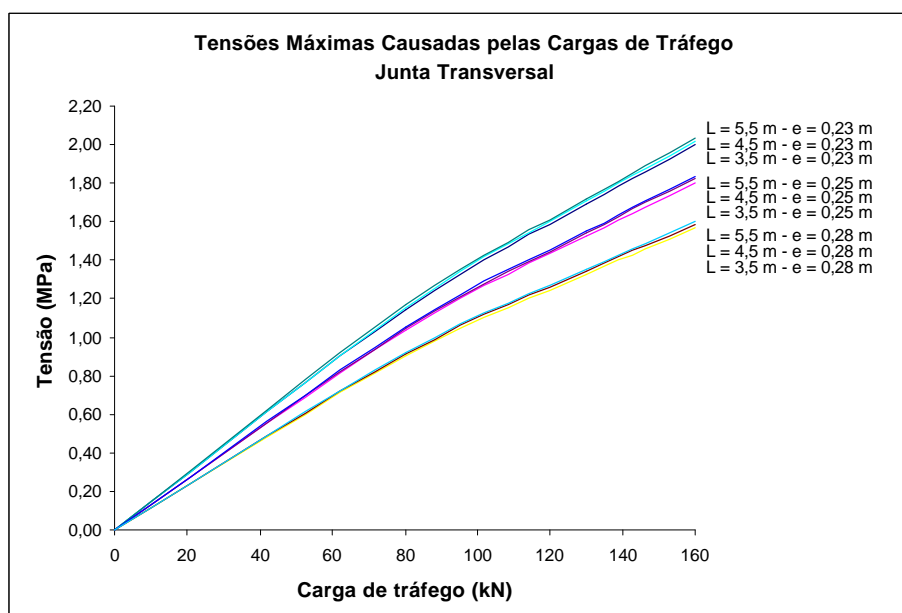


Figura 3.5 Tensões máximas causadas pelas cargas de tráfego – Equação 3.2

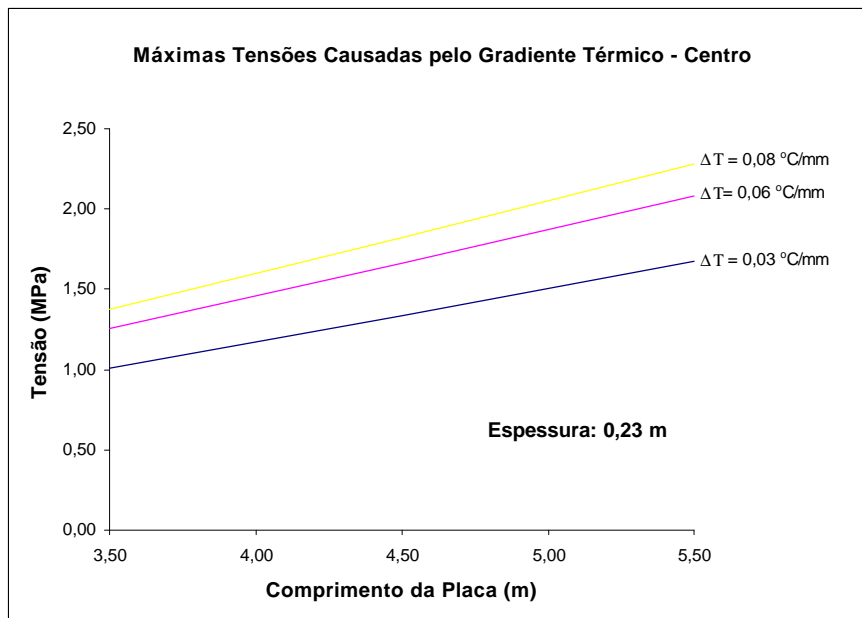


Figura 3.6 Tensões máximas causadas pelo Gradiente Térmico – Equação 3.5

Quando considera-se o efeito combinado de cargas do tráfego e gradientes térmicos, para o caso da carga posicionada no centro verifica-se que quanto

maior for o gradiente térmico entre o topo e o fundo da placa, maior será a tensão de empenamento, e quanto maior for o comprimento da placa, maior também será a tensão de empenamento; para carga posicionada na borda transversal, quanto menor for o comprimento da placa, maior será a tensão de empenamento.

Considerando-se apenas o efeito das cargas do tráfego, quando posicionadas no centro verifica-se que quanto menor a espessura da placa e maior o comprimento, maior será a tensão; para o caso da carga posicionada na borda transversal, quanto menor a espessura e maior o comprimento da placa, maior será a tensão.

Considerando apenas o efeito dos gradientes térmicos a tensão aumenta quando o comprimento e o gradiente térmico na placa são incrementados. A Tabela 3.2 apresenta os acréscimos de tensões obtidos pela ação simultânea das cargas do tráfego e gradientes térmicos e pelo cálculo das mesmas em separado. Verifica-se um elevado acréscimo de tensão, tendo portanto um grande efeito nos cálculos de projeto a consideração do gradiente (ou diferencial) térmico.

Tabela 3.2 Acréscimos nas tensões obtidas pela ação simultânea das cargas do tráfego e gradientes térmicos comparadas as tensões obtidas separadamente (Fonte: Faraggi *et al.*, 1986; 1987)

Carga (kN)	Posição da Carga	Gradiente Térmico (°C/mm)	Acréscimo da Tensão	
			Absoluto (MPa)	(%)
130	centro	-0,04	1,55	278
130	centro	0,06	0,81	137
130	borda transversal	-0,04	1,44	224
130	borda transversal	0,06	1,62	158

Analisando os dados da Tabela 3.2, para uma carga por eixo de 130 kN, o máximo valor de tensões obtido é quando esta carga está próxima à junta

transversal, concordando portanto com a teoria de Westergaard; por outro lado, a diferença entre as tensões resultantes das cargas por eixo (fator importante quando não são considerados os gradientes térmicos) na posição central decrescem quando os gradientes térmicos aumentam.

Para gradientes térmicos de $+ 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mm}$, as tensões devidas às cargas do tráfego na posição central são um pouco maiores que aquelas causadas pela mesma carga posicionada próxima à borda transversal.

Portanto, os autores obtiveram tensões maiores quando se considerou o efeito simultâneo das cargas de tráfego e da temperatura. Esse aumento de tensão chegou a ser da ordem de 150 %.

Uma aplicação prática dos resultados obtidos por Faraggi *et al.* (1986; 1987) foi a formulação de um novo procedimento de projeto para os pavimentos de concreto da Espanha considerando o efeito dos gradientes térmicos isolados e combinados com as cargas de tráfego.

Segundo Faraggi *et al.* (1986; 1987) os efeitos da ação simultânea das cargas do tráfego mais os gradientes térmicos não correspondem à soma das tensões causadas pelo tráfego com as tensões devidas ao empenamento.

Quando uma placa empena as bordas para baixo as tensões devidas às cargas de tráfego são maiores que a soma das tensões devidas ao empenamento e devidas às cargas de tráfego calculadas separadamente. Se ao contrário, a placa empenar as bordas para cima, as tensões produzidas pela ação simultânea das cargas do tráfego mais gradientes térmicos são iguais ou maiores que a soma das tensões calculadas separadamente.

Para Faraggi *et al.* (1986; 1987), quando os gradientes térmicos não são considerados, as tensões são maiores para o caso da carga localizada próxima à junta transversal e estas diferenças resultantes da localização da carga na placa diminuem quando o gradiente térmico aumenta.

Faraggi *et al.* (1986; 1987) consideram que o comprimento da placa é um importante parâmetro a ser considerado em projeto e o maior dano por fadiga ocorreria durante a ação simultânea das cargas do tráfego e dos gradientes térmicos, quando temos gradientes térmicos maiores ou iguais a $0,06 \text{ }^\circ\text{C/mm}$. Desta maneira, o fator equivalência de carga seria função da espessura e comprimento da placa e dependente da frequência e magnitude dos gradientes térmicos.

3.1.2 Modelagem de Adkins e Merkley

Adkins e Merkley (1990) modelaram matematicamente as variações de temperatura em pavimentos de concreto. Segundo os autores, quando o pavimento de concreto está sujeito a variações térmicas, é necessário um tempo para que uma nova condição de equilíbrio seja obtida e durante o processo de aquecimento ou resfriamento, existem três modos de transferência de energia: radiante, convectiva e conductiva.

A transferência de calor é radiante quando os raios solares incidem sobre a superfície do pavimento, parte da radiação solar é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida como mostra a Figura 3.7.

A inclinação da terra varia durante o ano, sendo assim a quantidade de radiação é menor durante os meses de inverno no hemisfério norte. Desta maneira, segundo Adkins e Merkley (1990), a radiação solar na superfície da terra e a taxa de absorção da energia solar pela placa de concreto é diretamente afetada pelo ângulo entre os raios solares incidentes e a linha do horizonte.

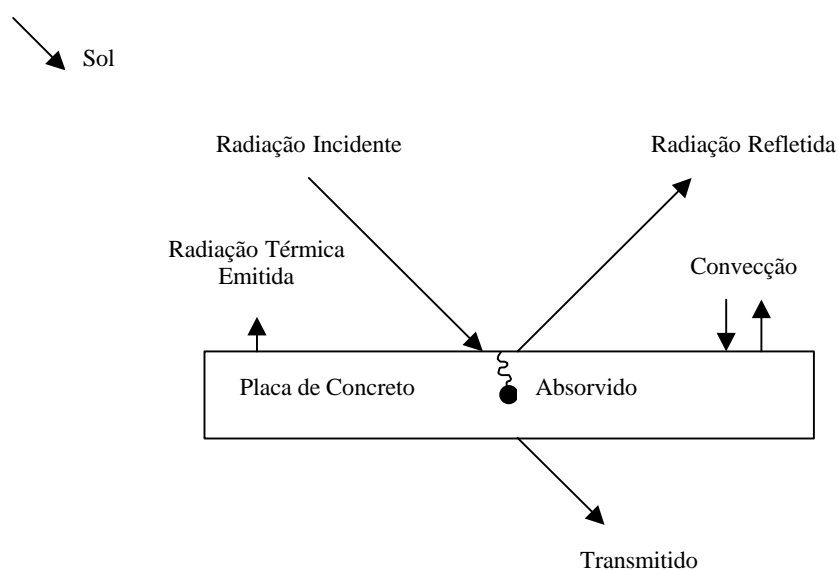


Figura 3.7 Transferência de calor em pavimentos de concreto (Adaptada de Adkins e Merkley, 1990).

Os raios solares no inverno, em baixas laltitudes, são forçados a percorrer uma longa distância na atmosfera, enquanto que no verão, em altas laltitudes, a radiação solar percorre uma distância menor antes de tocar a superfície do pavimento.

A transferência de calor é convectiva quando o ar está em contato com uma superfície de concreto com diferente temperatura. O resultado da troca de energia é chamado de convecção de calor e é causada pela difusão molecular e pelo volume de escoamento do ar através da superfície do pavimento, sendo que existem dois tipos de convecção: forçada e livre.

A convecção forçada depende de forças externas, como por exemplo o vento; a convecção livre é induzida por forças resultantes da variação de temperatura, como por exemplo a transferência de calor que ocorre de uma superfície de pavimento quente para o ar. O ar que está em contato com o concreto quente tem uma menor densidade que o ar frio sobre ela; sendo assim, se houver ventos ter-se-á uma convecção forçada.

A transferência de calor é condutiva quando ocorre internamente no concreto; quando existe um gradiente térmico na placa de concreto há uma transferência de energia, da maior temperatura para a menor temperatura e segundo Adkins e Merkley (1990), a condução é a única forma de transferência de calor que ocorre no interior do pavimento de concreto.

Adkins e Merkley (1990) afirmam que, dependendo da precisão desejada e condições que estão sendo modeladas, a temperatura ambiente, a condutividade térmica e a radiação solar devem ser modificadas a passos intermediários durante a simulação; por exemplo, a temperatura do ar e a taxa na qual a energia solar é absorvida pelo pavimento de concreto é diretamente afetada pelo ângulo dos raios solares.

Os autores desenvolveram um modelo matemático para prever gradientes térmicos em condições de campo e também para ajudar na determinação da taxa de transferência de calor resultante do uso de sais removedores de gelo das estradas em concreto.

O modelo considera que o pavimento de concreto é um sólido semi-infinito com transferência de calor sobre toda a superfície de exposição, sendo assim possível quantificar o processo utilizando-se uma equação unidimensional. Portanto a temperatura é função da profundidade da placa em um determinado tempo.

Dependendo da precisão desejada e das condições que estão sendo modeladas, a temperatura ambiente, o coeficiente de transferência de calor e a radiação solar podem ser alterados em passos intermediários durante as simulações.

Os autores ressaltam que a temperatura do ar e a taxa na qual a energia solar é absorvida pelo concreto são diretamente afetadas pelo ângulo de incidência dos raios solares (portanto, dependente da latitude do local).

3.1.3 Modelagem de Nishisawa e Fukuda

Nishisawa e Fukuda (1994) e Nishisawa *et al.* (1996) consideram que, para um projeto de pavimento de concreto, as tensões devidas a gradientes térmicos devem ser calculadas, em alguns casos, na borda transversal.

O método de projeto de pavimentos de concreto japonês utiliza o efeito combinado de tensões devidas às cargas e devidas ao empenamento para estimar a vida de fadiga do CCP, mas considera a posição crítica da carga na borda longitudinal e não na borda transversal.

Sendo assim, dada a inexistência de equações para o cálculo de tensões induzidas termicamente na borda transversal, Nishisawa e Fukuda (1994) desenvolveram um modelo numérico-estatístico fechado, baseado na análise de tensões por elementos finitos, empregando-se placas apoiadas sobre uma fundação de Winkler.

Foram realizadas várias regressões lineares múltiplas para que pudesse ser obtida a seguinte equação para o cálculo de tensão de tração na flexão devida ao empenamento (s_t):

$$s_t = \frac{4,5 \cdot DT^{0,662} \cdot b^{2,94} \cdot k^{0,44}}{h^{1,92}} \quad [3.6]$$

onde

DT = Diferencial Térmico (°C);

b = largura da placa (m);

k = módulo de reação do subleito (kgf/cm²/cm);

h = espessura da placa (cm).

Esta equação fornece a tensão devida ao empenamento em qualquer ponto ao longo da borda transversal para uma dada largura, espessura, módulo de reação do subleito e diferencial térmico, sendo a equação limitada para seguintes condições consideradas na modelagem:

- largura da placa: 3 a 5 m;
- comprimento da placa: 5 a 10 m;
- espessura da placa: 230 a 300 mm;
- módulo de elasticidade do concreto: 28.000 a 32.000 MPa;
- coeficiente de *poisson*: 0,17;
- coeficiente de expansão térmica do concreto: $10^{-5} / ^\circ\text{C}$;
- módulo de reação do subleito: 30 a 100 MPa/m;
- diferencial térmico: 4 a 16 $^\circ\text{C}$.

Uma análise comparativa de resultados, utilizando a equação apresentada por Nishisawa e Fukuda (1994) e Nishisawa *et al.* (1996) e aquela de Westergaard, reformulada por Bradbury em 1938, para obtenção da tensão devida ao empenamento na borda livre, é apresentada nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 para espessuras de placa de 230 mm, 250 mm e 270 mm.

Verifica-se que praticamente todas as soluções dependem muito do módulo de reação do subleito. Para um mesmo valor de diferencial térmico a tensão aumenta quando o módulo de reação do subleito é maior, ou seja, quanto mais rígida for a fundação do pavimento de concreto, mais importante são os gradientes térmicos.

Por analogia, os gradientes térmicos podem ser muito mais significativos na presença de base cimentada (não aderida) quando fazemos análises utilizando modelos numéricos.

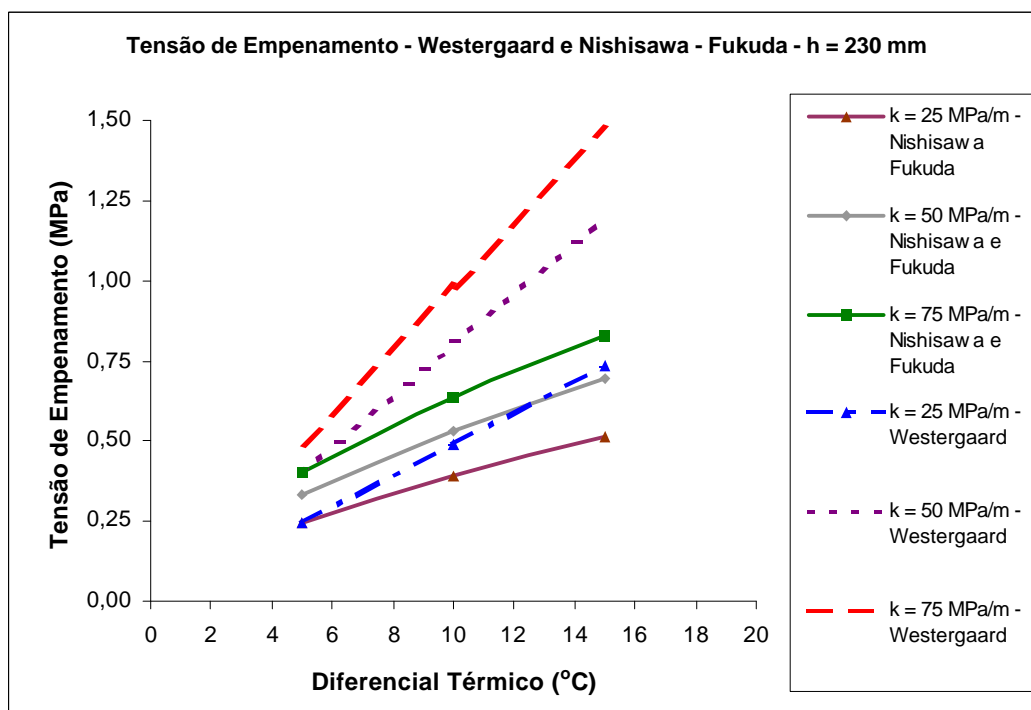


Figura 3.8 Tensões devidas ao empenamento - Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard – Bradbury (1938) - espessura de 230 mm.

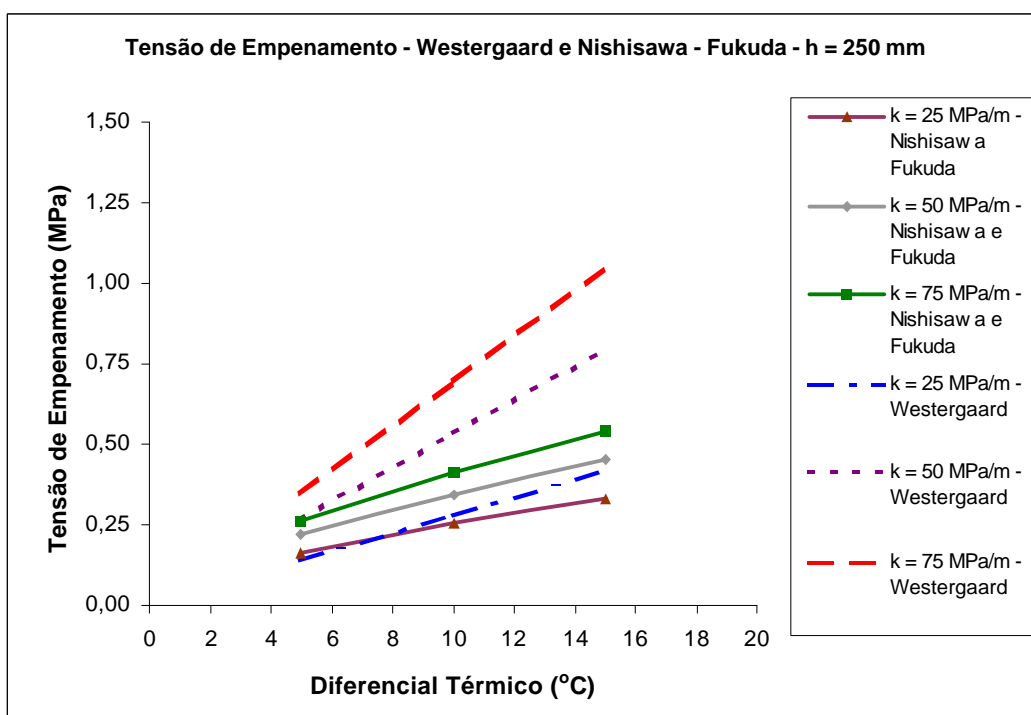


Figura 3.9 Tensões devidas ao empenamento - Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard – Bradbury (1938) - espessura de 250 mm.

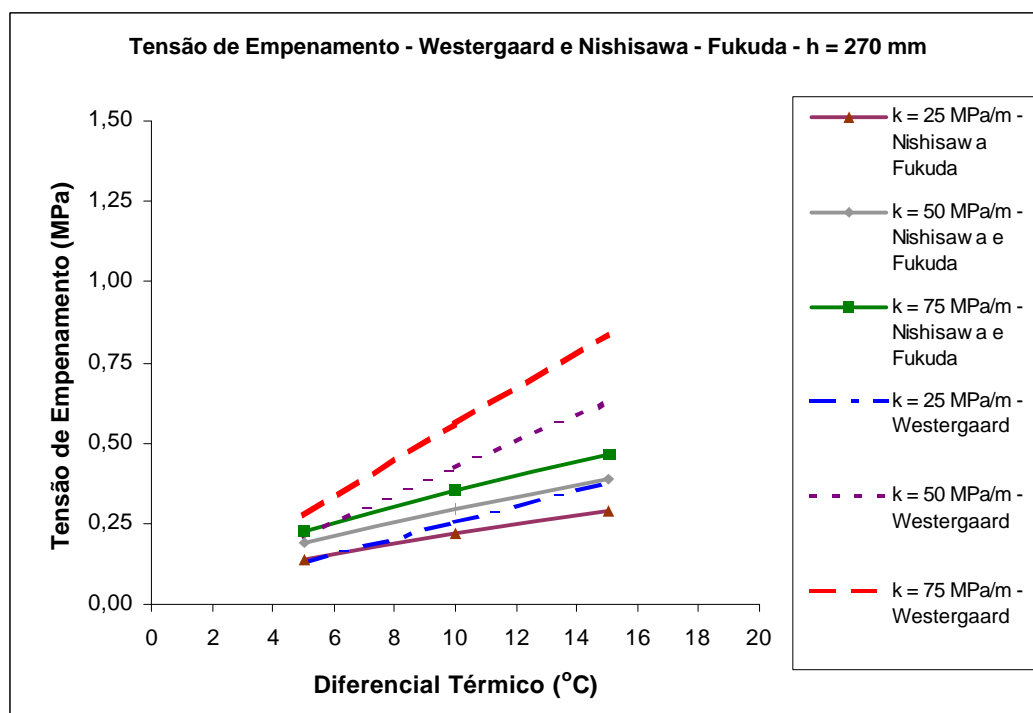


Figura 3.10 Tensões devidas ao empenamento - Nishisawa e Fukuda (1994) e Westergaard – Bradbury (1938) - espessura de 270 mm.

3.1.4 Modelagem de Harik

Análises realizadas por Harik *et al.* (1994) demonstraram que os efeitos da temperatura devem ser considerados em projetos de pavimentos de concreto pois a magnitude das tensões e deformações, causadas por gradientes térmicos, algumas vezes podem até não exceder os limites de projeto, mas exercem muita influência no comportamento de pavimentos quando combinadas às cargas do tráfego.

Os autores modelaram numericamente a tensão devida a não linearidade do gradiente térmico. Para tal foi idealizada uma placa de pavimento isotrópica delgada apoiada sobre uma fundação de Winkler.

Utilizando-se do método proposto, os autores simularam as tensões resultantes de gradientes térmicos lineares e verificaram que para uma condição de contorno idêntica àquela proposta por Westergaard (1926) a

tensão é igual à tensão calculada pelo método de Westergaard (semelhança entre modelagem numérica e modelagem analítica).

Considerando um gradiente térmico não linear, a tensão calculada pelo modelo proposto pelos autores concorda com aquelas resultantes de análises por elementos finitos (3-D), tanto para a condição de borda livre quanto para borda restrita.

Harik *et al.* (1994) afirmam que os efeitos térmicos devem ser considerados em análises e projetos de pavimentos de concreto e que a distribuição linear de temperatura não pode prever precisamente as tensões; portanto deve ser considerada nas análises uma distribuição não linear de temperatura.

Os autores verificaram também que mesmo que a tensão devida ao gradiente térmico não exceda os limites admissíveis, estas quando combinadas com a tensão gerada pelas cargas do tráfego se tornam muito críticas.

3.1.5 Modelagem de Masad

Masad *et al.* (1996) analisaram pelo método dos elementos finitos os efeitos da variação térmica em pavimentos de concreto. Nestas análises as tensões devidas a gradientes térmicos foram classificadas em dois tipos:

- tensões devidas ao empenamento resultante de diferenciais térmicos entre o topo e fundo da placa;
- tensões devidas ao empenamento resultante de expansões térmicas na placa.

Masad *et al.* (1996) constataram que tensões elevadas devidas ao empenamento não foram observadas somente em placas longas mas

também em placas curtas quando a base era cimentada e também que a tensão de empenamento diminui com o aumento da espessura da placa, conforme verificado por Nishisawa e Fukuda (1994) e Nishisawa *et al.* (1996) e dedutível a partir dos modelos analíticos de Westergaard. Os autores constataram que a máxima tensão devida ao empenamento é de 6% a 28,5% o valor do módulo de ruptura do concreto simulado para as análises.

Foi verificado também que gradientes térmicos não lineares geram tensões mais elevadas que àsquelas provenientes de gradientes térmicos lineares. A diferença de tensão entre ambas as distribuições térmicas variam de 3% a 13,5% do valor do módulo de ruptura do concreto simulado para as análises.

3.1.6 Modelagem de Mohamed e Hansen

Mohamed e Hansen (1998) desenvolveram um modelo para estimar a tensão devida ao empenamento em pavimentos de concreto considerando variação não linear dos gradientes térmicos, e ainda assumindo que:

- a placa é elástica, homogênea e isotrópica com propriedades térmicas invariantes;
- seções planas continuam planas após o empenamento;
- tensões e deformações devidas à temperatura na direção z são nulas;
- a deformação da placa é pequena comparada com as dimensões da placa;
- temperatura ou deformações de retração variam somente através da seção transversal.

Tomaram as seguintes convenções para seus cálculos:

- momentos e curvaturas positivos são aqueles que fazem a placa fletir para cima a partir dos cantos;
- o aumento de deformação é considerado positivo;

- as tensões são consideradas positivas na tração;
- o sistema de coordenadas é tal que z é considerado positivo para baixo a partir da superfície média da placa.

Para que fosse possível modelar a tensão devida ao empenamento, primeiramente foi determinada a tensão de equilíbrio na placa de concreto satisfazendo as condições de equilíbrio e a compatibilidade de deformações; em seguida fez-se o cálculo das tensões devidas às restrições internas (peso próprio e reação do subleito) por meio de um gradiente linear de temperatura equivalente obtido no primeiro passo e considerando as soluções fechadas de Westergaard e Bradbury.

O modelo apresentado por Mohamed e Hansen (1998) para análise de gradientes térmicos lineares, subestima em três vezes o valor da tensão de tração na flexão no fundo da placa, pois tal modelo não calcula precisamente o valor desta tensão, principalmente durante a noite e primeiras horas da manhã, quando as tensões de tração na flexão ocorrem no fundo e no topo da placa simultaneamente.

Os autores comentam que alguns Estados americanos ignoram as tensões de empenamento; afirmam ainda que não é o empenamento a única provável causa de fissuras; porém ignorá-las pode reduzir muito a vida de fadiga do pavimento.

3.1.7 Modelagem de Kuo

Kuo (1998) apresentou um modelo para prever o diferencial térmico em placas de pavimento de concreto em função da espessura da placa, média anual da temperatura do ar, média anual da precipitação e média anual da velocidade do vento.

Os dados climáticos para calibração do modelo são provenientes de 14 diferentes localidades nos Estados Unidos da América. Para estimar os diferenciais térmicos positivos, o autor propôs o seguinte modelo:

$$DT+ = 0,962 - \frac{52,181}{h} + 0,341 \cdot v_v + 0,184 \cdot T_{ar} - 0,00836 \cdot P \quad (R^2 = 0,84) \quad [3.7]$$

Para estimar os diferenciais térmicos negativos, o autor sugere ainda o seguinte modelo:

$$DT- = -18,14 - \frac{52,01}{h} + 0,394 \cdot v_v + 0,07 \cdot T_{ar} - 0,00407 \cdot P \quad (R^2 = 0,95) \quad [3.8]$$

onde:

$DT+$ = diferencial térmico positivo (°F);

$DT-$ = diferencial térmico negativo (°F);

h = espessura da placa (polegadas);

v_v = média anual da velocidade do vento (mph);

T_{ar} = temperatura atmosférica (°F);

P = média anual da precipitação (polegadas).

A partir do modelo apresentado, Kuo (1998) considera ser possível prever o diferencial térmico entre topo e fundo e, a partir deste valor, calcular a tensão causada pelas cargas do tráfego somada à tensão àquela gerada pelos diferenciais térmicos, utilizando modelos baseados no método de elementos finitos.

Segundo Kuo (1998) a vida do pavimento é muito sensível ao grau de empenamento; assim, a entrada de um diferencial de temperatura deve afetar substancialmente a espessura requerida para a placa de um pavimento de concreto. Um diferencial térmico arbitrariamente escolhido, geralmente o máximo, pode resultar em espessuras de placas

substancialmente mais altas que aquela projetada para um gradiente efetivo de temperatura, levando a resultados antieconômicos.

O modelo proposto por Kuo (1998) é utilizado no método de dimensionamento de pavimentos de concreto de cimento Portland da AASHTO em seu suplemento de 1998, para estimar os diferenciais térmicos positivos e negativos, sendo este o único método de dimensionamento mundialmente conhecido que considera o efeito da temperatura em pavimentos de concreto.

3.2 Modelagem Analítica

3.2.1 Modelagem de Faraggi

O método de cálculo de gradientes térmicos proposto por Faraggi *et al.* (1986; 1987) assume que a quantidade de calor absorvido por um corpo é igual ao que o corpo libera, e esta transmissão de calor é regulada pela lei de Fourier:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{l}{c \cdot r} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad [3.9]$$

onde:

T = temperatura do corpo (°C);

t = tempo (h);

C = calor específico do corpo (J/kg °K);

r = massa específica (kg/cm³);

l = condutividade térmica do corpo (w/m °K);

x, y = coordenadas horizontais (m);

z = coordenada perpendicular ao plano xy (m).

Para o caso em que o fluxo térmico no plano horizontal é desprezível tem-se:

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot \frac{d^2T}{dz^2} \quad [3.10]$$

Faraggi *et al.* (1986; 1987) assumiram uma variação senoidal da temperatura ao longo do tempo e desta maneira, por integração da Equação 3.10 obtiveram a seguinte expressão:

$$T_{zt} = T_M + T_0 \cdot e^{-z \sqrt{\frac{p}{a \cdot t_c}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{2pt}{t_c} - z \sqrt{\frac{p}{a \cdot t_c}} \right) \quad [3.11]$$

onde:

T_{zt} = temperatura na profundidade z no instante t ($^{\circ}\text{C}$);

T_M = média de temperatura no topo ou no fundo da placa, em um intervalo de 24 horas ($^{\circ}\text{C}$);

t_c = período de variação de ciclos de temperatura (86.400 segundos para um ciclo diário);

T_0 = intervalo de variação da temperatura na superfície do pavimento durante 24 horas ($^{\circ}\text{C}$);

a = difusividade térmica (m^2/s).

A intensidade da radiação solar, no caso de dia ensolarado, aumenta continuamente do nascer do sol até o seu ponto mais alto, decrescendo a partir de então até o anoitecer. Mas a temperatura do pavimento não deixa de cair com o anoitecer pois a energia térmica armazenada no pavimento vai sendo liberada pela superfície durante a noite.

Segundo Faraggi *et al.* (1986; 1987) a variação de temperatura na superfície do pavimento em 24 horas não é representada por apenas uma única função

senoidal. O intervalo onde a temperatura aumenta corresponde a meio período de luz e a outra metade são as horas noturnas.

Surge então uma assimetria no desenvolver da temperatura na superfície do pavimento durante o dia e assim, Faraggi *et al.* (1986; 1987) apresentaram duas equações para o cálculo da temperatura na superfície da placa, que se aplicam aos intervalos do nascer do sol ($t = 0$) até ele atingir o ponto mais alto ($t = Sh$) e do ponto mais alto até o novo amanhecer.

Para o intervalo entre o nascer do sol ($t = 0$) e o seu ponto mais alto ($t = Sh$), a equação é:

$$T_{ot} = T_M + T_0 \cdot \text{sen}\left(\frac{p \cdot (2t - Sh)}{2Sh}\right) \quad [3.12]$$

onde:

T_{ot} = temperatura na superfície do pavimento no instante t ($^{\circ}\text{C}$)

Durante o intervalo entre o ponto mais alto do sol e o novo amanhecer, a temperatura da superfície é dada por:

$$T_{ot} = T_M + T_0 \cdot \text{sen}\left(\frac{p \cdot [4(t + Sn) - Sa]}{2Sa}\right) \quad [3.13]$$

onde Sn é o intervalo entre o anoitecer e o amanhecer, em horas e $Sa = 2Sh + 2 Sn$, sendo que, para a Espanha estes parâmetros são:

Verão: $Sh = 10$ horas, $Sn = 7$ horas e $Sa = 34$ horas

Inverno: $Sh = 8$ horas, $Sn = 10$ horas e $Sa = 36$ horas

Como valores extremos de temperatura ocorrem em uma profundidade z mais tardiamente que na superfície, Faraggi *et al.* (1986; 1987)

apresentaram as seguintes equações (introduzindo um fator denominado *damping factor* (U_z) para representar a inércia térmica do material):

$$T_{zt} = T_M + T_0 \cdot e^{-z \sqrt{\frac{p}{a \cdot S_{zh}}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{p(2t - Sh)}{2Sn} - z \sqrt{\frac{p}{a \cdot S_{zh}}} \right) \quad [3.14]$$

$$T_{zt} = T_M + T_0 \cdot e^{-z \sqrt{\frac{p}{a \cdot S_{za}}}} \cdot \text{sen} \left(\frac{p[4(t + Sn) - Sa]}{2Sa} - z \sqrt{\frac{p}{a \cdot S_{za}}} \right) \quad [3.15]$$

onde:

$$S_{zh} = \frac{z^2 \cdot Sh^2}{a \cdot p \cdot U_z^2} \quad [3.16]$$

$$S_{za} = \frac{z^2 \cdot Sa^2}{a \cdot p \cdot U_z^2} \quad [3.17]$$

$$U_z = \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{a \cdot p}} \quad [3.18]$$

Sendo:

$$a = 0,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$T_M = T_{ar} + T_I \quad [3.19]$$

$$T_0 = \Delta T_0 + T_I \quad [3.20]$$

$$T_I = \frac{0,6 \cdot a \cdot I_0}{h} - 3,9 \quad [3.21]$$

onde:

T_{ar} = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_I = acréscimo de temperatura devido à insolação ($^{\circ}\text{C}$);

ΔT_o = variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

a = coeficiente de absorção (assumido como 0,65 para a transferência de calor);

h = coeficiente superficial de transmissão de calor (assumido como 20 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ para o concreto);

I_0 = constante solar (igual a 1300 W/m^2).

3.2.2 Modelagem de Liang e Niu

Liang e Niu (1998) propuseram uma forma fechada de soluções analíticas derivada para uma estrutura de pavimento de três camadas, sujeito a um período de variação da temperatura do ar ou da temperatura da superfície do pavimento. As análises térmicas foram combinadas com a teoria de placas para o cálculo da temperatura que induziria tensões devidas ao empenamento e momentos fletores.

Sendo assim, as soluções analíticas para o caso das tensões devidas ao empenamento para uma distribuição real de temperatura, provaram ser, segundo Liang e Niu (1998), uma eficiente ferramenta para o cálculo da distribuição de temperatura em pavimentos, para uma temperatura padrão de um local específico, quando comparada com os dados medidos em campo.

3.2.3 Modelagem de Mirambell

Mirambell (1990) verificou, utilizando modelos analíticos, que as tensões causadas por efeitos térmicos em pavimentos de concreto simples são da mesma magnitude das tensões causadas pelas cargas do tráfego.

Para Mirambell (1990), o método de projeto ideal deve levar em conta as condições ambientais existentes no local onde o pavimento será construído, principalmente radiação solar, variação da temperatura do ar e velocidade do vento.

Portanto, baseados nas colocações de Mirambell (1990), ao assumir-se uma distribuição não linear de temperatura na análise estrutural poder-se-ia avaliar as tensões térmicamente induzidas e a tensão de tração na flexão máxima que ocorre no pavimento.

Mirambell (1990) concluiu que partindo-se das mais desfavoráveis combinações de cargas de tráfego aplicadas na borda da placa, com uma distribuição de temperatura não linear negativa, a máxima tensão de tração na flexão seria maior que aquela obtida quando considera-se uma distribuição linear da temperatura e ainda podem ser de mesma magnitude que as tensões causadas pelo tráfego.

Ainda segundo Mirambell (1990), a uniformidade de parâmetros estruturais na distribuição das tensões nas placas de concreto, tais como o comprimento da placa e o módulo de reação do subleito, são menos significantes que a influência das condições ambientais existentes onde este pavimento será construído.

3.2.4 Modelagem de Richardson e Armaghani

Em 1.982 foi construída uma pista experimental no Centro de Materiais e Pesquisas do Departamento de Transportes da Florida (*Bureau of Materials and Research of the Florida Department of Transportation* em Gainesville), melhor descrita no Capítulo 4 deste trabalho, que serviu de base de dados para modelagens analíticas relacionadas ao efeito da temperatura em pavimentos de concreto de cimento Portland.

Utilizando-se dos dados de temperatura coletados a cada hora, na pista experimental, Richardson e Armaghani (1987) apresentaram um estudo sobre tensões causadas por gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland, realizado após a constatação do aparecimento de fissuras prematuras em pavimentos de concreto recentemente construídos no Estado da Flórida; a causa mais provável seria a tensão causada por gradientes térmicos não lineares.

Os autores objetivaram assumir um modelo para isolar a tensão devida a não linearidade do gradiente térmico. Segundo os autores, a energia que aumenta a temperatura do pavimento é aplicada apenas na superfície do mesmo através do ar e radiação solar, causando um gradiente térmico no pavimento.

Os dados de temperatura foram analisados em três etapas: identificação dos intervalos de tempo de máxima tensão de tração e compressão causadas por gradientes térmicos não lineares; determinação do tipo de equação que melhor representasse os dados de temperatura coletados; determinar a tensão devida à variação não linear de temperatura a partir das análises das tensões em dias críticos.

Devido ao fato de terem sido utilizados cinco termopares, os autores assumiram um gradiente térmico linear entre os termopares para examinar os dados. O gradiente térmico entre o primeiro termopar e o topo do pavimento foi obtido prolongando-se a linha que conectava o primeiro ao segundo termopar; para a temperatura de fundo assumiu-se que a temperatura seria a mesma do último termopar.

A equação que melhor representou os dados coletados, após a realização de inúmeras regressões lineares foi:

$$T = A + By + Cy^2 \quad [3.22]$$

onde

T = temperatura ($^{\circ}\text{F}$);

A , B e C = fatores de ajuste da regressão linear;

y = posição abaixo da superfície (polegadas).

São apresentados na Tabela 3.3 valores representativos dos fatores de ajuste da regressão linear para 14 de agosto de 1.984.

Tabela 3.3 Valores de A , B , C e R^2 apresentados por Richardson e Armaghani (1987).

Hora	A	B	C	R^2
0:00	96,09	0,1841	-0,11789	0,9993
4:00	93,24	-0,2906	-0,08190	0,9990
8:00	90,71	-0,5673	-0,04260	0,9990
12:00	91,98	-0,8172	0,31250	0,9984
16:00	98,32	0,8178	0,22500	0,9999
20:00	99,87	1,2641	-0,15930	0,9747

*Data 14/08/84

Os autores utilizaram-se de um programa em FORTRAN para dividir o pavimento em níveis e determinar a área de cada seção que somadas forneceram a área total.

Segundo Richardson e Armaghani (1987), se os deslocamentos do pavimento estão completamente restritos, uma tensão de compressão axial será gerada através da seção. Esta tensão é obtida pela integração dos deslocamentos, através da seção, dividindo-se pela espessura do pavimento. Quando a tensão axial é subtraída da tensão total, a resultante causará um momento fletor no pavimento e este momento poderá ser calculado tomando as tensões sobre qualquer ponto conveniente (fundo da placa para o estudo em questão) e resultará em uma tensão de empenamento. Quando ambas são subtraídas da tensão total, a tensão resultante será aquela causada pela não linearidade do gradiente (Figura 3.11).

A temperatura da Equação 3.22 está relacionada à tensão se, segundo Richardson e Armaghani (1987), admitir-se uma temperatura para tensão nula e então subtrair-se esta temperatura da derivada da temperatura e finalmente multiplicar-se pelo coeficiente de expansão térmica (α) e pelo módulo de elasticidade (E); esta tensão total (Figura 3.11) seria dada por:

$$s_T = E \cdot a \cdot T \quad [3.23]$$

A tensão axial (Figura 3.11) para qualquer ponto de uma placa com espessura de 9 polegadas será dada por:

$$s_{Axial} = E \cdot a \cdot (A + 4,5B + 27C) \quad [3.24]$$

Os autores assumiram para uma tensão nula uma temperatura igual a 0°F para simplificação dos cálculos, mas qualquer temperatura seria aceitável porque a magnitude da tensão axial e da tensão de empenamento não foram o objetivo principal deste estudo.

Para a determinação da tensão de empenamento, os autores obtiveram o momento por dupla integração, e a tensão devida ao empenamento pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$s_{emp.} = E \cdot a \cdot [(y - 4,5)B + 9(y - 4,5)C] \quad [3.25]$$

Subtraindo a tensão axial mais a tensão devida ao empenamento obteve-se a tensão devida a não linearidade do gradiente térmico (Figura 3.11):

$$s_{NL} = E \cdot a \cdot C \cdot (y^2 - 9y + 13,5) \quad [3.26]$$

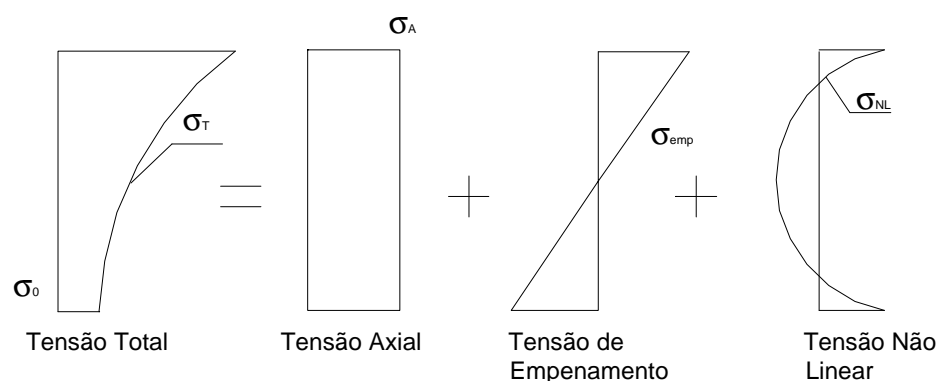


Figura 3.11 Tensões devidas à temperatura em pavimentos de concreto
(Fonte: Richardson e Armaghani, 1987)

Richardson e Armaghani (1987), a partir das equações obtidas, calcularam a máxima tensão de compressão devida à não linearidade do gradiente térmico, a qual é independente das restrições da placa, e obtiveram 0,8 MPa às 13 horas (15/08/1.984). Segundo os autores esta tensão não é significativa quando comparada aos 35 MPa de resistência à compressão do concreto, mas como esta tensão ocorre no topo e fundo do pavimento, contribuem para aumentar os efeitos das cargas que causam tensões de tração na flexão no pavimento.

Os autores observaram que uma elevada tensão de tração devida a não linearidade do diferencial térmico pode ser causada por um rápido resfriamento da superfície da placa de CCP, conforme observado em 15/08/1.984, quando ocorreu uma pancada de chuva antes das 18 horas, sendo obtida tensão de tração devida a não linearidade do diferencial térmico de 0,8 MPa às 20 horas do dia 15/08/1.984, duas horas após a pancada de chuva, sendo que o dia anterior havia apresentado uma tensão de tração de 0,4 MPa.

Os autores verificaram que a área de máxima tensão de tração não linear foi aquela cuja temperatura na metade da espessura da placa é maior que a temperatura do topo e do fundo. Segundo os autores, os valores idênticos de tensão de compressão e de tração foram mera coincidência.

Richardson e Armaghani (1987) confrontaram os modelos obtidos com o modelo apresentado por Bergstrom (1950) *apud* Richardson e Armaghani (1987) e verificaram que a máxima tensão de compressão obtida foi de 0,45 MPa; contudo o modelo de Bergstrom é um modelo exponencial, que não representaria a real condição mostrada pelos dados coletados na pista experimental, o que permitiu validar o modelo apresentado pelos autores.

Os autores concluíram que a tensão devida à não linearidade do gradiente térmico foi aproximadamente 17% do valor da resistência à tração na flexão do concreto (4,7 MPa) e esta tensão, quando considerada isoladamente, seria insuficiente para causar fissuras ou falhas no pavimento; no entanto, durante o período de cura do concreto, quando a resistência à tração na flexão é ainda pequena, esta tensão será mais crítica.

Os autores ressaltam que estes resultados são aplicáveis apenas para as condições obtidas na pista experimental de Gainesville, Florida e que a sua extensão para outros climas, espessuras de pavimentos, tipos de agregados e tipos de base não é aconselhável até que pesquisas adicionais sejam conduzidas.

3.2.5 Modelagem de Choubane e Tia

Choubane e Tia (1992, 1995), utilizando-se também dos dados coletados na Pista Experimental de Gainesville (Flórida), determinaram a distribuição de temperatura ao longo da espessura das placas de pavimentos de concreto, que se apresentou na maioria das vezes não linear.

A Figura 3.12 mostra que a distribuição da temperatura na placa de concreto pode ser dividida em três componentes: (a) componente que causa deslocamentos axiais, que pode ser tração ou compressão; (b) componente que causa empenamento; e (c) componente não linear.

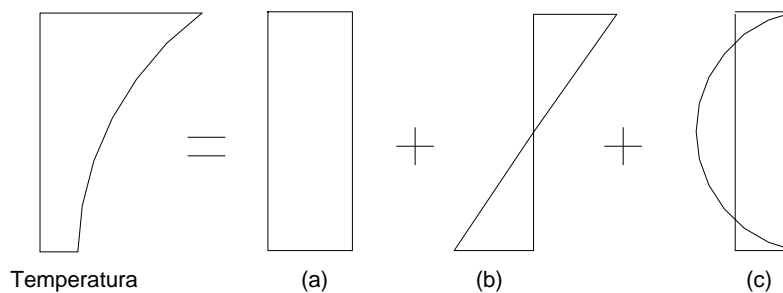


Figura 3.12 Variação típica de temperatura através da placa e seus três componentes (Fonte: Choubane e Tia, 1992 e 1995)

A divisão da distribuição de temperatura em três componentes foi baseada em hipóteses assumidas na teoria clássica de placas quando a seção de uma placa permanece plana e depois empena; assim a placa poderia deformar-se de duas maneiras:

- expandir ou contrair axialmente: deformação causada por uma componente de temperatura uniforme;
- empenar na seção plana remanescente: deformação causada por uma distribuição de temperatura linear.

A componente não linear de temperatura é a componente de temperatura restante após a subtração da componente axial e da componente linear da distribuição total de temperatura.

Choubane e Tia (1992, 1995) utilizaram a Equação 3.22, apresentada por Richardson e Armaghani (1987), para estudar o efeito isolado da não linearidade da temperatura ao longo da profundidade da placa de CCP.

Os coeficientes A, B e C da Equação 3.22 foram obtidos, neste caso, a partir das seguintes equações:

$$A = T_t \quad [3.27]$$

$$B = \left(\frac{4T_{md} - 3T_t - T_f}{h} \right) \quad [3.28]$$

$$C = \frac{2(T_t + T_f - 2 \cdot T_{md})}{h} \quad [3.29]$$

onde:

T_t = temperatura no topo da placa (°F);

T_{md} = temperatura no meio da placa (°F);

T_f = temperatura na base da placa (°F);

h = espessura da placa (polegadas).

A componente de temperatura que causa deslocamentos axiais (T_{axial}) é determinada a partir da integração da temperatura ao longo da espessura da placa, dividindo-se a integral por esta espessura:

$$T_{axial} = \frac{1}{h} \int_0^h (A + By + Cy^2) dy \quad [3.30]$$

$$T_{axial} = A + B(h/2) + C \left(\frac{h^2}{3} \right) \quad [3.31]$$

onde h é a espessura da placa (polegadas).

A componente de temperatura que causa empenamento na placa ($T_{emp} = T_{total} - T_{axial}$) é determinada tomando-se o momento de área restante após a subtração da componente axial da área total sobre a curva, sendo dada por:

$$T_{emp} = T_{total} - T_{axial} = By + Cy^2 - B\left(\frac{h}{2}\right) - C\left(\frac{h^2}{3}\right) \quad [3.32]$$

$$T_{emp} = -C \cdot \left(\frac{h^2}{12}\right) - (B + C \cdot h) \cdot y' + Cy'^2 \quad [3.33]$$

$$\text{onde } y' = \left(\frac{h}{2}\right) - y \quad [3.34]$$

O momento (M), na metade da profundidade será dado por:

$$M = \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} (T_{total} - T_{axial}) y' dy' \quad [3.35]$$

$$M = -(B + C \cdot h) \frac{h^3}{12} \quad [3.36]$$

Para uma distribuição linear de temperatura variando de $+T_{emp}$ a $-T_{emp}$, o momento causado por uma distribuição linear de temperatura será:

$$M = T_{emp} \cdot \left(\frac{h^2}{6}\right) \quad [3.37]$$

Tomando este momento como sendo igual ao momento da Equação 3.36, a componente de temperatura que causa empenamento (T_{emp}) em qualquer profundidade será:

$$T_{emp} = (B + C \cdot h) \cdot \left[y - \left(\frac{h}{2}\right) \right] \quad [3.38]$$

A equação para o cálculo da componente de temperatura não linear (T_{nl}) será:

$$T_{nl} = T_{total} - T_{axial} - T_{emp} \quad [3.39]$$

$$T_{nl} = C \cdot \left[y^2 - h \cdot y + \left(\frac{h^2}{6} \right) \right] \quad [3.40]$$

Se o coeficiente C for positivo, a fibra superior da placa tende à expandir-se e, ao contrario, se o coeficiente C for negativo, a fibra superior da placa tende à contrair-se.

O coeficiente C para a componente não linear é inversamente proporcional ao gradiente térmico; para o caso de se assumir um gradiente térmico linear, C será nulo, restando somente duas componentes de temperatura: a componente de deslocamento e a componente de empenamento.

Choubane e Tia (1992, 1995) partindo dos dados coletados nas placas instrumentadas, compararam os valores das tensões devidas às variações térmicas utilizando o programa FEACONS IV e também as equações de Westergaard - Bradbury.

O programa FEACONS IV (*Finite Element Analysis of Concrete Slabs*), foi desenvolvido na Universidade da Flórida com a finalidade de analisar as respostas dos pavimentos de concreto às cargas e às variações de temperatura.

No programa FEACONS IV, o pavimento de concreto deve ser modelado como um sistema de três camadas sendo que a placa é considerada como um conjunto de elementos retangulares com três graus de liberdade por nó. O subleito é assumido como sendo uma fundação de Winkler, modelada por uma série de molas verticais nos nós.

A transferência de carga através das juntas é modelada no programa por molas lineares e rotacionais conectando as placas nos nós do elemento ao longo da junta. Os gradientes térmicos ao longo da profundidade da placa são assumidos como sendo uniformes, e o diferencial de temperatura entre o topo e o fundo da placa são utilizados como entradas do programa.

Choubane e Tia (1992, 1995) analisaram as tensões devidas ao empenamento utilizando as equações de Westergaard-Bradbury e o programa FEACONS IV (Tabela 3.4) e verificaram que tensões calculadas utilizando as equações de Westergaard-Bradbury foram um pouco maiores as tensões calculadas utilizando o programa FEACONS IV; esta diferença, segundo os autores, é devida ao fato do programa FEACONS IV considerar a possibilidade de perda de contato entre a placa e o subleito.

Tabela 3.4 Tensões obtidas utilizando o FEACONS IV e as equações de Westergaard-Bradbury (Fonte: Choubane e Tia, 1992)

Horário	Diferencial Térmico (°C)	Tensões (MPa)	
		Westergaard-Bradbury	FEACONS IV
0:00	- 5,58	1,18	1,13
2:00	- 6,14	1,29	1,24
4:00	- 6,38	1,34	1,27
6:00	- 6,39	1,35	1,27
11:00	0, 55	0,12	0,11
13:00	1,13	1,08	1,03
14:00	5,26	1,11	1,06
18:00	- 2,79	0,59	0,59
20:00	- 4,30	0,92	0,90
22:00	- 5,12	1,08	1,05

* Valores de diferenciais térmicos obtidos em campo no mês de Janeiro

Análises considerando uma variação não linear de temperatura ao longo da espessura da placa de concreto foram realizadas por Choubane e Tia (1992, 1995), mas quais assumiu-se que a seção transversal da placa permanece plana, a componente de temperatura não linear, a qual não causa deformações axiais ou flexionais, induz tensões na placa.

As tensões induzidas na placa pela componente não linear de temperatura (s_{nl}), que pode ser calculada pela Equação 3.40, é determinada multiplicando-se a parcela negativa da componente não linear pelo coeficiente de expansão térmica (α) do concreto e pelo módulo de elasticidade do concreto (E), assim:

$$s_{nl} = -E\alpha T_{nl} \quad [3.41]$$

Substituindo T_{nl} da Equação 3.40 teremos:

$$s_{nl} = -E\alpha C \cdot \left[y^2 - h \cdot y + \left(\frac{h^2}{6} \right) \right] \quad [3.42]$$

Segundo os autores, uma variação do coeficiente de expansão térmica do concreto afetaria significativamente a tensão devida a variação de temperatura. Tia *et al.*, 1989, Alungbe *et al.* (1992) e Alungbe e Tia (1994) consideram que uma atenção especial deve ser dada aos efeitos do coeficiente de expansão térmica no desempenho dos pavimentos de concreto.

As tensões máximas em placas de concreto causadas pela combinação dos gradientes térmicos com as cargas do tráfego aumentam com o aumento do coeficiente de expansão térmica para um dado módulo de elasticidade do concreto, sendo que o coeficiente de expansão comumente varia de 7×10^{-6} a $14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Alungbe *et al.* (1992) e Alungbe e Tia (1994) observaram, após serem realizados ensaios de laboratório para determinar o coeficiente de expansão e analisar os efeitos destes coeficientes no desempenho dos pavimentos de concreto, que a tensão de tração máxima longitudinal e transversal é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade do concreto.

Choubane e Tia (1992, 1995) realizaram uma análise do efeito da componente não linear de temperatura nas tensões causadas em placas de CCP, nas quais foi considerado que a componente não linear da temperatura causaria uma tensão independente, não afetando portanto a tensão de empenamento e que a tensão total de tração na flexão seria a soma algébrica da parcela da tensão devida a distribuição linear da temperatura (calculada neste caso utilizando-se o programa FEACONS IV) e da tensão devida a distribuição não linear da temperatura ao longo da profundidade da placa (calculada a partir da Equação 3.42).

Para estas análises Choubane e Tia (1992, 1995) utilizaram os dados de temperatura obtidos na pista experimental da Flórida e verificaram que a distribuição não linear da temperatura ao longo da profundidade da placa tende a aumentar a tensão máxima de tração na flexão durante a noite, quando os diferenciais térmicos são negativos, de 6 a 19% e de modo oposto, tendem a diminuir a tensão máxima de tração na flexão de 11 a 15% quando os diferenciais térmicos são positivos (durante o dia).

Choubane e Tia (1992, 1995) verificaram a partir das análises dos dados da pista experimental que a distribuição de temperatura ao longo da profundidade da placa foi na maioria das vezes não linear e concluíram que quando a distribuição de temperatura ao longo da profundidade da placa é assumida como sendo linear, a máxima tensão de tração na flexão tende a ser maior durante o dia (diferencial térmico positivo) e menor durante a noite (diferencial térmico negativo), quando comparada à máxima tensão de tração na flexão obtida quando são considerados os efeitos da distribuição não linear da temperatura. Portanto para as condições de temperatura observadas durante o experimento realizado na Flórida (clima temperado), assumir uma distribuição linear do gradiente térmico causaria tensões de tração na flexão mais críticas.

4

Pesquisas de Campo em Países com Clima Temperado

São apresentados os experimentos de campo mais relevantes, realizados em países com clima temperado, onde foram estudados os efeitos da temperatura em placas de pavimento de concreto.

4.1 Estudos Experimentais Clássicos

Após um minucioso levantamento na literatura, foi possível listar os principais estudos clássicos experimentais, apresentados nos Quadro 4.1 e descritos e discutidos na seqüência.

Quadro 4.1 Estudos Experimentais Clássicos

Estudos Experimentais Clássicos		
Experimento	Local	Ano
Bates Test Road	Illinois, EUA	1.920
Arlington Experimental Farm.	Virginia, EUA	1.930
State Highway Comission	Kansas, EUA	1.936
Minessota University	Minessota, EUA	1.940
AASHO Road Test	Illinois, EUA	1.958

4.1.1 Bates Test Road

Clifford Older, em um trabalho publicado na ASCE (*American Society of Civil Engineers*) em 1924, descreveu o clássico experimento de campo chamado *Bates Test Road*. Neste pioneiro experimento, pela primeira vez considerou-se a ocorrência de empenamento em placas de pavimento de concreto devido à variação da temperatura.

O *Bates Test Road* foi um experimento realizado em Bates, Illinois, EUA, em 1.920, onde foram construídas seis seções de teste, sendo que uma destas seções foi executada em concreto de cimento Portland e foi subdividida em 26 subseções com espessuras variando de 100 mm a 230 mm e comprimentos também variáveis, com uma extensão total de 2.640 m. Nas placas desta seção, foram instaladas células de pressão, sendo interessante ressaltar que em 1.920 os americanos já estavam instrumentando pavimentos de concreto.

Durante o *Bates Test Road* foram analisados e avaliados os problemas até então desconhecidos em pavimentos e dentre estes problemas estava o efeito da mudança de temperatura na superfície do pavimento, causando tensões devidas ao empenamento no concreto simples, além de estudarem os efeitos da fadiga do CCP devida às repetições de carga.

Já naquela época acreditava-se que rupturas de seção em concreto eram causadas pelo empenamento das placas devido às variações da temperatura do ar. Após várias observações e análises notou-se que a temperatura no topo da superfície variava tanto quanto a do ar (Figura 4.1) e a expansão e contração do topo da placa, devido a variações térmicas, inevitavelmente eram seguidas do empenamento da placa, verificadas em placas de pavimento de concreto simples com 230 mm de espessura. Os testes realizados na pista experimental de *Bates* mostraram que um

empenamento de 6 mm freqüentemente ocorria para placas de 5,40 m de comprimento.

H. F. Clemmer em sua discussão do trabalho apresentado por Older em 1924 considerou que o uso de juntas longitudinais para aliviar a ação do empenamento devido a mudanças de temperatura era satisfatório e reduzia o empenamento pela metade.

Apesar de Older (1924) não ter considerado nenhuma tensão devida ao empenamento, investigações da época mostraram que diferenças de temperatura no concreto geravam tensões na placa de CCP.

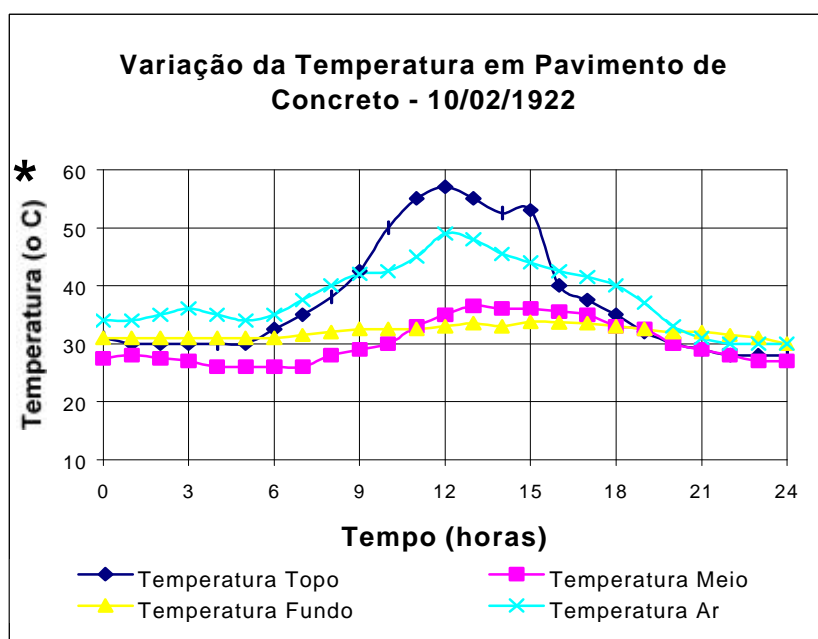


Figura 4.1 Variação da temperatura em pavimentos durante o *Bates Test Road* (adaptado de Older, 1924)

Ao analisar-se a Figura 4.1 pode-se inferir que as variações de temperatura entre o dia e a noite não são muito grandes; o máximo diferencial térmico

* No trabalho original a temperatura é indicada em "graus centígrados". Por tratarem-se de dados coletados no inverno do Hemisfério Norte, certamente tais valores são em "graus Fahrenheit".

ocorre aproximadamente às 12 horas e o diferencial térmico durante a noite, principalmente entre as 21 horas e 6 horas é praticamente nulo.

As temperaturas máximas e mínimas de topo foram de 13,3°C e 1,7°C, respectivamente; para as temperaturas máximas e mínimas de fundo foram obtidos valores de 1,7°C e 0,6°C, respectivamente. Os diferenciais térmicos máximos e mínimos observados foram de 11,6°C e -0,5°C. Todos os dados foram coletados durante o inverno do hemisfério norte, ou seja, em clima temperado.

4.1.2 *Arlington Experimental Farm*

Em 1.930 iniciou-se uma pesquisa de campo em Arlington, Virginia, pelo *Bureau of Public Roads*, denominada *Arlington Experimental Farm*, com objetivo de fornecer dados e informações que permitissem o melhor entendimento do comportamento dos pavimentos de concreto.

Dentre os objetivos da pesquisa estava o estudo dos efeitos das variações de temperatura em relação ao tamanho, tipo, carga e capacidade estrutural de placas de pavimento de concreto de cimento Portland.

Se a placa estivesse livre para se movimentar e não tivesse peso, ela poderia variar em tamanho e forma mas nenhuma tensão seria gerada, o que na realidade não ocorre, pois existe o peso-próprio da placa e também o contato com o subleito, restringindo a movimentação da placa o que causa tensões.

Durante o *Arlington Experimental Farm* foram analisadas as variações de temperatura em vários pontos da placa do pavimento de concreto; avaliou-se a expansão e contração das placas causadas pela variação de temperatura, estudou-se a resistência oferecida pelo subleito ao deslocamento horizontal da placa devida ao empenamento térmico e as tensões resultantes devidas

a esta resistência, bem como o empenamento do pavimento de concreto resultante da variação de temperatura.

Foram construídas 40 placas de CCP com 6 m de comprimento por 3 m de largura, entretanto, segundo os relatos de Teller e Sutherland (1935), os termômetros originalmente instalados nestas placas não funcionaram adequadamente; assim sendo outras duas pequenas placas, com área de $1,44 \text{ m}^2$ e espessuras de 150 mm e 230 mm, foram construídas, onde optou-se pela instalação de termoresistores.

Estes termoresistores foram posicionados no centro da placa, a cada 25 mm de profundidade, também sobre a superfície e em um ponto um pouco abaixo dela (fibra superior e inferior da superfície), permitindo determinar não somente o diferencial térmico entre topo e fundo, como também os gradientes térmicos entre os termoresistores. Também foram instalados dois termopares no subleito de cada uma das placas, posicionados a 6 mm da superfície do subleito e a 50 mm abaixo da superfície do subleito.

A coleta de dados dos termoresistores possibilitou a determinação da distribuição de temperatura ao longo da espessura das placas de CCP. A partir destes dados pode-se calcular com considerável precisão a temperatura média na placa e o diferencial térmico entre o topo e fundo.

As medidas foram realizadas durante dois anos e os dados eram coletados em três períodos: pela manhã, quando se admitia a placa perfeitamente plana; no início da tarde, quando a placa estava com as bordas empenadas para baixo; e na madrugada, quando a placa estava com as bordas empenadas para cima. Paralelamente, dados meteorológicos foram coletados.

Quatro ciclos individuais foram selecionados, dentre todos os dados coletados, para uma análise mais detalhada das características das

variações térmicas ocorridas durante um ano de estudo, sendo que cada ciclo correspondeu a uma estação do ano.

Ao analisarem estes ciclos, os autores observaram que a variação de temperatura era muito maior durante o dia (quando o sol está brilhando) que durante a noite e as maiores variações ocorreram durante as estações quentes. Ambos os efeitos são causados pela absorção do calor dos raios solares e quanto mais intensa a luz do sol, maior será este efeito.

Observou-se também que em algumas estações do ano, a temperatura do topo do pavimento foi de 6°C a 11°C acima da temperatura do ar e este efeito é maior quando o ângulo de incidência dos raios solares na superfície do pavimento é maior.

Durante as estações mais quentes, a temperatura do concreto esteve sempre acima da temperatura do ar. Para os autores, a temperatura do concreto não era controlada apenas pela temperatura do ar, mas também pela umidade do ar, insolação e condições de umidade do subleito.

Foi observado também que uma temperatura de topo muito maior que a temperatura do ar era sempre precedida por dias de elevada temperatura, pois o calor absorvido pela placa não se dissipava rapidamente.

Durante a primavera-verão no Hemisfério Norte, quando as variações diárias de temperatura são maiores, a diferença entre o diferencial térmico máximo positivo entre as placas de 150 mm e 230 mm de espessura é proporcional à diferença de espessura.

Durante o outono-inverno no Hemisfério Norte, quando as variações diárias de temperatura são menores, a diferença entre o diferencial térmico máximo positivo é muito menor.

A maior diferença entre os gradientes térmicos foi observada no início da primavera. Nesta época a luz do sol é intensa mas o subleito ainda está muito frio e, sob as placas de 230 mm de espessura se aquece mais lentamente que sob as placas de 150 mm.

O gradiente térmico negativo é pequeno e varia muito de dia para dia, o que dificultou os autores a encontrarem uma relação entre espessura e gradiente térmico.

Teller e Sutherland (1935) analisaram também a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa de CCP e verificaram que esta distribuição era praticamente linear quando ocorre o pico do diferencial térmico mínimo e máximo, que ocorriam freqüentemente no início da manhã e no meio da tarde, respectivamente; para os autores estes intervalos do dia seriam os mais importantes para se determinar as tensões devidas ao empenamento.

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios, máximos e mínimos obtidos entre 1.931 e 1.933, para todas as estações climáticas.

Tabela 4.1 Valores médios de temperaturas e diferenciais térmicos obtidos entre 1.931 e 1.935 (Fonte: Teller e Sutherland, 1935)

		Posição	Espessura	Primavera	Verão	Outono	Inverno
Temperaturas Mínimas (°C)	Topo	150 mm	11	22	10	-2	
		230 mm	10	22	11	-4	
	Fundo	150 mm	14	22	12	1	
		230 mm	15	26	14	2	
Temperaturas Máximas (°C)	Topo	150 mm	31	41	20	10	
		230 mm	29	43	21	7	
	Fundo	150 mm	19	30	14	4	
		230 mm	14	28	13	2	
Diferencial térmico (°C)	Mínimo	150 mm	-3	-3	-2	-3	
		230 mm	-5	-4	-3	-6	
	Máximo	150 mm	12	11	6	5	
		230 mm	15	15	8	6	

Fonte: Teller e Sutherland (1935)

Os valores extremos obtidos durante o *Arlington Experimental Farm* foram:

- temperatura de topo máxima: 45°C (verão)
- temperatura de topo mínima: - 5°C (inverno)
- temperatura de fundo máxima
 - placas de 150 mm: 33°C (verão)
 - placas de 250 mm: 28°C (verão)
- temperatura de fundo mínima
 - placas de 150 mm: -1°C (inverno)
 - placas de 250 mm: 2°C (inverno)
- diferencial térmico máximo
 - placas de 150 mm: 15,3°C (primavera)
 - placas de 250 mm: 18,4°C (primavera)
- diferencial térmico mínimo
 - placas de 150 mm: -4°C (inverno)
 - placas de 250 mm: -6,5°C (inverno)

Sendo o concreto um mau condutor de calor, a transferência de calor através da espessura do pavimento leva um certo tempo e um gradiente térmico é gerado em várias partes dentro da estrutura. O empenamento, segundo Teller e Sutherland (1935), tem dois importantes efeitos na estrutura do pavimento:

- A distorção que ocorre altera a condição de suporte do subleito e afeta a magnitude das tensões geradas pelas cargas de roda;
- Devido ao peso-próprio da placa, o empenamento por si só causa importantes tensões dentro da estrutura.

Ambas as ações limitam a máxima carga de roda que pode ser suportada pelo pavimento, sendo assim qualquer informação sobre os gradientes térmicos é muito importante.

A magnitude das tensões causadas devidas apenas ao empenamento térmico em vários pontos da placa foi determinada comparando-se a deformação medida em um ponto (borda, centro, canto) do pavimento de concreto com a deformação em um ponto com pouco ou nenhum empenamento, sendo que a deformação na placa foi medida por meio de *strain gages* previamente instalados.

Para Teller e Sutherland (1935), as variações nas dimensões da placa resultaram em um empenamento térmico que não causou grandes mudanças na tensão crítica devida à aplicação de cargas, o que na opinião de Huang (1993) não acontece; para este autor placas com comprimento maiores geram tensões devidas ao empenamento maiores.

As tensões de empenamento que ocorrem durante o dia são mais importantes pois tensões são geradas no fundo da placa. As tensões mais críticas ocorreram próximas ao canto e na direção longitudinal. Para Westergaard (1927) estas tensões seriam mais críticas na borda e na direção transversal.

A partir da teoria de Westergaard, os autores calcularam as tensões devidas aos diferenciais térmicos e verificaram uma diferença entre as tensões medidas em campo e as tensões calculadas a partir da teoria de Westergaard. As tensões medidas apresentaram praticamente os mesmos valores para placas de 150 mm e 230 mm, apesar da diferença de 3°C entre os diferenciais térmicos de 10°C e 13°C obtidos para as placas de 150 mm e 230 mm de espessura, respectivamente.

As tensões teoricamente calculadas apresentaram uma clara diferença para as placas com espessuras de 150 mm e 230 mm, resultando em tensões mais elevadas para as placas de 230 mm. Portanto, os autores verificaram que quanto maior a espessura e, conseqüentemente maior diferencial térmico, maior seria a tensão causada na placa de CCP.

Teller e Sutherland (1935) verificaram que a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa apresentava-se não linear em alguns casos, sendo que esta distribuição supostamente resultaria em tensões menos críticas, o que veio a se confirmar 57 anos mais tarde a partir das análises de Choubane e Tia (1992, 1995).

Para Teller e Sutherland (1935) as tensões oriundas do empenamento térmico são tão importantes quanto às tensões causadas pelas cargas do tráfego, sendo que a tensão de tração longitudinal no fundo do pavimento devida ao empenamento alcançou, durante experimento 2,5 MPa e a tensão correspondente na direção transversal foi de aproximadamente 0,9 MPa; estas tensões devidas ao empenamento deveriam ser somadas às tensões devidas as cargas do tráfego.

4.1.3 Pavimento de concreto experimental do Estado do Kansas

Ardnt (1943) apresentou os dados obtidos pelo *State Highway Commission of Kansas* durante 1.936 e 1.941 em um pavimento de concreto experimental construído em Douglas Country, Kansas, com a finalidade de examinar vários tipos de subleitos, as diferentes condições climáticas, os vários tipos de concreto empregados em pavimentos e os vários tipos de juntas utilizadas em pavimentos de concreto.

As temperaturas do ar, do topo, do fundo da placa e do subleito do pavimento de concreto foram automática e continuamente registradas durante um período de cinco anos e a temperatura era registrada semanalmente, por meio de gravações automáticas dos termômetros instalados no pavimento.

Os termômetros eram cilíndricos e foram colocados no pavimento de concreto a 24 mm abaixo do topo do pavimento e a 24 mm acima da base e também no subleito, instalado a 150 mm abaixo do fundo da placa. Os

termômetros foram colocados a aproximadamente 1,00 m da borda do pavimento e os tubos foram totalmente calafetados para evitar a entrada de ar e umidade.

Após análise dos dados das temperaturas coletadas durante os cinco anos de pesquisa (1.936 a 1.941) verificou-se que haveria uma variação de 17°C na temperatura do ar para uma média de 63 anos. Estas temperaturas, foram portanto bastante representativas, das quais pode-se ter uma estimativa para um longo período de tempo.

A incidência de raios solares durante o verão foi muito importante no registro das temperaturas nas placas de concreto. Ardnt (1943) verificou que as variações de temperatura, em algumas vezes, aconteceram muito rapidamente e portanto estudos do efeito da temperatura em pavimentos de concreto devem ser realizados durante um período considerável.

Foram observados valores de 49°C para a máxima temperatura de topo (verão) e de -12°C (inverno) para a mínima temperatura de fundo. A temperatura do ar esteve 10°C abaixo da temperatura do topo do pavimento durante o verão e 3°C abaixo durante o inverno. Em 1.943, Ardnt já enfatizava a importância do estudo da extensão e duração das altas temperaturas em pavimentos de concreto para que se pudesse ajudar na solução de problemas nestes tipos de pavimentos.

4.1.4 Pavimento de Concreto Experimental do Estado de Minnesota

Em 1.940 foram construídas, no laboratório do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minnesota, situado no campus da Universidade de Minnesota, seis placas de concreto de 180 mm de espessura, 4,95 m de largura e 5,10 m de comprimento. Swanberg (1945) descreveu os detalhes deste projeto no que tange ao efeito da temperatura em placas de concreto.

As medidas de temperatura foram realizadas por meio de termopares colocados no centro da placa e no subleito, nas seguintes posições: no topo da superfície da placa; em pontos intermediários da placa; no fundo da placa; no subleito a uma profundidade de 1,50 m abaixo do fundo da placa; em contato com o ar protegido do sol.

Os termopares foram conectados a potenciômetros e assim o valor da temperatura era coletado e anotado, a cada 6 minutos, de modo contínuo. Foram registradas 5.256.000 leituras ao longo de um período de cinco anos (1.940 a 1.945).

A temperatura de topo máxima, obtida durante o experimento, foi de 50°C, quando a temperatura do ar se encontrava a 36°C (verão). A temperatura de topo mínima foi de -23°C, para uma temperatura do ar de -30°C (inverno).

Os autores verificaram que a frequência anual do gradiente térmico foi de 68% do tempo apresentando gradientes negativos, sendo o máximo gradiente térmico positivo de 0,118°C/mm.

Para Swanberg (1945) uma reversão leve de temperatura alivia as forças de atrito no subleito e lança prévios acúmulos de tensões de retração o que vem concordar com as colocações de Bradbury (1938), que afirma que a retração térmica usada no cálculo do coeficiente de atrito médio do subleito é o maior valor contínuo de retração que usualmente ocorre em um único dia.

Informações sobre os gradientes térmicos foram importantes para o cálculo das tensões devidas ao empenamento pois, segundo Swanberg (1945), sabendo-se a duração dos gradientes térmicos pode-se estimar o número anual de repetições de carga combinadas com a máxima tensão de empenamento e assim computar a provável vida útil do pavimento por meio de modelos de fadiga.

4.1.5 AASHO *Road Test*

O AASHO *Road Test* foi o mais importante experimento em escala real realizado nos Estados Unidos da América. A construção da pista de teste teve início em 1.956, entre as cidades de LaSalle e Ottawa, Illinois, sendo liberadas para os testes em 1.958. Durante o ano de 1.961 os dados coletados durante o experimento começaram a ser tratados pela equipe de pesquisa.

Dentre os objetivos do AASHO *Road Test* (AASHO, 1962) estavam a determinação da relação de equivalência entre cargas de diferentes tipos de eixos, de diferentes magnitudes e configurações e então verificar o desempenho de diferentes espessuras de pavimentos (asfálticos e de concreto simples e reforçado) assente em diferentes espessuras de base e sub-bases.

Fica claro nos relatos do AASHO *Road Test* que a generalização e extrapolação dos dados para outras condições que não aquelas do experimento deve ser baseada em estudos experimentais e outras evidências dos efeitos do desempenho dos pavimentos para variações climáticas, tipo de solo, materiais, técnicas construtivas e tráfego.

A escolha do local foi devida à uniformidade do solo, do clima típico do norte dos EUA e também pelas facilidades de execução da obra. O clima da área de teste é temperado, apresentando na época da construção uma média mensal de precipitação de 63 mm e uma média de temperatura no verão de 25°C e no inverno de - 2,8°C.

Foi avaliado durante os testes conduzidos na pista experimental o efeito do empenamento em placas de pavimento de concreto simples com espessuras de 63 mm, de 127 mm, de 240 mm e de 317 mm; construídas diretamente sobre o subleito ou sobre 150 mm de base.

Foram instalados termopares em 28 seções. Nas placas com 63 mm de espessura foram instalados termopares a 6 mm e a 50 mm do topo da placa; nas placas de 127 mm, os termopares foram instalados em cinco posições: 6 mm, 38 mm, 63 mm, 89 mm e 114 mm do topo da placa; nas placas de 240 mm os termopares foram instalados em seis posições: 6 mm, 50 mm, 101 mm, 152 mm, 203 mm e 228 mm do topo da placa; e nas placas de 317 mm os termopares também foram instalados em seis posições: 6 mm, 50 mm, 127 mm, 203 mm, 279 mm e 305 mm do topo da placa.

Os termopares foram posicionados a 152 mm da borda livre e a 355 mm da junta transversal do pavimento; a 152 mm da borda e no meio da placa; e também a 320 mm da linha central e entre as juntas longitudinais.

Os termopares das 28 seções de teste foram conectados a placas de terminais da seguinte: uma única placa de terminais para 3 seções de 60 mm de espessura e 3 seções de 127 mm de espessura; uma outra placa de terminais para 3 seções de 240 mm de espessura e 3 seções de 317 mm de espessura; as seções restantes tiveram seus termopares conectados a placas individuais.

Para a coleta de dados, foram conectados às placas de terminais equipamentos que gravavam os dados em cartões perfurados a cada 5 minutos e este equipamento trabalhava a uma taxa de 1 termopar por segundo.

As temperaturas de topo máxima e mínima durante o verão foram 40°C e 26°C, respectivamente. Para as temperaturas de fundo foram obtidos valores máximos de 31°C e mínimos de 27°C, para placas de 240 mm de espessura. Os diferenciais térmicos máximos e mínimos obtidos foram de 9°C e de -1°C, durante o verão para placas de 240 mm; também foram observados diferenciais térmicos de 15°C em placas de 310 mm de espessura.

4.2 Estudos Experimentais Recentes

4.2.1 Pista Experimental do Estado da Flórida

Em 1.982 foi construída uma pista experimental em concreto, no Centro de Materiais e Pesquisas do Departamento de Transportes da Florida, localizado dentro do campus da Universidade da Flórida, em Gainesville.

Esta pista experimental é constituída de seis placas de concreto de cimento Portland, com resistência a compressão igual a 35 MPa e resistência à tração na flexão igual a 4,7 MPa; cada uma das placas possui 3,66 m de largura por 6,10 m de comprimento e 230 mm de espessura, apoiadas sobre material de classificação A-3, segundo a AASHTO, e não estão sujeitas a nenhum tráfego (Armaghani *et al.*, 1987 e Richardson e Armaghani (1987).

Foram instalados quatorze termopares em duas placas durante a concretagem da pista experimental. Estes termopares estão localizados a aproximadamente 0,90 m da borda longitudinal (no centro da borda) de cada uma das placas e foram posicionados a 25 mm, 63 mm, 114 mm, 165 mm e 203 mm do topo da placa para a placa de controle e a 25 mm do topo e 25 mm do fundo para a outra placa instrumentada.

A coleta de dados foi realizada apenas nos termopares instalados no centro da placa de controle, portanto para apenas cinco instrumentos e uma posição. A temperatura do ar foi monitorada utilizando-se de outro termopar colocado dentro de uma caixa de madeira pintada de branco, com fundo aberto e furos nas laterais, montada em um poste localizado a 1,50 m da pista experimental.

Para a coleta dos dados de temperatura, os termopares foram conectados a um programa de aquisição de dados, programado para coletar os dados a cada 15 minutos, em alguns casos em horários variados dependendo da

pesquisa que estava em andamento. Armaghani *et al.* (1987) monitoraram as temperaturas de 1.983 a 1.986 e Richardson e Armaghani (1987) monitoraram as temperaturas novembro de 1.983 até agosto de 1.984.

A partir dos dados de temperatura coletados foram analisadas as temperaturas médias do pavimento, dos diferenciais térmicos e as características dos diferentes gradientes térmicos ao longo da espessura da placa.

A temperatura média foi obtida da média das temperaturas lidas nos cinco termopares de cada posição e os diferenciais térmicos foram computados através da subtração da temperatura lida no primeiro termopar da temperatura lida no último termopar (do topo para o fundo), sendo que diferenciais térmicos negativos implicam em uma temperatura de topo menor que a temperatura do fundo da placa e o diferencial térmico positivo é o inverso: a temperatura no topo é maior que a temperatura no fundo.

Em julho de 1.986 um instrumento adicional foi instalado na superfície do pavimento para medir a temperatura na superfície. Richardson e Armaghani (1987) verificaram que enquanto a temperatura do primeiro termopar (do topo para o fundo) registrava 46,7°C, a temperatura na superfície era de 50°C.

Também foi verificado por Richardson e Armaghani (1987) que durante a noite a temperatura do pavimento variava conforme a temperatura do ar e que em dias claros, com elevada incidência de radiação solar, a temperatura do pavimento era bem mais elevada que a temperatura do ar.

Armaghani *et al.* (1987) verificaram que a radiação solar era responsável pelo aumento da taxa de variação entre a temperatura do ar e a temperatura do pavimento durante o dia, obviamente; as placas do pavimento de CCP

atingiam sua temperatura mínima diária entre 6 horas e 8 horas e a sua temperatura máxima entre 12 horas e 14 horas.

Durante o experimento da Flórida verificou-se que a temperatura do pavimento apresentou-se mais elevada que a temperatura do ar aproximadamente 10°C e que as temperaturas de topo máximas e mínimas normalmente ocorreram de 1 a 2 horas após a temperatura do ar alcançar seus valores máximos e mínimos, sendo que a temperatura de fundo atingiu valores máximos e mínimos de 2 a 3 horas após a temperatura de fundo alcançar os mesmos níveis.

As inversões entre as temperaturas de topo e fundo ocorriam entre 17 horas e 20 horas (topo para fundo) e entre as 8 horas e 11 horas (fundo para topo). Os diferenciais térmicos máximos negativos e positivos ocorreram às 6 horas e às 14 horas, respectivamente, sendo que tais horários quase coincidiram com a mínima e máxima temperatura do pavimento.

Foram obtidos valores máximos e mínimos para a temperatura de topo de 38°C (14 horas) e 16°C (7 horas). A temperatura de fundo máxima foi de 29°C (17:00) e a mínima de 21°C (9 horas). O diferencial térmico máximo positivo foi de 13°C (14 horas) e o diferencial térmico máximo negativo foi – 8°C (7 horas)

As freqüências de ocorrência de diferenciais térmicos negativos foram de 54% do tempo entre as 5 horas e 7 horas e de 33% do tempo entre as 12 horas e 15 horas, ou seja, durante os intervalos de horários observados em 67% do tempo o diferencial térmico foi negativo.

Armaghani *et al.* (1987) verificaram que a temperatura em placas de pavimento de concreto de cimento Portland variava drasticamente em resposta a uma súbita exposição à umidade e obscurecimento da superfície do pavimento por sombras ou nuvens, além do que em dias ensolarados e

sem nuvens a variação da temperatura do pavimento se aproximava a uma senóide.

Durante as análises dos dados de Armaghani *et al.* (1987), foram encontradas diferenças entre a temperatura do ar e do pavimento de 8 e 13°C, ocorrência anteriormente observada por Teller e Sutherland (1935), sendo esta diferença menor em dias nublados ou com chuva.

Durante a monitoração e coleta de dados, Armaghani *et al.* (1987) analisaram também o comportamento do gradiente térmico em placas de concreto de cimento Portland e verificaram que ele é responsável pela magnitude e direção do empenamento e que a distribuição de temperatura ao longo da placa pode ser representada por uma equação parabólica, conforme apresentado no Capítulo 3.

Paralelamente à monitoração e coleta de dados, os autores realizaram experiências para verificar o efeito de sombras e da umidade nas placas da pista experimental.

Para estudar o efeito da sombra, geralmente associada a dias nublados, foram medidas as temperaturas dos termopares posicionados no centro e na borda da placa de controle durante dois dias ensolarados consecutivos. Durante as primeiras 24 horas, a posição central foi coberta por uma caixa branca de madeira, que foi retirada ao término destas 24 horas. Observou-se que durante o dia a temperatura do topo do termopar coberto pela caixa de madeira é mais baixa que aquela apresentada pelo termopar descoberto e que estas diferenças passam a ser insignificantes durante a noite.

Para estudar a temperatura em pavimentos de concreto quando subitamente expostos a umidade, por exemplo quando ocorre uma chuva de verão durante uma tarde ensolarada, foram realizadas simulações de chuva aplicando-se água a 24°C na superfície seca do pavimento. Verificou-se que

antes da aplicação da água o gradiente térmico era linear (15 horas) e que aproximadamente 1 hora após a aplicação da água o gradiente térmico passou a não linear. A superfície do pavimento apresentou uma queda de aproximadamente $4,5^{\circ}\text{C}$ enquanto a temperatura do fundo não sofreu nenhuma alteração.

Armaghani *et al* (1987) verificaram que a não linearidade do gradiente térmico está associada com o rápido resfriamento da superfície do pavimento, gerando elevadas tensões de tração que podem se tornar críticas se combinadas com as tensões induzidas pelas cargas do tráfego e pelo empenamento da placa, conforme apresentado no Capítulo 2.

4.2.2 Experimento de Campo no Chile

Este experimento de campo foi realizado em 21 seções de teste selecionadas ao longo da principal rodovia chilena (entre as latitudes 32°S e 41°S e longitudes 70°W e 73°W), construída em concreto de cimento Portland sem barras de transferência de carga, com espessuras variando de 210 mm a 260 mm.

Para monitorar as temperaturas foram instalados termopares em cada uma destas seções, colocados em cinco posições entre o topo e o fundo das placas, o que permitiu medir temperaturas internas; os deslocamentos verticais (absolutos) das placas, bem como as aberturas das juntas transversais foram medidas com o auxílio de extensômetro eletrônico do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados analógico-digital para coletar simultaneamente os dados de temperatura e deslocamentos causados pelas cargas do tráfego e pelas variações de temperatura. O estudo analisou os resultados de medidas sistemáticas de temperatura e de deslocamentos verticais durante os anos de 1.986 e 1.987 em todas as seções de teste.

As seções com 220 mm de espessura, localizadas na latitude 33°27'S, apresetaram valores de temperatura de topo máxima e mínima, durante o verão, de 49,5°C (15 horas) e de 16°C (7 horas), respectivamente. As temperaturas de fundo máxima e mínima foram de 35°C (19 horas) e de 28°C (9 horas), respectivamente.

Os diferenciais térmicos máximos positivos e negativos foram de 17°C (gradiente térmico de 0,07°C/mm) e de -12,5°C (gradiente térmico de -0,06°C/mm), respectivamente. Os autores verificaram que o diferencial térmico foi negativo 5.812 horas por ano, representando 66% do tempo.

Poblete *et al.* (1988) observaram que é necessário que a temperatura no topo da placa seja maior que no fundo para ocorrer o pleno contato entre a placa e sua fundação.

Foi observado um “permanente” empenamento das placas para cima, que ocorre independentemente da temperatura, causando considerável perda de suporte nas bordas. Segundo Poblete *et al.* (1988) esta condição pode ser revertida somente durante as horas de elevada radiação solar, ou seja, quando existir um significativo diferencial térmico positivo (o clima no local é temperado e bastante influenciado por massas de ar frias do Pólo Sul para o Pacífico).

Para Poblete *et al.* (1988) um empenamento da placa para cima, com parcial contato do centro da placa com a fundação e uma pequena restrição das placas contíguas devida à abertura de juntas pode ser a condição mais desfavorável para garantir a aderência entre a placa e a base; uma situação inversa, quando ocorre um empenamento para baixo foi considerada menos crítica.

4.2.3 Experimento de Campo do Estado de Illinois

Na intenção de validarem um modelo matemático que permitisse desenvolver um base mecanicista para o projeto de pavimentos de concreto simples em juntas, Barenberg e Zollinger (1990) instrumentaram durante o verão de 1.986 22 seções de pavimentos de concreto simples com barras de transferência em Carlyle e Freeport, Illinois, EUA. As placas tinham espessuras de 190 mm, 220 mm, 240 mm e 250 mm e comprimento de 4,50 m e 6,00 m.

Strain gages foram estrategicamente posicionados para que fosse possível medir a máxima deformação causada pelas cargas de roda nas proximidades da borda do pavimento e também a deformação causada pelo empenamento da placa.

Os *strain gages* foram colocados no centro da borda longitudinal e a um quarto do canto, no topo e no fundo da placa; também foram instalados no canto da placa e neste caso apenas no topo, conforme Figura 4.2.

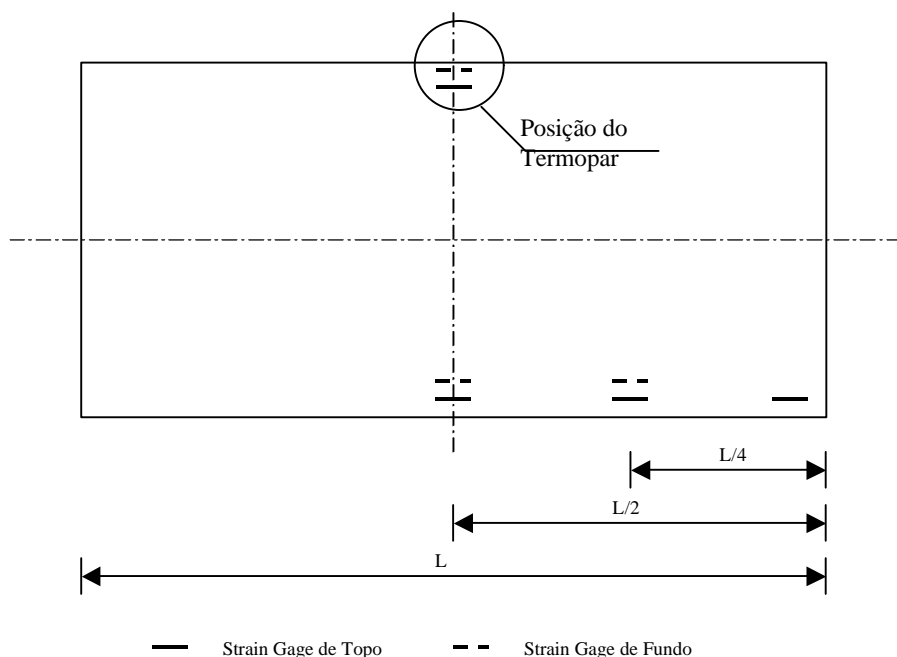


Figura 4.2 Posicionamento dos instrumentos (Adaptado de Barenberg e Zollinger, 1990)

Um tubo de PVC foi colocado em uma trincheira de 100 mm de profundidade aberta na borda longitudinal adjacente ao acostamento, onde seriam passados os cabos dos instrumentos, que seriam levados até uma estação de coleta.

Todos os cabos foram devidamente identificados, indicando qual era o instrumento, sua posição e sua localização na placa. Os *strain gages* de fundo foram presos a suportes de metal em forma de U, que eram chumbados, em suas devidas posições, logo após a execução da base em concreto compactado com rolo.

As placas instrumentadas foram concretadas com muito cuidado, sendo que onde estavam os instrumentos, o concreto era colocado cuidadosamente ao redor e sobre o instrumento, para não danificá-los.

Foram realizadas três tentativas para encontrar o melhor modo de se colocar os *strain gages* de topo:

- 1^o) ranhurava-se o concreto endurecido e então adería-se o *strain gage* no local com uma nata de cimento. Este procedimento era bom mas, não fornecia leituras imediatas de deformação e existia também uma preocupação sobre a eficácia a longo prazo da nata de cimento, o que seria essencial para transferir a deformação do concreto para o *strain gage*;
- 2^o) colocava-se um pino de madeira no concreto fresco para possibilitar a locação do *strain gage*; assim que o concreto endurecia, o pino era retirado e colocava-se no seu lugar o *strain gage*, aderido com o mesmo tipo de nata de cimento do procedimento anterior. Este procedimento permitiu leituras de deformação mais cedo que o método anterior, mas havia ainda o problema com relação à eficácia da nata de cimento;

3º) colocava-se o *strain gage* no concreto fresco e compactava-se a área cuidadosamente. Os cabos também foram colocados no concreto fresco e cobertos por ele com a ajuda de uma colher de pedreiro. Este procedimento permitia a leitura imediata das deformações no concreto, mas o alinhamento dos *strain gages* de topo com os de fundo foi mais difícil neste procedimento; mesmo assim, este procedimento foi utilizado nas demais concretagens.

As deformações eram medidas em termos de variações na voltagem, que era amplificada, processada e gravada. Para o caso de cargas estáticas os *strain gages* eram lidos por um medidor de deformação portátil e os dados gravados manualmente; já para o caso de cargas dinâmicas, as leituras eram realizadas por meio de gravadores que permitiam a leitura de 10 canais de dados simultaneamente e estas leituras eram gravadas em uma fita e posteriormente transferidas para disquetes.

Uma das maiores dificuldades na coleta de dados foi minimizar os ruídos elétricos oriundos de cabos de alta tensão, partidas de automóveis, sinais de rádio, etc. Para tanto, os cabos e conectores utilizados eram de alta qualidade, mas mesmo assim ao gravar as deformações devidas a cargas dinâmicas houve significativo problema com o ruído, sendo então o problema sanado com a instalação de filtros de alta frequência.

Para medir temperaturas e gradientes térmicos nas placas do pavimento, termopares foram instalados em duas posições ao longo da espessura da placa, próximo do fundo e próximo do topo, e posicionados no canto da placa. Estes termopares foram presos às barras de transferência por presilhas.

Durante os testes, os termopares eram lidos em um potenciômetro ou termômetro digital e para leituras contínuas (24 horas ou mais) utilizou-se um sistema de gravação portátil, programado para coletar os dados em

intervalos preestabelecidos e os dados deste gravador eram transferidos para disquetes e lidos em microcomputadores.

Foram obtidos valores médios de gradientes térmicos positivos e negativos, para placas de 190 mm de espessura, de $0,04^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ e de $-0,014^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, tanto na primavera de 1.987, quanto no inverno de 1.988, sendo que durante a primavera o gradiente térmico foi negativo durante 40,5% do tempo e durante o inverno 86,5% do tempo. A frequência anual do gradiente térmico negativo foi de 67%, 68% e 58,5% do tempo para placas de 190 mm, 240 mm e 250 mm de espessura, respectivamente.

Segundo simulações realizadas por Barenberg e Zollinger (1990) utilizando o programa *ILLI-SLAB*, para uma condição de base não aderida, as deformações se apresentaram maiores que para o caso de base aderida e se aproximaram muito dos valores obtidos em campo (Figura 4.3).

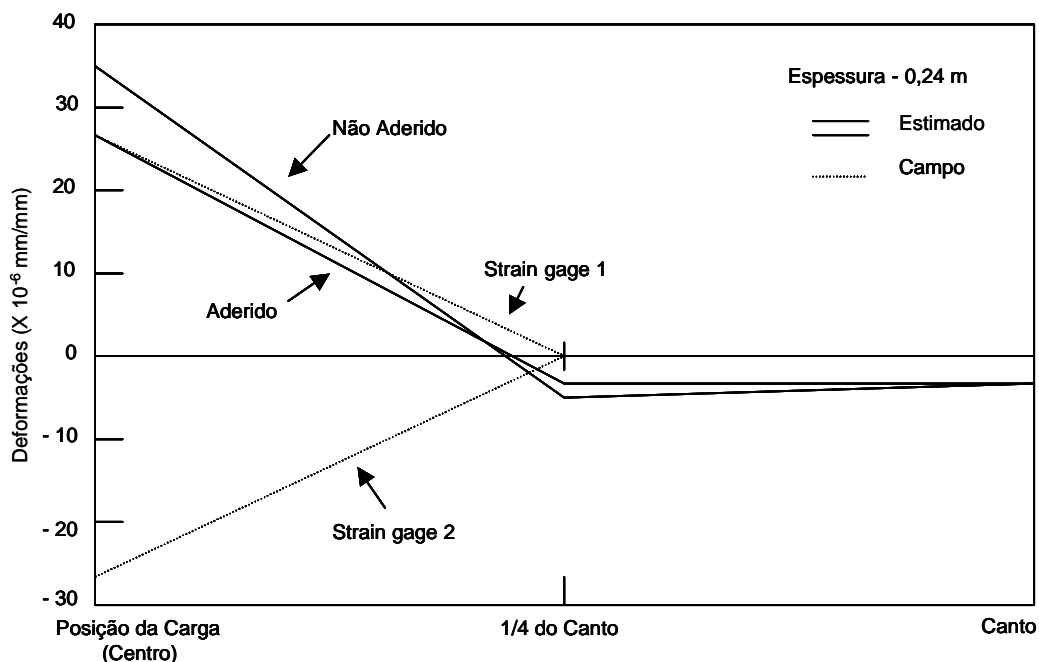


Figura 4.3 Deformações medidas em campo e calculadas utilizando o ILLI-SLAB (adaptado de Barenberg e Zollinger, 1990)

Os resultados obtidos nas seções de teste indicaram que os modelos utilizados em análises de pavimentos fornecem uma resposta muito satisfatória, como pôde ser visto na Figura 4.3: as respostas das análises para base aderida foram muito próximas das respostas de campo. Ao avaliar-se a precisão destes modelos é necessário saber a real condição do pavimento ou, segundo Barenberg e Zollinger (1990), alguns resultados serão bem diferentes do esperado.

Para Barenberg e Zollinger (1990), as condições climáticas têm um profundo efeito no comportamento de pavimentos de concreto simples e a instrumentação destes pavimentos é uma importante ferramenta para validação de modelos matemáticos.

4.2.4 Experimento de Campo do LCPC - França

Em 1991 deu-se início ao maior experimento realizado na pista de teste do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC). O objetivo da pesquisa foi checar os métodos de projeto de pavimentos de concreto utilizados na França.

Balay e Groux (1994) descreveram, as quatro estruturas testadas e suas respectivas instrumentações, apresentando e discutindo os resultados experimentais das medidas por meio de análises teóricas.

As modelagens numéricas foram realizadas utilizando o programa CESAR, desenvolvido pelo LCPC para comparar os resultados obtidos em campo para deslocamentos e deformações.

As medidas de temperatura foram realizadas em duas das quatro estruturas e foram instrumentadas com sete sensores de temperatura instalados na placa e na base. Uma série especial de *strain gages* foi utilizada para

monitorar o comportamento durante os ciclos diários de temperatura. Foram observados gradientes térmicos nulos ou negativos em 80% do tempo.

A interpretação dos sinais gravados pelos *strain gages* proporcionou a avaliação das deformações devidas aos efeitos da temperatura. Balay e Groux (1994) concluíram que a modelagem por elementos finitos permite reproduzir o funcionamento complexo de estruturas reais e também permitem mostrar que a variação dos efeitos térmicos sobre as tensões e a transferência de carga não são independentes.

5

Condições Climáticas na Área da Pesquisa

5.1 Unidades Climáticas da Cidade de São Paulo

Utilizando-se do Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo, elaborado pelo Prof. Prof. Dr. José Roberto Tarifa e pelo Geógrafo Gustavo Armani do Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da FFLCH-USP em 2.000, descreve-se aqui as unidades climáticas da Cidade de São Paulo (Figura 5.1).

Para a elaboração do Atlas, os autores utilizaram-se de todo o acervo de conhecimento existente sobre o clima da cidade de São Paulo do Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo; dos dados da Normal Climatológica do Mirante de Santana de 1.961 a 1.990 (para a caracterização do Clima Local da Bacia Paulistana); dos dados de frequências e direções do vento do Aeroporto de Congonhas entre 1.987 e 1.993 (estação localizada numa posição central em relação à mancha urbana da cidade e as leituras de vento são realizadas 24 horas por dia).



Figura 5.1 Região Metropolitana e Município de São Paulo (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo - <http://www.prodiam.sp.gov.br>)

A região Metropolitana da cidade de São Paulo se encontra a uma latitude de $23^{\circ}21'S$ e longitude de $46^{\circ}44'W$, junto ao trópico de Capricórnio, estando portanto localizada em uma realidade climática de transição, entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude e o Clima Subtropical (Tarifa e Armani, 2000).

Para a configuração das unidades climáticas naturais do município de São Paulo, os autores trataram apenas os aspectos naturais do clima, não levando em consideração a metrópole que poderia modificar as propriedades climáticas naturais, tendo sido então considerado pelos autores condicionantes como topografia, ventos predominantes, etc.

A partir das análises do material obtido em conjunto com as observações topo e mesoclimáticas de campo (analisando também o relevo, a drenagem

e a distância do oceano), os autores puderam construir a carta de Unidades Climáticas Naturais do Município de São Paulo, conforme apresentada na Figura 5.2.

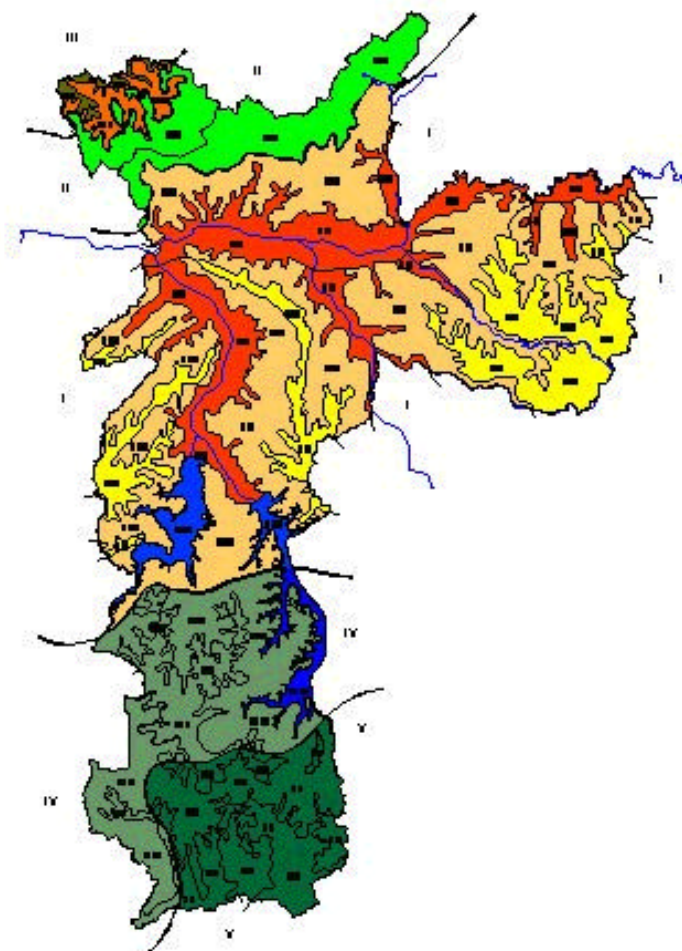


Figura 5.2 Mapa das Unidades Climáticas Naturais da cidade de São Paulo (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo - <http://www.prodham.sp.gov.br>)

Segundo o Atlas Ambiental, a Unidade Climática Natural do local onde a pista experimental objeto de estudo desta tese foi construída, ou seja, o *Campus* da Universidade de São Paulo (paralelo 23°33'01"S, referenciado ao marco de código internacional 91607, localizado na raia olímpica do *Campus*), seria o clima local definido como Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico (identificado como I na Figura 5.3) e ocupa

aproximadamente a área da Bacia Sedimentar de São Paulo, no mesoclima (IB) das colinas intermediárias, morros baixos, terraços e patamares, pertencendo portanto a unidade climática natural IB6a, apresentada na Figura 5.3 (altitude local igual a 721,68 m).

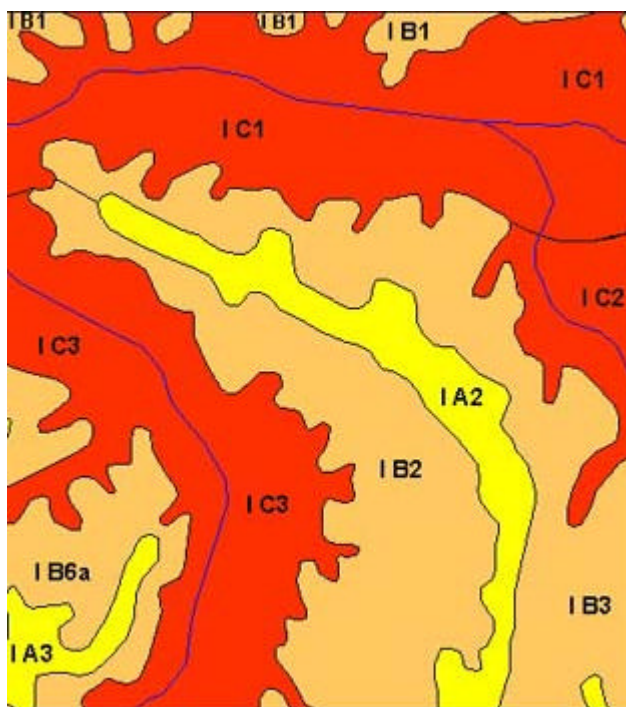


Figura 5.3 Unidade Climática Natural da Área de Pesquisa - IB6a (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo - <http://www.prodiam.sp.gov.br>)

Tarifa e Armani (2000) concluíram que a Região Metropolitana da Cidade de São Paulo está estruturada em quatro macro-unidades climáticas urbanas, divididas em quatro níveis: Local/Meso, Meso, Meso/Topo e Topo/Micro climáticas (Figura 5.4), que resultam das relações entre o uso do solo, fluxo de veículos, densidade populacional, densidade das edificações, orientação e altura das edificações, áreas verdes, represas, parques e emissão de poluentes; e também da temperatura da superfície, do ar, umidade, insolação, radiação solar, qualidade do ar, pluviosidade, ventilação.

Para a delimitação das Unidades Climáticas Urbanas, Tarifa e Armani (2000) consideraram como fator de elevada importância a presença ou não de áreas verdes.

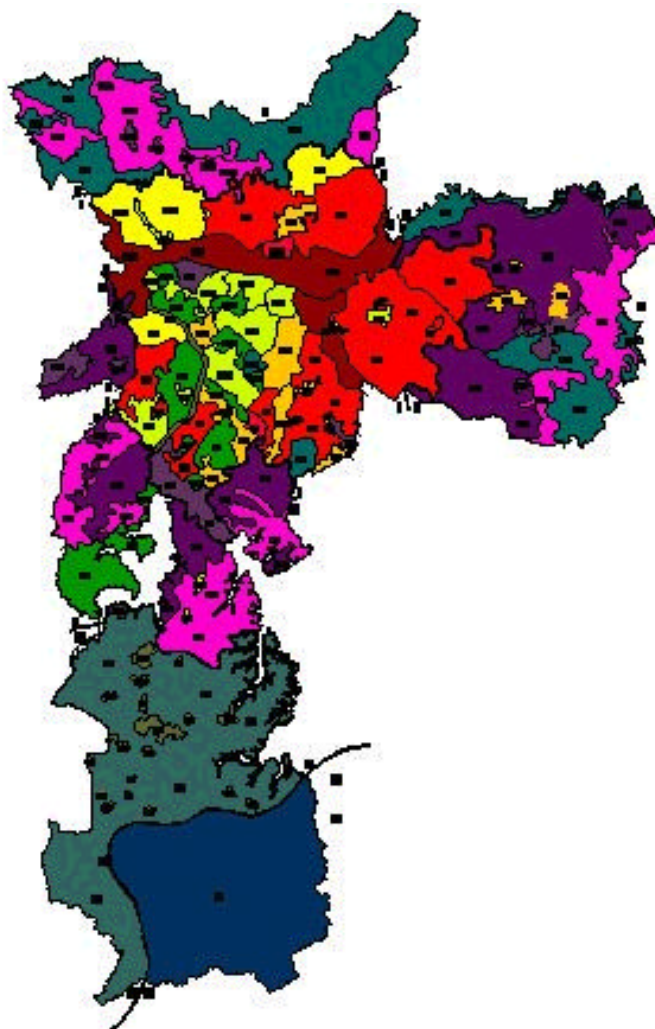


Figura 5.4 Mapa das Unidades Climáticas Urbanas da cidade de São Paulo
(Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo -
<http://www.prodiam.sp.gov.br>)

Utilizando-se desta classificação, a área de pesquisa está localizada na região climática compreendida pela travessia do Rio Pinheiros no sentido da Zona Oeste (Raposos Tavares e BR-116) entre altitudes de 720 m (Raia Olímpica da USP) à aproximadamente 800 m. Segundo o Atlas Ambiental, esta seria uma unidade climática privilegiada pelo verde, denominada ID2 (Figura 5.5).

O *campus* possui imensas áreas verdes mas, segundo Tarifa e Armani (2000), está localizado em uma unidade climática onde o aquecimento térmico da superfície é maior que nos demais bairros verdes, provavelmente devido ao fato de haver extensas coberturas de concreto e vias estacionamentos pavimentados.

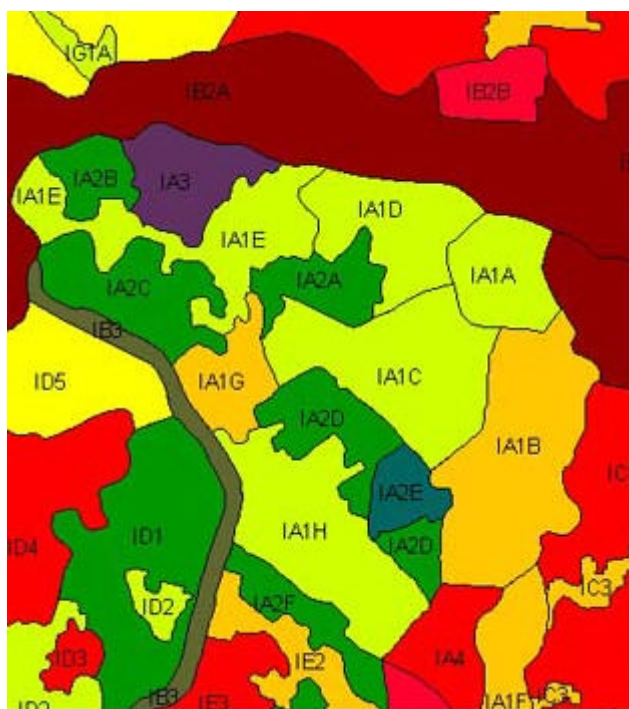


Figura 5.5 Unidade Climática Urbana da Área de Pesquisa (ID2) (Fonte: Atlas Ambiental da Prefeitura Municipal de São Paulo - <http://www.prodram.sp.gov.br>)

5.2 Classificação Climática da Área de Pesquisa

Conforme já mencionado, o *campus* da Universidade de São Paulo (Cidade Universitária) na capital Paulista encontra-se no paralelo $-23^{\circ}33'01''$ (SAD-69) referenciado ao marco de código internacional 91607, localizado na raia olímpica.

Para contextualizar tal posicionamento geográfico é interessante recordar que o Trópico de Capricórnio situa-se no paralelo 23°27'S, o que de início leva a crer que a cidade de São Paulo situa-se em “zona de transição” em termos de climatologia.

Esta região, em termos de clima, é ainda de caráter especial pois encontra-se a cidade de São Paulo situada muito próxima à Serra do Mar por um lado e ao seu norte, também junto à Serra da Cantareira, o que caracteriza um planalto incrustado em um platô. Tais características afetam o comportamento do clima na região, em especial pela ocorrência de chuvas orográficas que se formam nas proximidades da Serra do Mar.

Em ambas as regiões de serra mencionadas, a vegetação nativa é tipicamente tropical, com mata bastante densa e vegetação de médio porte. Apesar desta situação, torna-se bastante difícil uma classificação por zona climática bem definida, pois as classificações existentes são bastante abrangentes, podendo não representar claramente uma situação comum para a maior parte do Estado de São Paulo ou ainda para o país.

Para justificar a existência desta zona de transição, a colocação de Monteiro (1973) *apud* Tarifa e Armani (2000) faz-se muito apropriada:

“... Ao sul desta faixa temos a ver com um clima regional em latitude subtropical, permanentemente úmido pela atividade frontal. Mesmo nos anos de atuação mais reduzida do ar polar, a sua participação não é inferior a 40%, podendo elevar-se a 75% nos anos de maior atividade. Ao norte define-se como o Outono-Inverno, embora isso se apague no litoral. A menor penetração do ar polar no setor setentrional reduz a quantidade de chuvas frontais de sul para norte, conduz o mais das vezes ao bom tempo...”

Desta maneira fica claro que esta zona de transição alterna as estações (quente e úmida e fria e um pouco mais seca) juntamente com variações no ritmo e sucessão dos tipos de tempo.

Segundo a classificação climática de Koppen, a cidade de São Paulo possui o clima tipo Cwa, característico de zonas quentes e úmidas com inverno seco, sendo as condições a sul do estado Cfa e Cfb (subtropicais) e a norte do estado Aw (tropical), portanto encontra-se entre limites do clima tropical para o clima temperado.

De acordo com Nogami e Vilibor (1995), o emprego da classificação climática proposta por Koppen em climas típicos do Estado de São Paulo é muito precária, principalmente para os tipos climáticos prevalentes em latitudes maiores do que aquelas dos trópicos de Câncer e Capricórnio. O clima Cfa ocorre tanto no sul do Estado de São Paulo, onde o ambiente é tropical, não ocorrendo portanto o congelamento do solo, como na região de Washington (EUA), onde ocorre congelamento do solo.

Extraí-se ainda de Nogami e Vilibor (1995) a seguinte observação em sua obra dedicada à pavimentação de estradas e rodovias, sobre o emprego da classificação climática proposta por Koppen em climas típicos do Estado de São Paulo:

“No estado atual de desenvolvimento da geotécnica das regiões tropicais, a caracterização climática, mediante o uso das classificações disponíveis, pouco contribuiria para o desenvolvimento de critérios geotécnicos e construtivos mais apropriados para as regiões tropicais.”

Acrescente-se aqui, que a região de Foz do Iguaçu abaixo do paralelo 25°S, incluindo inclusive área nordeste da Argentina, apresenta, em termos de

vegetação e solos, características típicas dos trópicos, o que vem ainda reforçar a assertiva dos mencionados pesquisadores.

As inconsistências muitas vezes presentes na classificação tradicional levaram Setzer (1966) a propor uma adequação na classificação de Koppen para os tipos climáticos no Estado de São Paulo, conforme apresentado na Tabela 5.1, onde são resumidas as características de clima (temperatura e precipitação) típicas do Estado de São Paulo.

Tabela 5.1 Condições climáticas no Estado de São Paulo (Setzer, 1966)

Dado Climático	Capital	Extremos no Estado
Temperatura Média Anual	18°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 21°C na zona de divisa com Mato Grosso do Sul e com Minas Gerais (desde o sul de Pereira Barreto até o Norte de Fernandópolis) ▪ 17°C no limite sul do estado em divisa com o Paraná ▪ 13°C na região de Campos do Jordão
Temperatura média no mês mais quente (Janeiro)	22°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 25°C no extremo oeste e norte do estado ▪ 25°C em praticamente toda a faixa litorânea
Temperatura média no mês mais frio (Julho)	15°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 19°C a noroeste e norte do estado ▪ 18°C no litoral ▪ 9°C em Campos do Jordão
Média das máximas temperaturas (Janeiro)	28°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 32°C no extremo oeste e noroeste ▪ 31°C no litoral ▪ 28°C no extremo sul ▪ 24°C em Campos do Jordão
Média das mínimas temperaturas (Julho)	10°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 14°C no extremo oeste e noroeste ▪ 14°C no litoral ▪ 8°C no extremo sul ▪ 5°C em Campos do Jordão
Precipitação Atmosférica anual (mm)	1.300 mm	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2.000 a 3.000 mm na Serra do Mar ▪ 1.500 a 2.000 mm no litoral ▪ 1.200 a 1.500 mm no centro, norte e noroeste do estado
Dias de Geada	2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Não ocorrem no litoral ▪ 1 dia no noroeste do estado ▪ 1 a 2 dias na região central e oeste ▪ 8 a 16 dias em Campos do Jordão e no extremo sul

A partir dos dados apresentados, verifica-se a impossibilidade de congelamento do subleito durante invernos, face aos registros escassos de temperaturas inferiores a 4°C, tendo-se ainda em consideração os níveis de radiação solar que ocorrem (em geral no país como um todo),

impossibilitando portanto a ocorrência de climas mais próximos, assim por se dizer, aos climas de regiões tipicamente temperadas.

Para Setzer (1966), os tipos climáticos ao longo do ano para a cidade de São Paulo podem ser:

- 2 meses super-úmidos subtropicais: dezembro e janeiro
- 3 meses muito úmidos subtropicais: novembro, fevereiro e março
- 1 mês muito úmido temperado: outubro
- 1 mês úmido temperado: setembro
- 1 mês sub-úmido subtropical: abril
- 4 meses sub-úmidos temperados: maio a agosto

Desta maneira, acredita-se que, como assim como Nogami e Vilibor (1995), tais classificações tendem a introduzir tipos e sub-tipos mais abrangentes e complicados para as finalidades de engenharia geotécnica, ou mesmo para engenharia civil em geral.

Conforme referido, o clima Cwa da cidade de São Paulo, segundo Koppen, encontra-se entre limites do clima tropical para o clima temperado. Quanto ao total de chuvas no mês mais seco, observa-se que o limite de 30 mm é idêntico para climas Cwa, Aw e Cwb, não se diferenciando portanto quanto a pluviosidade. Para os tipos Cwa e Aw a temperatura média do mês mais quente deve situar-se acima de 22°C, como se verifica no limite arbitrado para a capital (Tabela 5.1). No mês mais frio, ao contrário, a temperatura média estaria abaixo de 18°C, o que leva aos tipos Cwa e Cwb, portanto, afastando-se algo do típico tropical.

Setzer (1966) em sua classificação pela efetividade da precipitação não diferencia o ambiente úmido subtropical daquele tropical, impondo valores

entre 250 e 350 para ambos, fazendo diferenciação apenas quanto ao aspecto térmico, quando limita em 22°C a temperatura média anual.

Diante dos contrastes entre tentativas de classificação dos tipos climáticos e as reais condições relacionadas a geotecnia de pavimentação, em especial no que diz respeito às condições de presença de solos intemperizados tropicais e de ocorrência de fenômenos relacionados ao congelamento de subleitos, a parte do aspecto da vegetação predominante na região de análise, prefere-se adotar para São Paulo a classificação proposta pelo IBGE (1998).

Observa-se que em tal classificação em termos de climas zonais ou genéticos todo o Estado de São Paulo, inclusive a faixa norte e oeste do Estado do Paraná, é enquadrada na zona de características tropicais do Brasil central, sendo que tais unidades foram diferenciadas não em termos rígidos de temperaturas médias anuais mas também no que diz respeito à pedologia e à flora. Se nas palavras do Prof. Ab'Saber "*a vegetação é o espelho do clima*", parece mais lógico uma maior flexibilidade no tratamento desta "zona de transição".

Quanto ao nível de insolação (radiação solar), as Figuras 5.6 a 5.11 apresentam variações mensais para o ano de 1.999, pode ser inferido que, durante os meses mais secos nas regiões sudeste, sul e centro-oeste, Belo Horizonte e Cuiabá são regiões com menor nebulosidade comparadas a Porto Alegre, onde o nível de insolação mensal apresenta-se, na média, mais baixo. São Paulo está localizada em posição intermediária às demais regiões mencionadas.

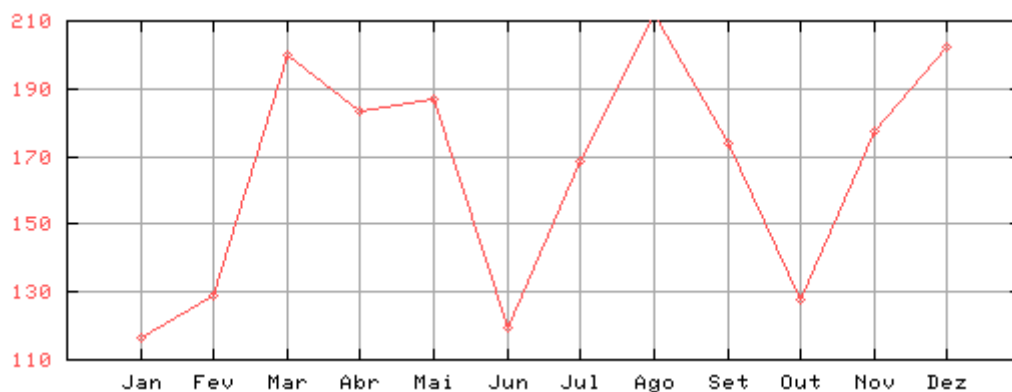


Figura 5.6 Insolação (1.999) em São Paulo (Fonte:www.inmet.gov.br)

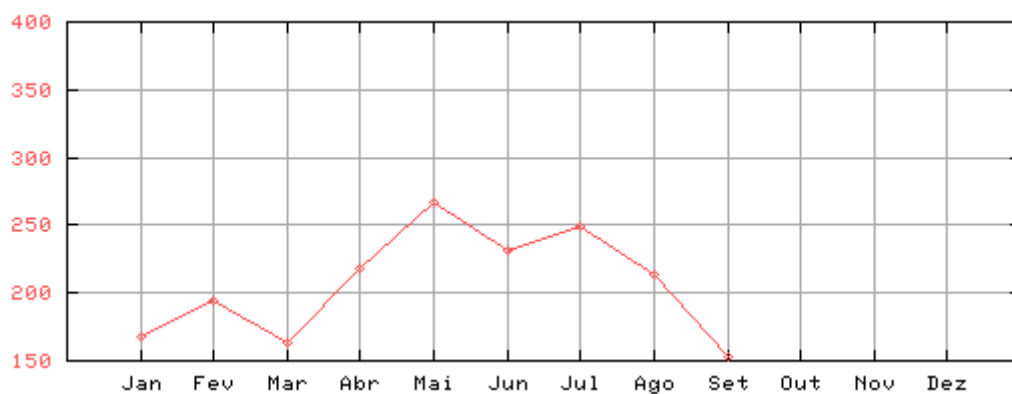


Figura 5.7 Insolação (1.999) em Cuiabá (Fonte: www.inmet.gov.br)

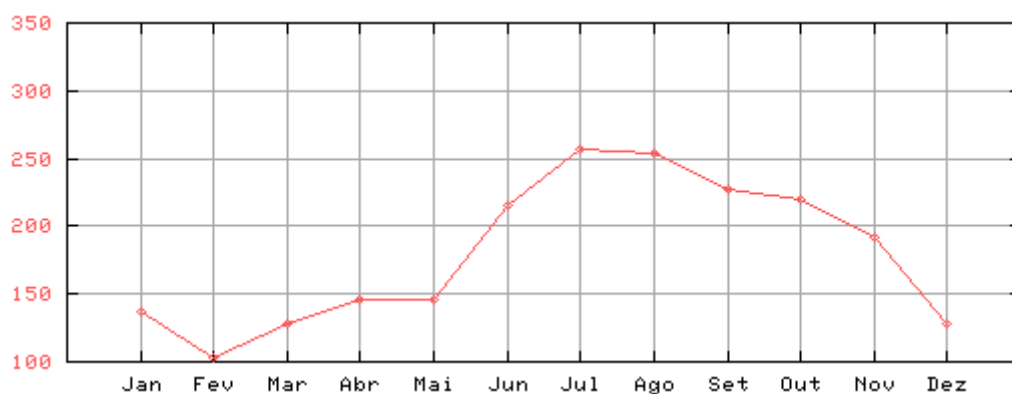


Figura 5.8 Insolação (1.999) em Belém (Fonte: www.inmet.gov.br)

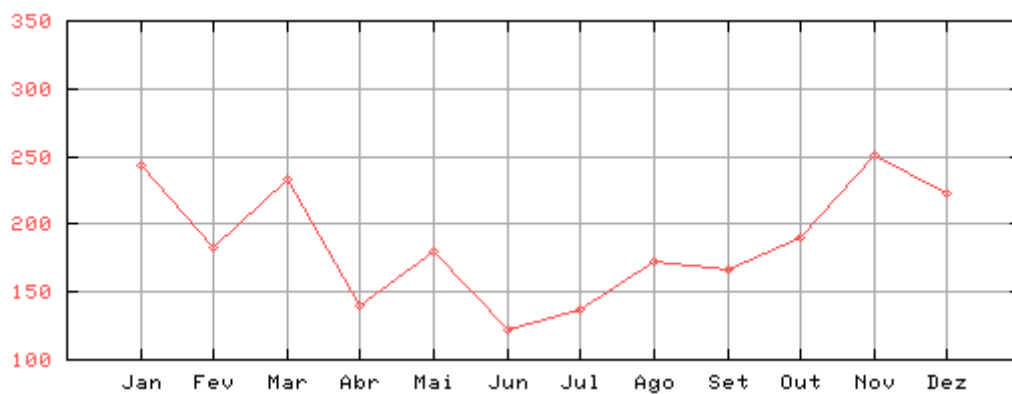


Figura 5.9 Insolação (1.999) em Porto Alegre (Fonte: www.inmet.gov.br)

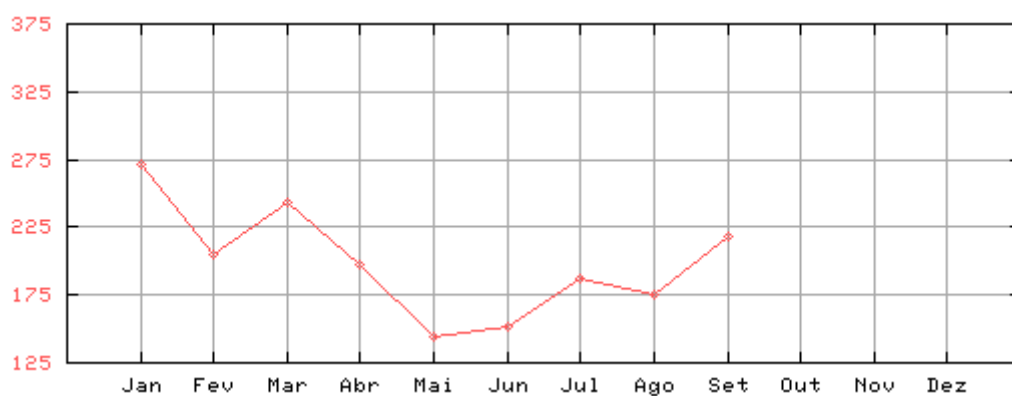


Figura 5.10 Insolação (1.999) em Salvador (Fonte: www.inmet.gov.br)

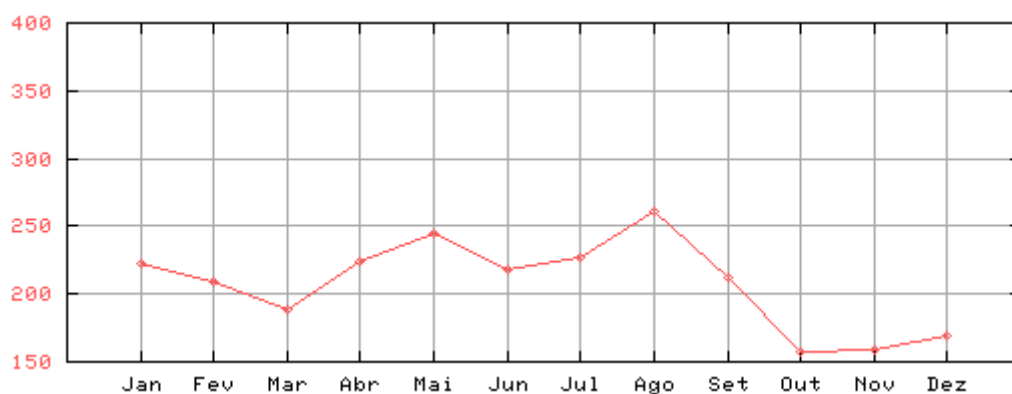


Figura 5.11 Insolação (1.999) em Belo Horizonte (Fonte: www.inmet.gov.br)

São Paulo apresenta níveis menores de insolação nos meses entre a primavera e o verão, característica de épocas de mais umidade, quando então a região de Porto Alegre apresenta níveis de insolação superiores e mais típicos da região central do Brasil.

A maior nebulosidade em São Paulo (Figura 5.12), comparando-se Porto Alegre (Figura 5.13) e Brasília (Figura 5.14) está associada ao posicionamento do platô Paulistano em relação ao relevo circundante.

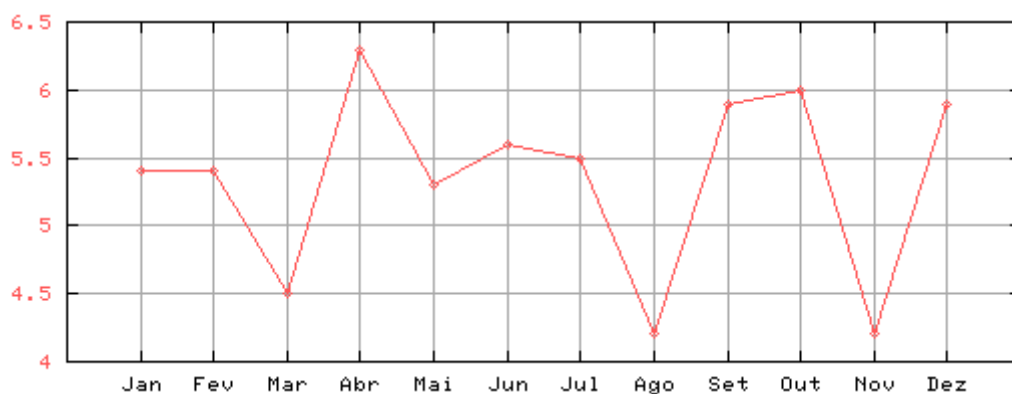


Figura 5.12 Nebulosidade (1.999) em Porto Alegre (Fonte: www.inmet.gov.br)

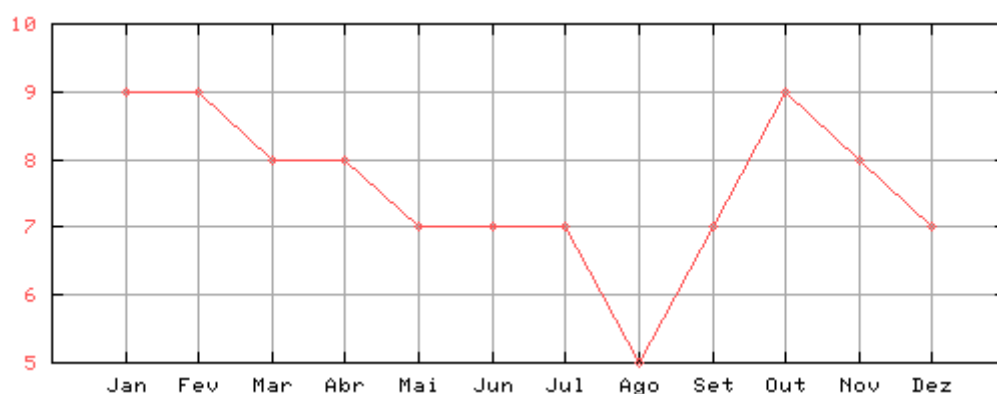


Figura 5.13 Nebulosidade (1.999) em São Paulo (Fonte: www.inmet.gov.br)

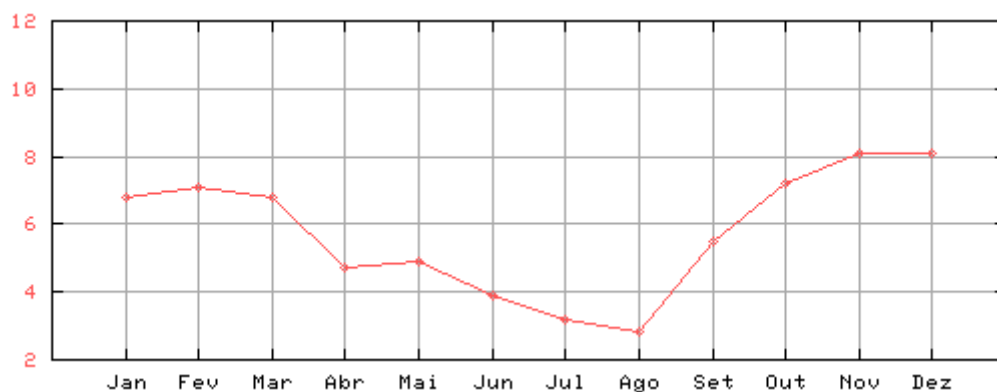


Figura 5.14 Nebulosidade (1.999) em Brasília (Fonte: www.inmet.gov.br)

Os níveis de insolação mais elevados nos meses de janeiro (série histórica do INMET), apresentam maiores valores para as regiões do Estado do Rio Grande do Sul e de estados do Nordeste na região costeira. São Paulo apresenta níveis mais semelhantes, para a mesma época, com as condições do Brasil central (Figura 5.15).

Quanto aos níveis de precipitação pode ser inferido de séries do INMET que São Paulo apresenta condições semelhantes às zonas tropicais da região central do país, excluídas regiões áridas do Nordeste, tanto nos meses de janeiro (240 - 320 mm) quanto nos meses de julho (0 - 80 mm), conforme Figura 5.16.

Em termos de representatividade destas ocorrências, para fins da pesquisa de gradientes térmicos em pavimentos de concreto, pode-se entender ser possível a obtenção de dados diários isolados que se aproximem de valores de temperatura observados em Belém do Pará (média máxima de 31,4°C e mínima de 23°C) e também daqueles observados em Porto Alegre (média máxima de 25,4°C e mínima de 15,3°C).

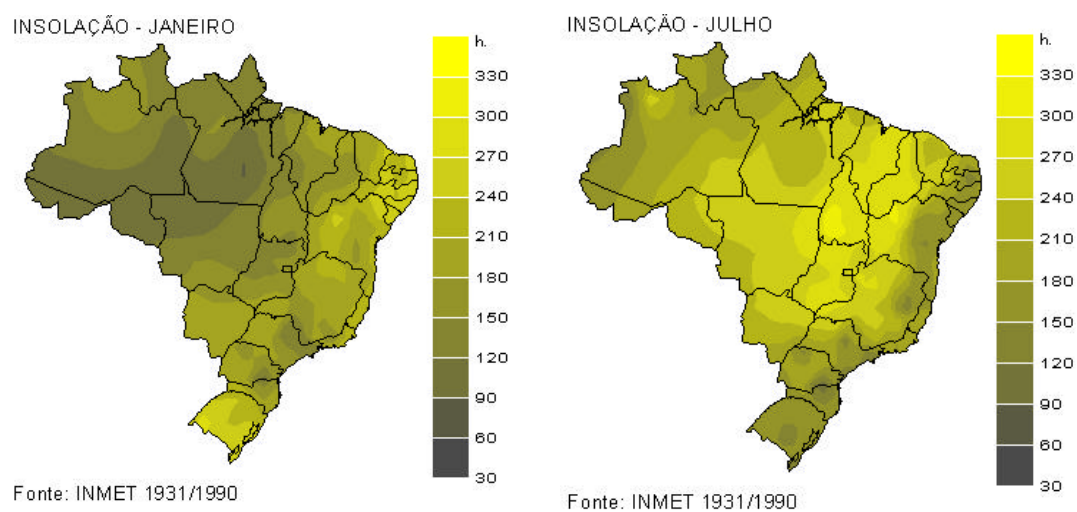


Figura 5.15 Níveis de Insolação média (horas/mês) (Fonte: www.inmet.gov.br)

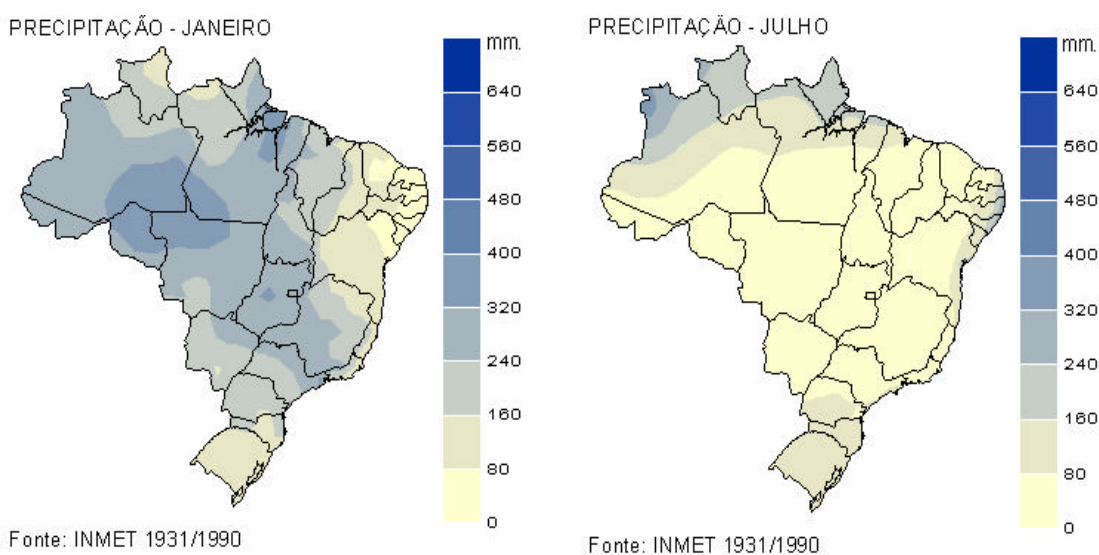


Figura 5.16 Níveis de Precipitação média (mm/mês) (Fonte: www.inmet.gov.br)

Com base nas informações apresentadas e discutidas, pode-se afirmar que a região de São Paulo apresenta, também sob o aspecto climático, maior similaridade com as zonas tropicais centrais do país, em termos de temperatura e pluviometria.

Dados do IBGE (1.999), com base entre 1993 e 1996, indicam que as temperaturas médias máximas e mínimas de São Paulo atingiram respectivamente 25,6°C e 15,8°C, com máxima absoluta de 34,6°C. Em termos de representatividade destas ocorrências para o estudo de gradientes térmicos em pavimentos de concreto, pode-se entender ser possível a obtenção de dados diários isolados que se aproximem de valores de temperatura observados em Belém (média máxima de 31,4°C e mínima de 23°C) e também daqueles observados em Porto Alegre (média máxima de 25,4°C e mínima de 15,3°C).

Não se pretendendo estabelecer, com bases nas discussões, uma tipificação definitiva de condições tropicais para a área da pesquisa, entende-se contudo que tal área apresenta condições climáticas ao longo de um ano médio que bem podem, isoladamente, representar outras condições encontradas em situações extremas no país, o que cria uma maior perspectiva de emprego dos dados e extrapolação das conclusões para outras regiões do país.

Seria importante recordar que, na revisão bibliográfica apresentada, fica muito claro que experimentos como este realizado na cidade de São Paulo foram por nove vezes realizados no exterior, porém, em nenhuma das situações, em locais que apresentassem condições de temperatura, chuvas e insolação ao longo de um ano em clima tropical; neste aspecto é um reforço grande recordar que tais pesquisas ocorreram em regiões com clima temperado muito bem definido e com situações claras de congelamento de subleitos e bases de pavimentos durante estações frias.

5.3 Estação Meteorológica do Centro Tecnológico de Hidráulica

Para a elaboração de estudos de correlação entre os gradientes térmicos observados nas placas de concreto da pista experimental e as condições

climáticas locais, o Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) situado dentro do campus da USP em São Paulo foi mobilizado e disponibilizando dados sobre condições climáticas observadas diariamente, de julho de 1.999 a fevereiro de 2.001, obtidos de uma estação meteorológica completa situada a 200 metros da pista experimental EPUSP.

A coleta destes dados foi imprescindível para que os dados de temperatura, coletados na pista experimental fossem confrontados com os dados climatológicos fornecidos, posto que a coleta dos dados do CTH é realizada diariamente, com exceção de sábados, domingos e feriados.

De posse dos dados fornecidos pelo CTH, selecionou-se os dados de interesse para a pesquisa, tais como: temperaturas do ar máximas e mínimas, umidade relativa do ar, dados pluviométricos, velocidade do vento, número de horas de insolação e condições do tempo (se choveu, se estava nublado, etc.).

Os dados fornecidos pelo CTH apresentam-se conforme as Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 e foram reorganizados em tabelas, conforme será apresentado no Capítulo 7.

Vale lembrar que o CTH coleta os dados sempre no horário oficial e os dados da pista experimental são coletados em horário solar; desta forma para proceder-se a análise de dados, todos os dados do CTH foram referidos ao horário solar e a lacuna existente nos dados fornecidos pelo CTH, de 30/03/2.000 a 14/06/2.000, foi devida a paralisação de suas atividades.

A partir dos dados já convenientemente tratados, procedeu-se um estudo mais profundo para que fosse possível a compreensão de alguns fenômenos que ocorreram durante a coleta de dados na pista experimental e que são discutidos no Capítulo 7.

Figura 5.17 Dados meteorológicos fornecidos pelo CTH

DAEE - CTH
SERVIÇO DE HIDROGRAFIA

GRUPO	ESTACÃO	DIA	MÊS	ANO
		09	10	101

OBSERVAÇÃO METEOROLÓGICA À SUPERFÍCIE

E3-145 M

Estação CIDADE UNIVERSITÁRIA Município SÃO PAULO - São Paulo

PREFIXO

LINHA 58

00 - SEM OCORRÊNCIA DOS FENÔMENOS ABAIXO
 40 - NEVOEIRO
 50 - CHUVISCO
 60 - CHUVA
 70 - GEADA
 80 - PANCADA DE CHUVA
 90 - TROVÃO OU RELÂMPAGO
 95 - GRANIZO
 [] - O USO DOS COLCHETES SIGNIFICA QUE O FENÔMENO NÃO OCORREU NO INSTANTE DA OBSERVAÇÃO.

PM 9H = 40,9 MM

Linha	OBSERVAÇÕES DIRETAS				
	00	7h	9h	15h	21h
00					
11					
12		24.2	23.8	32.0	22.2
13		20.2	21.0	23.2	21.3
14		91	78	48	92
15		22.6	23.8	32.0	32.8
21		20.8	21.0	23.6	21.8
22		93.2.5	93.3.2	93.0.3	93.1.1
23					
24		0.5	0.0	0.0	6.4
25		0.5	0.0	0.0	6.4
26			61	0.9.5	4.5
31			253.7.2.1	253.9.9.1	
32			2.9.0	3.6.5	
33			4.1.4	4.0.9	
41					
42					
43					
44		0.9	2.0	5.0	2.4
50		93.2.5	93.3.2	93.0.3	93.1.1
51					
52		23.6	26.0	33.8	29.6
53		8.8	7.4	4.2	8.8
54		0.0	0.0	0.0	6.4
55					
56			W	W	
57					
58		0.0	0.0	0.0	(6.0)

Nota: _____

Observador: FELIPE (nome legível)

Verificado por: _____ / _____ / _____

IMPRESA OFICIAL

HM 2/90

Figura 5.18 Fita do heliógrafo (CTH)

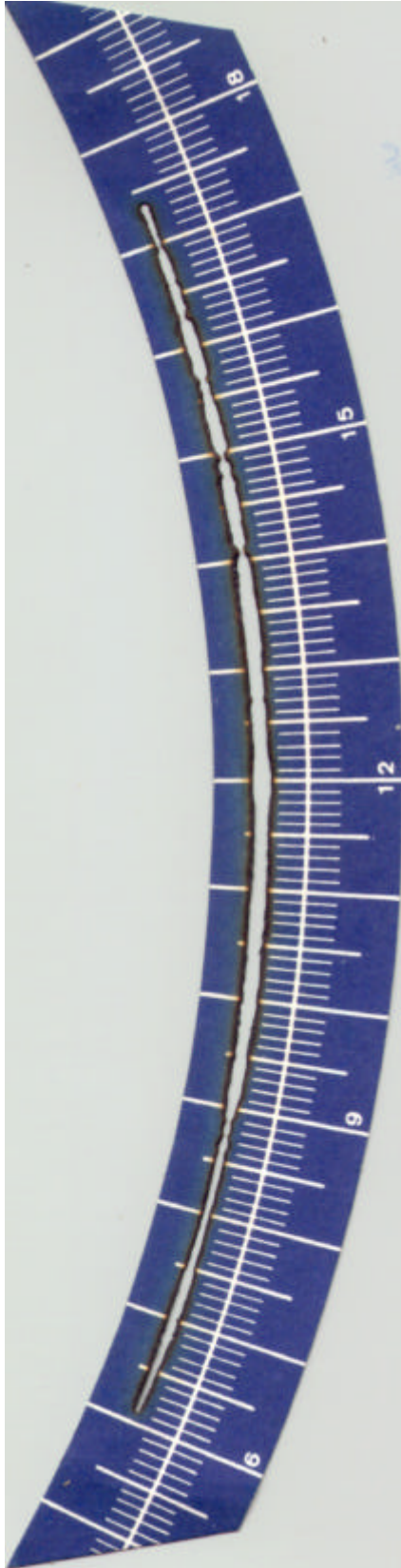
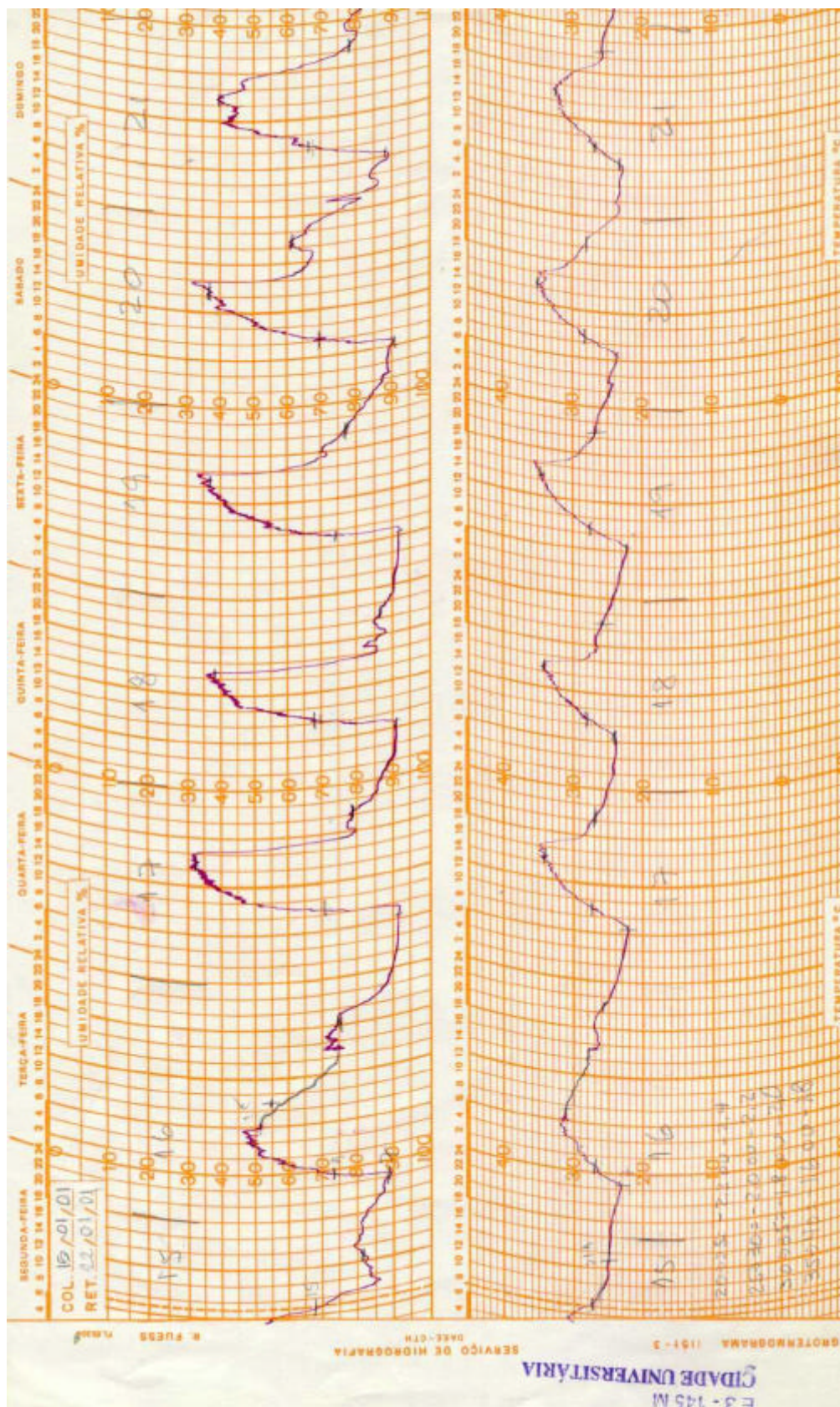


Figura 5.19 Histograma de temperatura e umidade relativa do ar (CTH)



6

Construção de uma Pista Experimental em São Paulo

Os dados de campo utilizados para esta pesquisa foram coletados na pista experimental construída na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LMP), que faz parte de um projeto individual financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), concedido ao Prof. José Tadeu Balbo, no qual a doutoranda participou no que diz respeito à revisão bibliográfica sobre efeitos térmicos em pavimentos de concreto, ao dimensionamento do pavimento e detalhamento da instrumentação, bem como da execução da mesma (Balbo, 2001).

A pista experimental EPUSP é composta por 5 seções de teste, conforme descrito abaixo e ilustrado na Figura 6.1:

- **Seção A:** composta por três placas de concreto de cimento Portland de 3,45 m de largura por 4,00 m, 5,50 m e 7,50 m de comprimento, respectivamente, com espessura de 150 mm, dotadas de barras de transferência de carga nas juntas transversais, assentes sobre uma base de brita graduada simples (BGS) com espessura de 200 mm.

- **Seção B:** composta por três placas de concreto de cimento Portland de 3,45 m de largura e 4,00 m, 5,50 m e 7,50 m de comprimento, respectivamente e 150 mm de espessura, dotadas de barras transferência de carga nas juntas transversais, assentes sobre uma base de concreto compactado com rolo (CCR) com espessura de 200 mm.
- **Seção C:** composta por três placas de concreto de cimento Portland de 3,45 m de largura e 4,00 m, 5,50 m e 7,50 m de comprimento, respectivamente e 250 mm de espessura, dotadas de barras de transferência de carga nas juntas transversais, assentes sobre uma base de CCR ($f_{ctm_k} = 2,0$ MPa) com espessura de 100 mm.
- **Seção D:** composta por três placas de concreto de cimento Portland de 3,45 m de largura e 4,00 m, 5,50 m e 7,50 m de comprimento, respectivamente e 250 mm de espessura, dotadas de barras de transferência de carga nas juntas transversais, assentes sobre uma base de BGS com espessura de 100 mm.
- **Seção E:** composta por três placas de concreto de cimento Portland de 3,50 m de largura por 5,50 m de comprimento e com espessura de 250 mm, dotadas de barras de transferência de carga em uma apenas das juntas transversais, assentes sobre uma base de BGS com espessura de 150 mm.

Foram projetadas canaletas entre as seções A/B, B/C e D/E, conforme pode ser verificado na Figura 6.1, para a colocação de tubos de PVC que conduziram os cabos dos instrumentos até a estação de coleta de dados. A locação das canaletas e das seções foi realizada com uso de teodolito.

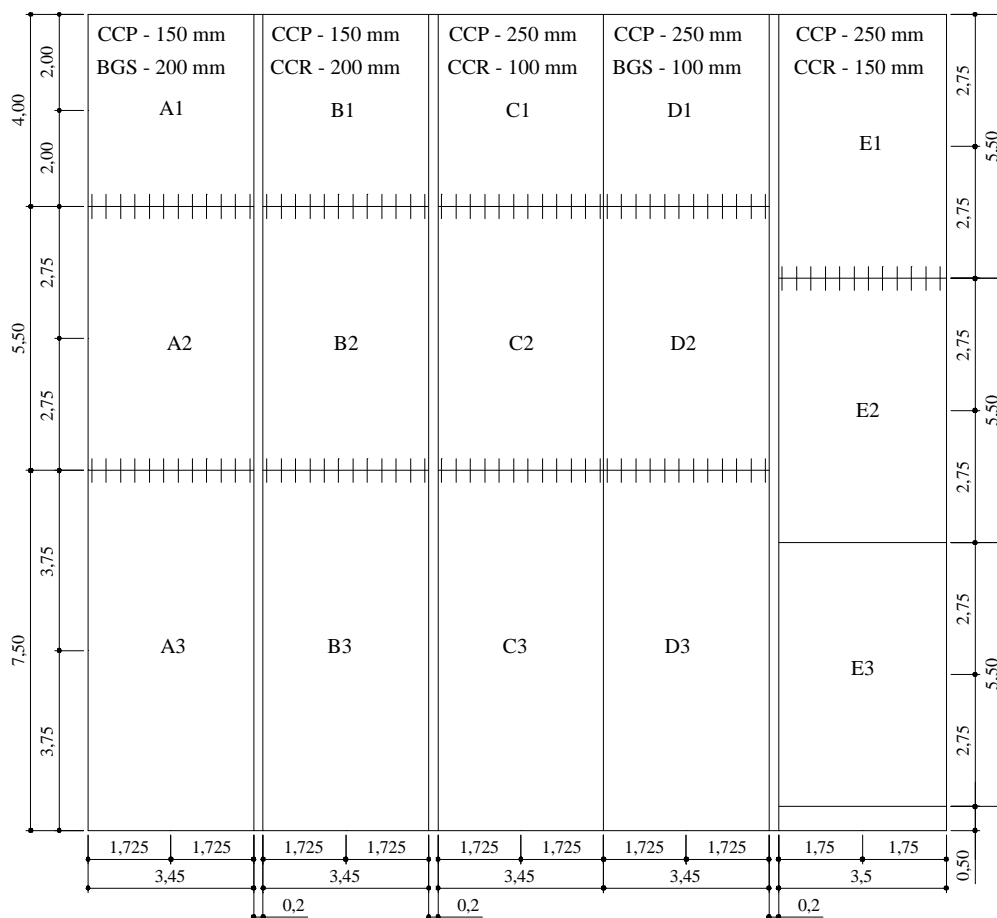


Figura 6.1 Projeto da pista experimental EPUSP

6.1 Execução da Pista Experimental EPUSP

A execução da pista experimental EPUSP iniciou-se em abril de 1.999, com a retirada da grama e relocação de árvores; na seqüência foi realizada locação topográfica da pista para que os serviços de terraplenagem, locação e construção da estação de coleta pudessem ser iniciados (Foto 6.1).



Foto 6.1 Terraplenagem e estação de coleta

Ao término dos serviços de terraplenagem, procedeu-se com a compactação do subleito, utilizando-se um rolo compactador liso vibratório tipo CA-15; após compactação, realizou-se um levantamento com nível e mira para um ajuste fino das cotas do subleito para controlar posteriormente as espessuras de base.

A execução e compactação de cada uma das bases (CCR e BGS) foram realizadas em dias diferentes, sendo que a base em BGS recebeu uma imprimação impermeabilizante ao final da compactação (Fotos 6.2 a 6.6); após o término da execução das bases, um novo levantamento nível e mira foi realizado com o intuito de verificar as cotas da base acabada, corrigir os locais com excesso ou falta de material, garantindo assim a espessura de base prescrita no projeto.

As concretagem ocorreram com intervalos aproximados de dez dias e eram precedidas de:

- colocação de lençol de polietileno (lona plástica preta) sobre a base acabada para garantir a não aderência entre a base e as placas (Foto 6.7);
- colocação das formas nas respectivas seções;
- colocação das barras de transferência de carga;
- colocação dos medidores de deformação – *strain gages* (Foto 6.8);
- colocação dos medidores de temperatura - PT-100 (Foto 6.8);
- passagem dos cabos, já nomeados, pelo tubo de PVC;
- soldagem dos cabos no painel da estação de coleta.



Foto 6.2 Lançamento do CCR



Foto 6.3 Compactação do CCR



Foto 6.4 Espalhamento da BGS



Foto 6.5 Compactação da BGS



Foto 6.6 Aplicação da imprimação impermeabilizante na BGS



Foto 6.7 Lençol plástico

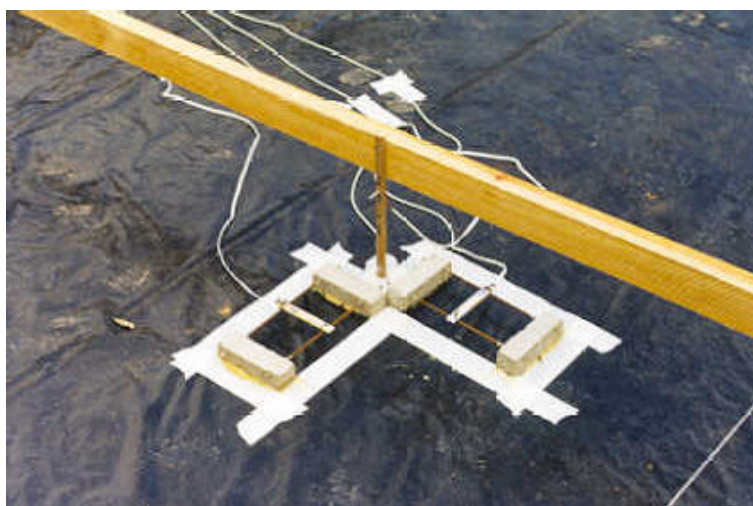


Foto 6.8 Detalhe da instalação dos *strain gages* e PT-100

Após o término da concretagem de cada seção, o pavimento era ranhurado e subseqüentemente procedia-se com a cura química, com a aspersão de produto de cura “anti-sol” e posteriormente, era iniciada a colocação de mantas para cura úmida que eram mantidas por sete dias, conforme ilustram as Fotos 6.9 a 6.12.



Foto 6.9 Detalhe do sepultamento dos termoresistores (PT-100) e *strain gages*



Foto 6.10 Desempenho do concreto da seção A



Foto 6.11 Aplicação de produto de cura anti-sol



Foto 6.12 Detalhe da textura do pavimento acabado



Foto 6.13 Cura do concreto da seção A

Durante a concretagem de cada uma das cinco seções, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar foram monitoradas e são apresentadas no Quadro 6.1.

Concluída a execução da pista experimental, foram realizados os serviços de acabamento, dentre os quais estavam: fechamento das canaletas, colocação de guias e sarjeta, implantação de duas bocas de lobo, recolocação de grama e execução do acesso ao estacionamento dos professores (Fotos 6.14 a 6.18).

Quadro 6.1 Informações sobre condições ambientais durante a concretagem

Seção	Data	Hora	Temperatura do ar (°C)	Umidade do ar (%)
Seção E	21/07	10:25	29,1	52
		13:57	28,4	42
		15:28	28,6	43
Seção A	30/07	9:15	20,5	63
		9:45	26,4	54
		11:45	29,9	44
		13:26	30,8	42
Seção D	12/08	10:25	36,4	28
		11:20	35,6	30
		12:45	33,6	22
		13:32	31,6	21
		14:11	32,0	21
Seção B	17/09	12:04	31,5	46
		14:00	31,6	48
		15:41	22,6	55
		16:50	19,6	72
		17:12	19,0	75
		18:03	17,6	83
		19:18	17,4	81
Seção C	29/09	8:21	22,9	40
		9:22	28,9	29
		10:35	37,3	25
		11:30	42,6	24
		12:00	38,0	22
		13:00	37,9	25

**Foto 6.14** Detalhe das cunhas para fechamento das canaletas



Foto 6.15 Guias e sarjeta



Foto 6.16 Execução de boca de lobo



Foto 6.17 Execução do acesso a pista experimental



Foto 6.18 Vista da pista experimental acabada

6.2 O Concreto Empregado na Construção da Pista Experimental EPUSP

O concreto especificado para no projeto da pista experimental EPUSP foi um concreto típico para pavimentação com módulo de ruptura à flexão aos 28 dias de 4,5 MPa e as dosagens empregadas são apresentadas no Quadro 6.2. O Quadro 6.3 apresenta as dosagens para o concreto compactado com rolo empregado como base das seções B e C.

Para a concretagem da seção E solicitou-se que o concreto tivesse abatimento de 5 ± 1 cm; tal consistência resultou em um concreto de difícil trabalhabilidade tendo em vista o processo de concretagem manual adotado, sendo assim, para a concretagem das demais seções, solicitou-se a alteração do traço para um valor de abatimento de 6 ± 1 cm; feito isto, resultaram mais fáceis os trabalhos de manipulação do concreto, tendo sido tal abatimento mantido para as demais concretagens.

Foi solicitada também uma alteração na dosagem do plastificante posto que após a concretagem das seções E e A, constatou-se dificuldades de

serragem das juntas nos horários estabelecidos, quando ocorreram pequenos esborcinamentos. Foi decidido então que seria diminuída a quantidade de plastificante adicionado em mais de 50% pois tal plastificante estaria sendo responsável pelo retardamento na pega.

Quadro 6.2 Dosagem do concreto de cimento Portland da pista experimental

Seção	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Brita 2 (kg/m ³)	Água (l/m ³)	Plastificante (l/m ³)
E	383	638	486	729	174	1,341
A	383	638	486	729	174	1,341
B	396	620	483	724	180	1,388
C	396	620	483	724	180	1,388
D	396	620	483	724	180	1,388

Quadro 6.3 Dosagem do concreto compactado com rolo da pista experimental

Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Pedrisco Misto (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Brita 2 (kg/m ³)	Água (l/m ³)
150	484	486	390	586	138

O controle tecnológico, realizado por meio de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, módulo de deformação secante em tração e em compressão, foram executados pela própria equipe do LMP no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Construção Civil (CPqDCC) do Departamento de Engenharia de Construção Civil. Os corpos de prova foram moldados e curados no local da obra, tanto para o CCR quanto para o concreto empregado na execução das placas e os resultados estão apresentados no Anexo I.

6.3 Instrumentação da Pista Experimental

Para a monitoração das temperaturas a pista experimental foi instrumentada com um total de 127 instrumentos, conforme apresentado na Figura 6.2,

sendo que 45 são medidores de deformação do tipo *strain gages* e 82 são medidores de temperatura do tipo PT-100 (filamento de platina envolvido por um material cerâmico, capaz de captar variações de temperatura através de variações da resistência elétrica deste filamento).

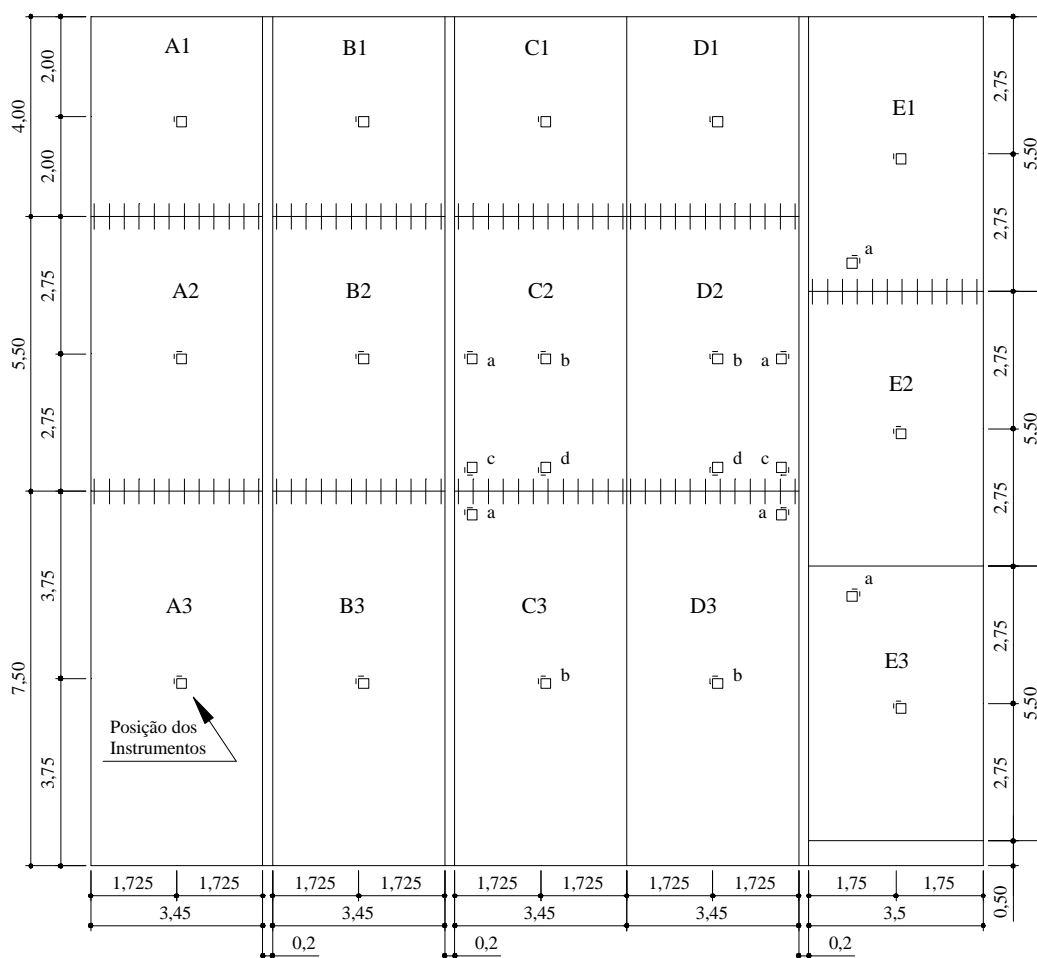


Figura 6.2 Posicionamento dos instrumentos

Apesar do foco central desta tese ser a análise dos efeitos térmicos, apresenta-se a descrição de toda a instrumentação realizada em pista para situar melhor o leitor na linha de pesquisa desenvolvida.

Os PT-100 (Foto 6.19) foram instalados no centro de todas as placas das seções A, B, C, D e E, posicionados em duas profundidades a 20 mm do topo e a 20 mm do fundo das placas A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, D1, E1, E2

e E3 e posicionados em cinco profundidades (20 mm; 72,5 mm; 105 mm; 157 mm; 210 mm e 230 mm da superfície para o fundo da placa), conforme Figura 6.3, nas placas C2, C3, D2 e D3; nas seções C e D os PT-100 também foram instalados no canto, centro da borda longitudinal e centro da borda transversal em cinco profundidades.



Foto 6.19 PT- 100

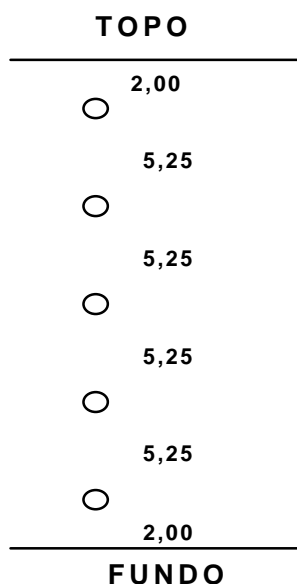


Figura 6.3 Localização dos PT-100 em perfil, na placa C2

Os *strain gages* (Foto 6.20) foram instalados no centro de todas as placas das seções A, B, C, D e E, conforme Figura 6.5, nas direções x e y; nas

seções C e D, além da posição central, foram instalados também no canto, centro da borda longitudinal e centro da borda transversal (para as placas C2, C3, D2 e D3); na seção E, além da posição central, foram instalados nas direções x e y na placa E1 e na placa E3, posicionados a 300 mm da borda transversal e a 1,00 m da borda longitudinal, em duas alturas: a 25 mm e a 207 mm da base; nas demais posições (para todas as seções) eles foram instalados apenas a 30 mm da base do pavimento, conforme Figura 6.4).



Foto 6.20 Strain Gage

C 2 A

Centro borda longitudinal

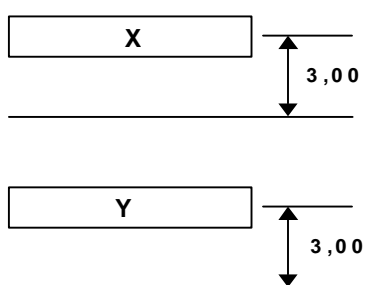


Figura 6.4 Localização dos *strain gages* em perfil, placa C2

A preparação prévia dos instrumentos teve a seguinte seqüência de montagem:

- verificação do funcionamento de cada instrumento isoladamente com auxílio de multímetro;
- corte de cabos segundo especificação do projeto de instrumentação;
- soldagem dos cabos aos instrumentos, nas quantidades necessárias para cada seção a ser concretada;
- identificação e codificação dos cabos e instrumentos a serem levados em pista antes de cada concretagem;
- calibração em laboratório dos instrumentos montados e conectados agora aos equipamentos de medida;
- preparação do painel respectivo para recepção de cabos na estação de controle.

Tal preparação prévia tomava cerca de cinco a dez dias de trabalho, por seção experimental, em função do número de instrumentos a serem instalados e das disponibilidades da equipe de trabalho.

6.4 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi realizada por meio de condicionador de sinais, ligado a microcomputador e a placas de terminais (Fotos 6.21 e 6.22). Para a aquisição de dados, a pista experimental EPUSP foi dividida em 5 seções, que receberam as designações de A a E. Cada uma das três placas de cada seção recebeu um número, assim as placas foram chamadas de A1, A2, A3 e assim por diante.



Foto 6.21 Condicionador de sinais e conversor analógico-digital



Foto 6.22 Microcomputador e placas de terminais

A divisão dos 32 canais do condicionador de sinais utilizado nessa pista, foi feita do seguinte modo: 10 canais para medição de dados provenientes de *strain gages* e 22 canais para medição de dados provenientes de PT100. Tal divisão fez com que o sistema de aquisição de dados dessa pista fosse dividido da seguinte forma:

- Leitura 0: Todos os instrumentos da seção E;
- Leitura 1: Todos os instrumentos das seções A e B;
- Leitura 2: Todos os instrumentos das placas C1 e C2;
- Leitura 3: Todos os instrumentos das placas D1 e D2;
- Leitura 4: Todos os instrumentos das placas C3 e D3.

As leituras foram tomadas de forma contínua, com os dados registrados em intervalos de tempo de 15 min., durante uma semana completa e na semana seguinte seriam registrados os dados do próximo grupo de leitura.

Alguns fatores interferiram no esquema de leituras, tais como: quedas repentinas de energia, problema este que foi sanado com a colocação de um *no-break*; quedas prolongadas de energia, que duravam mais que o tempo de bateria do *no-break* e impossível de ser sanado; queima de um monitor de microcomputador e duas CPUs, o que fez com que as leituras fossem suspensas por um período até ser providenciado outro microcomputador.

Um outro problema detectado na leitura dos instrumentos da pista experimental, que interferiu no esquema de leituras, foi o elevado nível de ruído encontrado nos sinais ali captados.

As medidas dos instrumentos são obtidas pela variação da resistência elétrica dos filamentos metálicos que os formam. Tais instrumentos, ligados a um sistema de $\frac{1}{4}$ de ponte de *Weatstone*, ao receberem uma excitação, seja por uma variação no estado de deformação da placa ou pela temperatura da mesma, desequilibra a referida ponte. Este desequilíbrio obriga o condicionador de sinais a reequilibrar a ponte. A forma com que o condicionador equilibra a ponte é por meio de um aumento ou decréscimo na tensão excitante.

Vários fenômenos físicos interferem na constância da tensão na rede elétrica, inserindo ruídos nos sinais captados. Um campo magnético, por exemplo, já seria capaz de alterar significativamente a tensão excitante e, por conseqüência, conferir uma leitura distorcida do instrumento em análise. Até dar partida em um automóvel poderia estar causando interferências.

Para minimizar o efeito de ruído, foram instalados filtros para estabilizar o sinal elétrico numa maior frequência, colaborando em muito para o ganho de estabilidade e consistência nas leituras provenientes dos instrumentos.

Todos estes fatores ocasionaram interrupções nas leituras, que eram reiniciadas a cada ocorrência seguindo o esquema de leituras proposto, sendo assim, se a leitura foi interrompida na Leitura 0 e mesma continha uma série temporal suficiente para a análise, passava-se para o grupo de leitura subsequente; caso a série temporal não fosse capaz de proporcionar uma análise consistente, este mesmo grupo de leitura era retomado. Vale lembrar que a intervalo de tempo para o registro das séries temporais permaneceu o mesmo (a cada 15 minutos).

7

Monitoração de Temperaturas: 1.999 - 2.001

A coleta de dados na pista experimental ocorreu durante 17 meses, de outubro de 1.999 a fevereiro de 2.001.

Após o primeiro ciclo de leituras, verificou-se o mau funcionamento de alguns PT-100 e, em alguns casos, PT-100 inoperantes, em sua maioria nas posições de topo (Quadro 7.1).

Quadro 7.1 Condições dos instrumentos de medida de temperatura (PT-100)

Seção	Placa	Condição dos Instrumentos
A	A1	operacionais
	A2	operacionais
	A3	operacionais
B	B1	operacional apenas fundo
	B2	operacional apenas fundo
	B3	operacional apenas fundo
C	C1	topo não operacional
	C2	posições c e d não operacionais
	C3	apenas fundos operacionais
D	D1	apenas fundo operacional
	D2	topos das posições a e b não operacionais
	D3	apenas fundos operacionais
E	E1	operacionais
	E2	operacionais
	E3	não operacionais

Data: 18/11/1.999

A perda destes instrumentos foi atribuída, inicialmente, aos processos de vibração e desempenamento do concreto. Concluiu-se que a perda destes PT-100 de topo não afetaria as medidas pois próximo à superfície das placas, independente de suas características geométricas, a temperatura deveria ser idêntica em qualquer ponto, pois a área não é afetada por sombras, recebendo radiação solar de maneira uniforme.

Portanto, para o presente trabalho, as análises de dados foram realizadas nas seções A, C e D, totalizando 190 dias de leituras (apresentadas no Anexo II), distribuídas conforme o Quadro 7.2, sendo 59 dias para a seção A, 66 dias para a seção C e 65 dias para a seção D.

Quadro 7.2 Dias de Leituras

Mês	Dia																																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31					
Out/99																																				
Nov/99																																				
Dez/99																																				
Jan/00																																				
Fev/00																																				
Mar/00																																				
Abr/00																																				
Mai/00																																				
Jun/00																																				
Jul/00																																				
Ago/00																																				
Set/00																																				
Out/00																																				
Nov/00																																				
Dez/00																																				
Jan/01																																				
Fev/01																																				

Seção A
 Seção C
 Seção D
 Troca de leitura

Destes 190 dias de leituras, 74 dias ocorreram na primavera, 39 no verão, 43 no outono e 34 no inverno.

7.1 Comutações no Sistema de Aquisição de Dados

Com o intuito de verificar se realmente a perda dos PT-100 de topo não prejudicaria as leituras, foram realizadas comutações no sistema de

aquisição de dados, para coletar dados de temperatura em mesmo horário, para todas as placas operantes. As comutações foram realizadas nos dias 09/08/2.000, 08/11/2.000, 28/11/2.000 e 05/01/2.001.

Durante as três primeiras comutações, suspeitou-se que as temperaturas de topo poderiam se alterar durante as trocas de canais no painel de terminais, (trocas realizadas manualmente); sendo assim, durante a comutação do dia 05/01/2.001 também foram realizadas medidas de temperatura junto à superfície das placas, com auxílio de um termômetro digital.

As temperaturas junto à superfície, medidas em todas as placas, atingiram valores de 48,5°C a 50,5°C. Verificou-se, durante uma das medidas, que a existência de sombra devido à passagem de uma nuvem fez com que a temperatura de topo caísse para 41°C (quase 10°C de queda). A temperatura atmosférica, medida a 10 mm acima da superfície, estava 39°C, portanto, 10°C abaixo da temperatura de superfície antes da passagem da nuvem.

As Tabelas 7.1 a 7.4 são apresentadas as quatro comutações realizadas (uma no inverno, duas na primavera e uma no verão).

Tabela 7.1 Comutação realizada em 09/08/2.000

Seção	Placa	Temperatura Fundo	Temperatura Topo
A	A1	23,3	sem leitura
	A2	22,9	31,1
	A3	21,3	33,2
B	B1	22,0	-
	B2	22,8	-
	B3	24,6	-
C	C1	21,0	-
	C2	16,9 a 20,6	32,0
	C3	20,0 a 21,5	-
D	D1	21,5	-
	D2	19,0 a 22,0	30,6
	D3	20,0 a 21,5	-
E	E1	23,3	32,9
	E2	21,7	31,8
	E3	-	-

Tabela 7.2 Comutação realizada em 08/11/2.000

Seção	Placa	Temperatura Fundo	Temperatura Topo
A	A1	31,1	46,5
	A2	36,5	46,9
	A3	29,7	46,1
B	B1	29,1	-
	B2	31,4	-
	B3	32,8	-
C	C1	28,9	-
	C2a	24,3	43,5
	C2b	25,2	43,8
	C2c	27,1	-
	C2d	25,8	-
	C3a	29,3	-
	C3b	26,7	-
D	D1	28,3	-
	D2a	26,7	-
	D2b	25,7	-
	D2c	25,2	Sem leitura
	D2d	27,3	Sem leitura
	D3a	26,6	-
	D3b	28,2	-
E	E1	29,7	40,4
	E2	28,8	45,5
	E3	-	-

Tabela 7.3 Comutação realizada em 28/11/2.000

Seção	Placa	Temperatura Fundo	Temperatura Topo
A	A1	33,2	43,8
	A2	37,4	48,5
	A3	31,1	44,2
B	B1	30,1	-
	B2	32,8	-
	B3	34,4	-
C	C1	26,5	-
	C2a	26,7	42,8
	C2b	27,4	42,4
	C2c	28,8	-
	C2d	28,9	-
	C3a	29,3	-
	C3b	28,2	-
D	D1	30,4	-
	D2a	28,3	-
	D2b	29,3	-
	D2c	29,6	39,7
	D2d	29,6	39,9
	D3a	27,6	-
	D3b	29,6	-
E	E1	30,2	40,3
	E2	30,1	43
	E3	-	-

Tabela 7.4 Comutação realizada em 05/01/2.001

Seção	Placa	Temperatura Fundo	Temperatura Topo
A	A1	34,3	43,8
	A2	38,2	Sem leitura
	A3	33,6	44,9
B	B1	33,2	-
	B2	35,0	-
	B3	35,0	-
C	C1	32,0	-
	C2a	27,9	Sem leitura
	C2b	28,1	43,5
	C2c	29,6	-
	C2d	30,7	-
	C3a	32,0	-
	C3b	29,3	-
D	D1	30,9	-
	D2a	29,8	-
	D2b	29,8	-
	D2c	31,3	40,9
	D2d	32,2	41,4
	D3a	30,1	-
	D3b	31,7	-
E	E1	31,7	40,4
	E2	31,6	45,5
	E3	-	-

Verificou-se também que em placas de menor espessura, com exceção de uma anomalia verificada na placa A3 e que será discutida mais adiante, ocorrem maiores temperaturas de fundo que em placas mais espessas, condição claramente evidenciada durante a comutação realizada em 09/08/2.000, pois o dia estava claro, sem nuvens nem ventos, o que permitiu serem aferidas temperaturas de topo muito próximas apesar do tempo decorrido durante as trocas manuais de canais; além disso, nesta época seca, a anomalia apresentada pela temperatura de fundo na placa A3 não se manifestara.

Portanto, quanto maior a espessura da placa maior será o diferencial de temperatura entre o topo e o fundo, e conseqüentemente, maior será o gradiente térmico. Esta constatação é real pois, supostos idênticos concretos, uma maior espessura resulta em maior lentidão na transmissão de calor do topo para o fundo da placa.

A discrepância entre as temperaturas foi de aproximadamente 3°C, sendo que esta diferença está associada à posição do instrumento na placa (diferenças mínimas de posicionamento durante a concretagem), ruídos e a precisão do próprio instrumento, ressaltando que nenhuma destas ocorrências foi considerada relevante para as análises dos resultados.

7.2 Tratamento dos Dados do CTH

Os dados coletados junto ao Centro Tecnológico de Hidráulica, apresentados em tabelas de dados meteorológicos (Quadro 5.1), fitas do heliógrafo (Quadro 5.2) e histogramas de temperatura do ar e umidade relativa do ar (Quadro 5.3) foram tratados com o intuito de selecionar apenas os dados de interesse para a pesquisa.

Para a elaboração do Quadro 7.3 foram utilizados os dados apresentados nas tabelas de dados meteorológicos, buscando nas mesmas os dados de temperatura do ar máxima e mínima e umidade relativa do ar, dados do heliógrafo, anemômetro e pluviômetro, bem como informações sobre as condições do tempo.

Os dados do heliógrafo (Quadro 5.2) foram convertidos em planilhas eletrônicas que fornecem o número de horas de insolação (NHI) até as 16 horas, conforme apresentado no Quadro 7.4.

Quadro 7.4 Número de Horas de Insolação (NHI)

QUADRO RESUMO DO Nº DE HORAS DE INSOLAÇÃO (nhi)
ANO: 2001 MÊS: JANEIRO

Data	nhi > 12:30	nhi > 13:00	nhi > 13:30	nhi > 14:00	nhi > 14:30	nhi > 15:00	nhi > 15:30	nhi > 16:00
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	6,2	6,7	7,2	7,7	8,2	8,7	9,2	9,7
5	6,3	6,8	7,3	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9,0	9,0
17	6,1	6,5	7,0	7,4	7,6	7,6	7,6	7,6
18	5,8	6,3	6,8	7,3	7,8	8,3	8,8	9,3
19	6,4	6,9	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	9,9
20	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
21	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
22	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
23	5,6	6,0	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
24	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
25	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
26	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
27	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
28	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L	S.L
29	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
30	3,5	5,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
31	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Os dados obtidos junto ao CTH correspondem a todos os dias que foram realizadas leituras na pista experimental (Quadro 7.2), com exceção dos finais de semana e feriados (o CTH não realiza coletas de dados fora dos dias úteis) e dos dias compreendidos entre 30/03/2.000 a 14/06/2.000 (quando houve paralisação das atividades por parte do CTH).

7.3 Temperaturas e Diferenciais Térmicos Observados

Conforme descrito no Capítulo 6, os dados analógicos foram coletados por meio de um condicionador de sinais ligado ao painel que contém as placas

de terminais e convertidos em dados digitais que foram gravados diretamente em um microcomputador, utilizando um programa especificamente desenvolvido para estas coletas de dados.

Posteriormente, os dados digitais gravados em arquivos com extensão do tipo .txt, foram tratados numérica e graficamente por meio de um programa específico, desenvolvido em *Visual Basic*. O tratamento dos dados permitiu montagem de planilhas eletrônicas (Quadro 7.5) contendo as seguintes informações:

- data da leitura;
- placa e posição do instrumento;
- temperatura máxima de topo, sua respectiva temperatura de fundo correspondente e horário;
- temperatura máxima de fundo, sua respectiva temperatura de topo correspondente e horário;
- temperatura mínima de topo, sua respectiva temperatura de fundo correspondente e horário;
- temperatura mínima de fundo, sua respectiva temperatura de topo correspondente e horário;
- diferencial térmico máximo, suas respectivas temperaturas de topo e fundo e horário;
- diferencial térmico mínimo, suas respectivas temperaturas de topo e fundo e horário;
- frequência do diferencial térmico;
- gradiente térmico;
- temperatura do ar.

O diferencial térmico foi obtido a partir da subtração da temperatura medida nos termoresistores (PT-100) posicionados a 2 mm do topo e a 2 mm do fundo das placas, sendo que o diferencial térmico positivo representa uma temperatura no PT-100 posicionado a 2 mm do topo (temperatura de topo)

maior que a temperatura no PT-100 posicionado a 2 mm do fundo (temperatura de fundo), sendo para o diferencial térmico negativo o inverso.

Foram elaborados, a partir das planilhas eletrônicas, gráficos de temperatura de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar, conforme apresentado na Figura 7.1.

Quadro 7.5 Planilha eletrônica com os dados tabulados e tratados

23/01/01																																																																																																																																																																	
Placa C2a - Borda Longitudinal																																																																																																																																																																	
TEMPERATURAS MÁXIMAS			TEMPERATURAS MÍNIMAS																																																																																																																																																														
Temperatura de Topo Máxima	45,9 °C		Temperatura de Topo Mínima	26,3 °C																																																																																																																																																													
Temperatura de Fundo Correspondente	29,5 °C		Temperatura de Fundo Correspondente	26,1 °C																																																																																																																																																													
Diferencial Térmico	17,4 °C		Diferencial Térmico	0,1 °C																																																																																																																																																													
Horário	13:51		Horário	4:24																																																																																																																																																													
Temperatura de Fundo Máxima	30,2 °C		Temperatura de Fundo Mínima	25,5 °C																																																																																																																																																													
Temperatura de Topo Correspondente	32,5 °C		Temperatura de Topo Correspondente	30,1 °C																																																																																																																																																													
Diferencial Térmico	2,3 °C		Diferencial Térmico	4,6 °C																																																																																																																																																													
Horário	16:39		Horário	8:24																																																																																																																																																													
Freqüência do Diferencial Térmico			Diferencial Térmico Máximo																																																																																																																																																														
menor que -10	0,0 %		Diferencial Térmico Máximo	17,4 °C																																																																																																																																																													
entre -10 e -8	0,0 %		Temperatura de Topo Correspondente	45,9 °C																																																																																																																																																													
entre -8 e -6	0,0 %		Temperatura de Fundo Correspondente	28,5 °C																																																																																																																																																													
entre -6 e -4	0,0 %		Horário	13:54																																																																																																																																																													
entre -4 e -2	0,0 %		Diferencial Térmico Mínimo																																																																																																																																																														
entre -2 e 0	14,6 %		Diferencial Térmico Mínimo	4,3 °C																																																																																																																																																													
entre 0 e 2	44,8 %		Temperatura de Topo Correspondente	26,8 °C																																																																																																																																																													
entre 2 e 4	9,4 %		Temperatura de Fundo Correspondente	27,1 °C																																																																																																																																																													
entre 4 e 6	4,2 %		Horário	23:54																																																																																																																																																													
entre 6 e 8	3,1 %																																																																																																																																																																
entre 8 e 10	3,1 %																																																																																																																																																																
entre 10 e 12	4,2 %																																																																																																																																																																
entre 12 e 14	5,2 %																																																																																																																																																																
entre 14 e 16	5,2 %																																																																																																																																																																
entre 16 e 18	6,3 %																																																																																																																																																																
entre 18 e 20	0,0 %																																																																																																																																																																
entre 20 e 22	0,0 %																																																																																																																																																																
entre 22 e 24	0,0 %																																																																																																																																																																
maior que 24	0,0 %																																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dif. Térm.</th> <th>$\Delta T/mm$</th> <th>Tt</th> <th>Tf</th> <th>Tar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>00:00</td><td>0,4</td><td>0,0018</td><td>27,9</td><td>27,5</td><td>24,5</td></tr> <tr><td>01:00</td><td>0,1</td><td>0,0007</td><td>27,3</td><td>27,1</td><td></td></tr> <tr><td>02:00</td><td>0,0</td><td>0,0000</td><td>26,8</td><td>26,8</td><td>23,0</td></tr> <tr><td>03:00</td><td>-0,1</td><td>-0,0005</td><td>26,4</td><td>26,6</td><td></td></tr> <tr><td>04:00</td><td>0,2</td><td>0,0007</td><td>26,3</td><td>26,2</td><td>23,0</td></tr> <tr><td>05:00</td><td>0,6</td><td>0,0030</td><td>26,6</td><td>26,6</td><td></td></tr> <tr><td>06:00</td><td>1,1</td><td>0,0053</td><td>26,8</td><td>25,7</td><td>24,0</td></tr> <tr><td>07:00</td><td>2,0</td><td>0,0094</td><td>27,6</td><td>25,6</td><td></td></tr> <tr><td>08:00</td><td>3,6</td><td>0,0174</td><td>29,2</td><td>25,6</td><td>25,0</td></tr> <tr><td>09:00</td><td>7,3</td><td>0,0345</td><td>33,0</td><td>25,7</td><td></td></tr> <tr><td>10:00</td><td>10,1</td><td>0,0480</td><td>36,0</td><td>25,5</td><td>28,5</td></tr> <tr><td>11:00</td><td>12,3</td><td>0,0584</td><td>38,7</td><td>26,5</td><td></td></tr> <tr><td>12:00</td><td>16,5</td><td>0,0786</td><td>43,7</td><td>27,2</td><td>31,0</td></tr> <tr><td>13:00</td><td>16,3</td><td>0,0777</td><td>44,1</td><td>27,8</td><td></td></tr> <tr><td>14:00</td><td>17,2</td><td>0,0818</td><td>45,8</td><td>28,6</td><td>33,0</td></tr> <tr><td>15:00</td><td>6,2</td><td>0,0294</td><td>35,7</td><td>29,5</td><td></td></tr> <tr><td>16:00</td><td>3,3</td><td>0,0156</td><td>33,3</td><td>30,1</td><td>26,5</td></tr> <tr><td>17:00</td><td>1,8</td><td>0,0087</td><td>31,7</td><td>29,8</td><td></td></tr> <tr><td>18:00</td><td>1,7</td><td>0,0082</td><td>31,2</td><td>29,5</td><td>26,5</td></tr> <tr><td>19:00</td><td>0,9</td><td>0,0042</td><td>30,1</td><td>29,2</td><td></td></tr> <tr><td>20:00</td><td>0,3</td><td>0,0016</td><td>29,0</td><td>28,7</td><td>26,0</td></tr> <tr><td>21:00</td><td>0,2</td><td>0,0009</td><td>28,4</td><td>28,2</td><td></td></tr> <tr><td>22:00</td><td>0,0</td><td>0,0001</td><td>28,0</td><td>28,0</td><td>25,5</td></tr> <tr><td>23:00</td><td>-0,1</td><td>-0,0006</td><td>27,3</td><td>27,4</td><td></td></tr> <tr><td>00:00</td><td>-0,3</td><td>-0,0016</td><td>26,8</td><td>27,1</td><td>25,0</td></tr> </tbody> </table>							Dif. Térm.	$\Delta T/mm$	Tt	Tf	Tar	00:00	0,4	0,0018	27,9	27,5	24,5	01:00	0,1	0,0007	27,3	27,1		02:00	0,0	0,0000	26,8	26,8	23,0	03:00	-0,1	-0,0005	26,4	26,6		04:00	0,2	0,0007	26,3	26,2	23,0	05:00	0,6	0,0030	26,6	26,6		06:00	1,1	0,0053	26,8	25,7	24,0	07:00	2,0	0,0094	27,6	25,6		08:00	3,6	0,0174	29,2	25,6	25,0	09:00	7,3	0,0345	33,0	25,7		10:00	10,1	0,0480	36,0	25,5	28,5	11:00	12,3	0,0584	38,7	26,5		12:00	16,5	0,0786	43,7	27,2	31,0	13:00	16,3	0,0777	44,1	27,8		14:00	17,2	0,0818	45,8	28,6	33,0	15:00	6,2	0,0294	35,7	29,5		16:00	3,3	0,0156	33,3	30,1	26,5	17:00	1,8	0,0087	31,7	29,8		18:00	1,7	0,0082	31,2	29,5	26,5	19:00	0,9	0,0042	30,1	29,2		20:00	0,3	0,0016	29,0	28,7	26,0	21:00	0,2	0,0009	28,4	28,2		22:00	0,0	0,0001	28,0	28,0	25,5	23:00	-0,1	-0,0006	27,3	27,4		00:00	-0,3	-0,0016	26,8	27,1	25,0
	Dif. Térm.	$\Delta T/mm$	Tt	Tf	Tar																																																																																																																																																												
00:00	0,4	0,0018	27,9	27,5	24,5																																																																																																																																																												
01:00	0,1	0,0007	27,3	27,1																																																																																																																																																													
02:00	0,0	0,0000	26,8	26,8	23,0																																																																																																																																																												
03:00	-0,1	-0,0005	26,4	26,6																																																																																																																																																													
04:00	0,2	0,0007	26,3	26,2	23,0																																																																																																																																																												
05:00	0,6	0,0030	26,6	26,6																																																																																																																																																													
06:00	1,1	0,0053	26,8	25,7	24,0																																																																																																																																																												
07:00	2,0	0,0094	27,6	25,6																																																																																																																																																													
08:00	3,6	0,0174	29,2	25,6	25,0																																																																																																																																																												
09:00	7,3	0,0345	33,0	25,7																																																																																																																																																													
10:00	10,1	0,0480	36,0	25,5	28,5																																																																																																																																																												
11:00	12,3	0,0584	38,7	26,5																																																																																																																																																													
12:00	16,5	0,0786	43,7	27,2	31,0																																																																																																																																																												
13:00	16,3	0,0777	44,1	27,8																																																																																																																																																													
14:00	17,2	0,0818	45,8	28,6	33,0																																																																																																																																																												
15:00	6,2	0,0294	35,7	29,5																																																																																																																																																													
16:00	3,3	0,0156	33,3	30,1	26,5																																																																																																																																																												
17:00	1,8	0,0087	31,7	29,8																																																																																																																																																													
18:00	1,7	0,0082	31,2	29,5	26,5																																																																																																																																																												
19:00	0,9	0,0042	30,1	29,2																																																																																																																																																													
20:00	0,3	0,0016	29,0	28,7	26,0																																																																																																																																																												
21:00	0,2	0,0009	28,4	28,2																																																																																																																																																													
22:00	0,0	0,0001	28,0	28,0	25,5																																																																																																																																																												
23:00	-0,1	-0,0006	27,3	27,4																																																																																																																																																													
00:00	-0,3	-0,0016	26,8	27,1	25,0																																																																																																																																																												

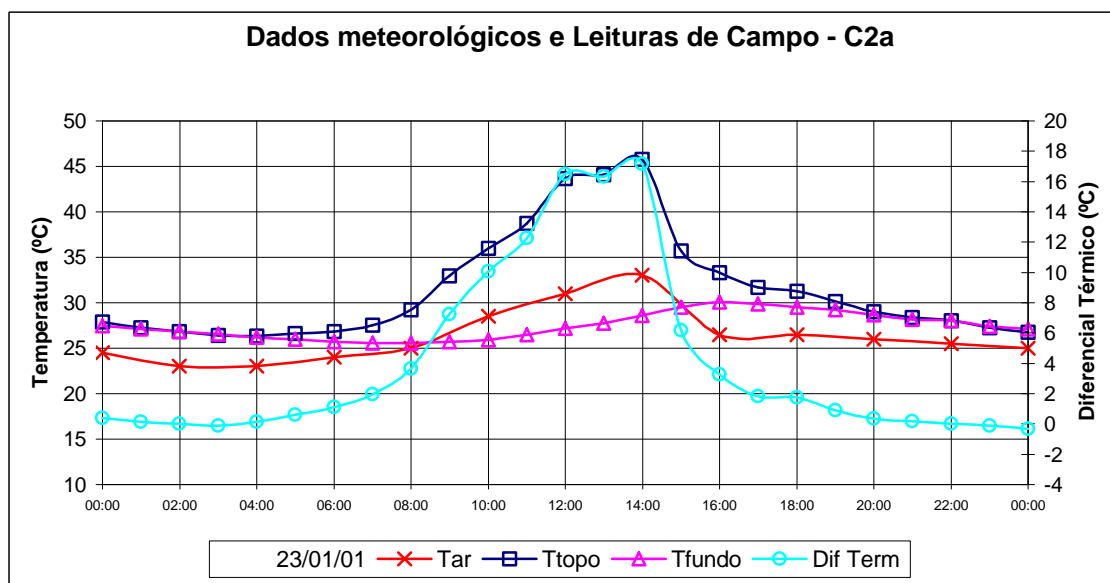


Figura 7.1 Gráfico com dados meteorológicos e leituras de campo

7.3.1 Temperaturas e Diferenciais Térmicos ao Longo das Estações Climáticas

Foram selecionados, para a análise dos dados, dias seqüenciais típicos para cada estação do ano, sendo que esta tipificação de efeitos térmicos sobre as placas de CCP em cada estação do ano pôde ser obtida a partir dos dados coletados entre novembro de 1.999 e fevereiro de 2.001.

Uma análise de todos os 190 dias de leitura permite observar que em datas de primavera muito já próximas do início do verão legal, não há uma relevante distinção do verão propriamente dito; portanto, para a escolha dos dias típicos buscou-se uma seqüência de dias de leitura que representasse os efeitos de épocas típicas de cada estação climática.

Sendo assim, a tipificação por estação climática não foi realizada obrigatoriamente no meio da estação mas por vezes nos “limites” das estações, observadas entretanto as condições ambientais típicas de cada estação correspondente.

Nas Tabelas 7.5 a 7.11 são apresentadas, para cada uma das placas e posições analisadas, as estatísticas de valores típicos encontrados nas estações climáticas para temperatura de topo e de fundo correspondente (máxima e mínima) e para o diferencial térmico máximo e mínimo.

As seções C (C2a e C2b) e D (D2c e D2d) tiveram seus dados coletados em dias diferentes, função do arranjo do sistema de instrumentação que opera apenas com 32 canais em cada conjunto de medidas.

Tabela 7.5 Dias típicos para seção A – A1

SEÇÃO A - Placa A1					
MÍNIMAS					
Estação Ano		Verão	Outono	Inverno	Primavera
Datas		30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00
Hora Típica		6:30 - 7:30	6:00 - 7:30	6:00 - 8:00	6:00 - 7:30
Temperatura Topo (°C)	mínima	22,0	20,5	16,0	20,0
	máxima	25,5	25,0	22,5	24,0
	média	24,4	22,0	17,6	22,0
	s	1,2	2,0	2,1	1,6
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	25,0	22,0	15,0	20,0
	máxima	27,0	24,0	21,0	24,0
	média	25,9	22,9	16,4	22,0
	s	0,9	0,9	2,1	1,6
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-3,0	-1,5	0,5	0,0
	máximo	-1,5	1,0	2,0	0,0
	médio	-1,5	-0,9	1,2	0,0
	s	1,0	1,3	0,5	0,0
MÁXIMAS					
Datas		30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00
Hora Típica		13:00 – 16:00	14:00 - 14:30	12:30 - 14:00	12:30 - 15:00
Temperatura Topo (°C)	mínima	39,0	33,0	26,5	26,0
	máxima	46,0	37,0	28,0	42,0
	média	43,0	35,2	27,3	36,0
	s	3,0	1,6	0,5	6,2
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	33,0	26,0	17,5	25,0
	máxima	37,0	29,0	21,0	31,0
	média	35,4	27,9	19,9	28,6
	s	1,5	1,2	1,0	2,5
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	5,0	6,0	6,0	1,0
	máximo	9,0	8,5	9,0	11,0
	médio	7,4	7,3	7,4	7,4
	s	1,6	1,0	0,9	3,9

s – desvio padrão

Tabela 7.6 Dias típicos para seção A – A2

SEÇÃO A - Placa A2					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00	
Hora Típica	7:00 - 7:30	6:00 - 7:30	6:00 - 7:30	6:30 - 7:30	
Temperatura Topo (°C)	mínima	23,0	19,0	15,0	19,0
	máxima	25,0	25,0	17,5	24,5
	média	24,4	21,1	16,1	22,0
	s	0,8	2,5	1,0	2,0
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	24,5	21,0	16,5	22,0
	máxima	27,5	25,0	18,0	26,5
	média	25,9	22,7	17,4	23,9
	s	1,12	1,6	0,6	1,7
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-2,5	-2,5	-2,0	-3,0
	máximo	-0,5	0,0	-0,5	-1,0
	médio	-1,4	-1,6	-1,4	-1,9
	s	1,1	1,0	0,6	0,7
MÁXIMAS					
Datas	30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00	
Hora Típica	13:30 - 15:00	14:00 - 15:00	14:00 - 15:00	12:30 - 15:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	38	32,5	26,0	32,5
	máxima	47,5	37,0	27,5	43,5
	média	43,2	34,5	26,9	38,9
	s	3,6	1,7	0,6	4,5
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	32,5	26,5	20,0	27,5
	máxima	37,5	29,0	22,0	35,0
	média	34,6	28,0	20,8	31,2
	s	1,8	1,1	0,8	3,3
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	5,5	5,0	5,0	5,0
	máximo	12,5	8,0	7,0	9,0
	médio	8,6	6,5	6,1	7,7
	s	2,4	1,1	0,9	1,6

s – desvio padrão

Tabela 7.7 Dias típicos para seção A – A3

SEÇÃO A - Placa A3					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00	
Hora Típica	7:00	7:00 - 7:30	6:00 - 7:30	6:00 - 6:30	
Temperatura Topo (°C)	mínima	23,0	20,0	17,0	19,0
	máxima	25,0	25,0	19,0	24,5
	média	24,4	21,8	17,6	22,1
	s	0,8	2,0	0,7	2,0
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	18,0	15,0	12,5	19,0
	máxima	22,0	20,0	14,5	24,0
	média	20,4	17,7	13,2	21,8
	s	1,4	1,6	0,8	1,8
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	3,0	3,0	4,0	0,0
	máximo	5,0	5,0	4,5	0,5
	médio	4,1	4,1	4,4	0,3
	s	0,8	0,7	0,2	0,3
MÁXIMAS					
Datas	30/11a 05/12/99	19 a 23/04/00	13 a 21/06/00	03 a 07/10/00	
Hora Típica	14:30 - 15:30	14:00 - 15:00	13:00 - 14:30	12:30-15:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	40,0	33,0	29,0	32,5
	máxima	47,5	39,0	32,0	42,5
	média	43,9	36,4	30,3	38,9
	s	3,1	2,4	0,9	4,1
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	27,0	22,0	17,5	25,0
	máxima	32,5	26,0	20,0	30,0
	média	30,0	24,1	19,1	27,9
	s	2,2	1,4	1,0	2,2
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	13,0	11,0	10,5	7,5
	máximo	15,5	13,5	12,0	12,8
	médio	13,9	12,3	11,2	11,0
	s	1,0	1,2	0,6	2,0

s – desvio padrão

Tabela 7.8 Dias típicos para seção C – C2a

SEÇÃO C - Placa C2 - Posição a					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	29/01a 03/02/01	21 a 26/03/00	22 a 27/06/00	14 a 19/10/00	
Hora Típica	6:00 - 7:00	6:00 - 6:30	6:00 - 8:30	6:00 - 8:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	25,5	23,0	10,0	24,0
	máxima	31,0	24,0	17,5	26,0
	média	28,3	23,5	14,6	24,5
	s	2,4	0,4	2,8	0,8
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	26	23,5	14,0	24,0
	máxima	30,0	25,0	17,5	26,0
	média	28,3	24,2	15,8	24,8
	s	2,4	0,6	1,6	0,9
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-2,5	-1,0	-4,0	-2,0
	máximo	1,5	0,0	0,0	0,0
	médio	0,0	-0,7	-1,2	-0,3
	s	1,4	0,4	1,5	0,8
MÁXIMAS					
Datas	29/01a 03/02/01	21 a 26/03/00	22 a 27/06/00	14 a 19/10/00	
Hora Típica	11:30 - 15:00	13:00 - 15:00	13:30 - 15:00	13:30 - 15:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	42,0	28,0	25,5	39,0
	máxima	47,5	38,0	31,0	45,0
	média	45,2	33,5	27,4	42,3
	s	2,1	3,0	1,9	2,2
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	29	23,0	15,0	25,0
	máxima	32	25,0	20,0	28,0
	média	30,2	24,3	17,1	26,3
	s	1,2	0,8	1,6	1,5
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	13	4,5	9,0	14,0
	máximo	16,5	13,0	11,5	17,0
	médio	14,9	9,2	10,4	16,0
	s	1,4	2,5	1,0	1,1

s – desvio padrão

Tabela 7.9 Dias típicos para seção C – C2b

SEÇÃO C - Placa C2 - Posição b					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	29/01 a 03/02/01	21 a 26/03/00	22 a 27/06/00	14 a 19/10/00	
Hora Típica	6:00	6:00 - 7:30	6:00 - 7:30	6:00 - 7:30	
Temperatura Topo (°C)	mínima	22,5	21,0	10,0	24,0
	máxima	27,5	23,0	17,5	25,5
	média	25,1	22,1	14,2	24,1
	s	1,9	0,6	3,0	0,9
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	26	23,0	15,5	24,0
	máxima	29,0	26,0	19,5	25,0
	média	27,9	24,4	17,3	24,5
	s	1,1	0,9	1,7	0,4
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-4,0	-4,0	-5,5	-2,5
	máximo	-1,5	-1,0	-1,5	0,0
	médio	-2,75	-2,3	-3,1	-0,7
	s	1,0	1,1	1,5	0,9
MÁXIMAS					
Datas	29/01 a 03/02/01	21 a 26/03/00	22 a 27/06/00	14 a 19/10/00	
Hora Típica	11:30 - 15:00	13:00 - 14:30	13:30 - 15:00	13:30 - 15:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	38,0	29,0	26,0	39,0
	máxima	47,0	40,0	32,0	45,0
	média	43,5	34,3	28,5	43,0
	s	3,3	3,4	2,1	2,5
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	29,0	22,5	17,5	25,0
	máxima	31,5	27,5	22,0	27,0
	média	30,0	25,3	19,1	26,1
	s	0,8	1,7	1,7	0,7
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	9,0	6,5	8,0	12,0
	máximo	17,0	12,5	10,5	19,0
	médio	13,4	9,0	9,4	16,9
	s	2,7	2,1	1,0	2,7

s – desvio padrão

Tabela 7.10 Dias típicos para seção D – D2c

SEÇÃO D - Placa D2 - Posição c					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	06 a 13/02/01	16 a 21/05/00	06 a 12/09/00	06 a 12/12/00	
Hora Típica	3:00 - 10:00	2:00 - 8:00	6:00 - 9:00	6:00 - 7:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	17,5	12,5	14,0	18,0
	máxima	25,0	20,0	20,0	23,0
	média	20,4	15,2	16,1	20,9
	s	2,7	2,7	2,4	2,3
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	27,0	19,0	18,5	25,0
	máxima	30,0	23,5	25,0	29,5
	média	28,5	20,8	21,1	27,1
	s	1,1	1,6	2,5	1,7
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-10,5	-7,5	-6,0	-7,0
	máximo	-5,0	-3,5	-4,0	-5,5
	médio	-8,0	-5,7	-5,0	-6,2
	s	1,1	1,4	0,6	0,8
MÁXIMAS					
Datas	06 a 13/02/01	16 a 21/05/00	06 a 12/09/00	06 a 12/12/00	
Hora Típica	11:00 - 16:30	13:00 - 14:30	13:00 - 15:30	11:00 - 16:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	26,5	18,0	21,0	32,5
	máxima	37,5	28,0	34,5	42,5
	média	31,6	23,0	28,0	38,0
	s	3,8	4,3	4,5	4,0
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	28,0	20,0	19,5	29,5
	máxima	32,5	23,0	27,5	32,5
	média	30,3	21,7	23,2	30,0
	s	1,8	1,1	2,7	1,3
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	3,0	2,5	1,0	2,5
	máximo	6,0	6,0	7,5	11,0
	médio	4,4	4,3	4,8	7,9
	s	1,6	1,7	2,7	3,3

s – desvio padrão

Tabela 7.11 Dias típicos para seção D – D2d

SEÇÃO D - Placa D2 - Posição d					
MÍNIMAS					
Estação Ano	Verão	Outono	Inverno	Primavera	
Datas	06 a 13/02/01	16 a 21/05/00	06 a 12/09/00	06 a 12/12/00	
Hora Típica	06:00	3:30 - 8:00	4:30 - 9:00	6:00 - 7:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	23,0	15,0	15,0	20,0
	máxima	27,5	21,5	20,0	26,0
	média	24,6	17,3	17,4	22,8
	s	1,4	2,2	1,9	2,3
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	22,0	19,0	19,0	25,5
	máxima	30,5	23,0	25,0	30,0
	média	27,9	20,6	21,3	27,7
	s	2,6	1,4	2,4	1,7
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	-6,0	-5,0	-5,0	-6,0
	máximo	-3,0	-1,5	-2,0	-4,0
	médio	-4,0	-3,3	-3,9	-4,9
	s	1,0	1,2	1,1	0,8
MÁXIMAS					
Datas	06 a 13/02/01	16 a 21/05/00	06 a 12/09/00	06 a 12/12/00	
Hora Típica	10:00 - 16:30	13:00 -14:00	13:00 - 15:30	11:00 - 16:00	
Temperatura Topo (°C)	mínima	30,0	23,0	22,5	36,0
	máxima	42,5	30,0	36,5	44,0
	média	37,5	27,3	29,7	40,8
	s	4,6	2,6	5,0	2,9
Temperatura Fundo Correspondente (°C)	mínima	28,0	21,0	19,5	28,0
	máxima	32,5	23,0	26,5	32,5
	média	30,6	21,7	22,9	30,4
	s	1,5	0,8	2,5	1,6
Diferencial Térmico (°C)	mínimo	5,5	2,0	1,0	7,5
	máximo	10,0	8,0	10,0	13,0
	médio	8,7	5,6	6,8	10,3
	s	1,8	2,3	3,4	2,2

s – desvio padrão

A análise das planilhas eletrônicas e seus respectivos gráficos, bem como a análise das Tabelas 7.5 a 7.11, onde são apresentados os dias seqüenciais típicos para cada uma das estações do ano, permitiu observar que o diferencial térmico máximo positivo ocorre na maioria das vezes entre 13 horas e 15h30, sem diferenças ao longo do ano (variando de 11 horas a 16 horas), sendo que este valor máximo tende a ocorrer aproximadamente uma hora depois da temperatura do ar atingir seu valor máximo, em dias

ensolarados, não sendo tal assertiva válida para dias nublados ou com chuva.

A Tabela 7.12 apresenta os valores médios, máximos e mínimos, para temperaturas de topo e fundo e diferenciais térmicos absolutos para a seção A.

Tabela 7.12 Valores de Temperaturas e Diferenciais Térmicos - Seção A

Seção A						
	Posição	Placa	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Temperatura Mínima (°C)	Topo	A1	24,3	22,2	17,6	22,0
		A2	24,3	21,1	16,1	22,1
		A3	24,3	21,8	17,6	22,1
	Fundo	A1	25,4	22,7	16,4	21,7
		A2	25,5	22,6	14,9	23,9
		A3	20,0	17,5	13,2	21,5
Temperatura Máxima (°C)	Topo	A1	42,9	35,2	27,3	36,0
		A2	43,4	34,5	26,9	38,9
		A3	44,0	36,4	29,7	38,9
	Fundo	A1	35,4	29,3	21,7	30,6
		A2	35,8	28,7	22,4	33,0
		A3	31,6	25,3	18,1	29,9
DT (°C)	Mínimo	A1	-1,4	-0,7	1,2	0,0
		A2	-1,3	-1,6	-1,4	-1,9
		A3	4,3	4,1	4,3	0,3
	Máximo	A1	7,4	7,3	7,4	7,4
		A2	9,0	6,5	6,1	7,7
		A3	14,1	12,3	11,0	11,0

Observando-se Tabela 7.12, verifica-se que a temperatura de topo das placas A1, A2 e A3 são similares tanto durante o dia quanto durante a noite.

Para as temperaturas de fundo, a mesma observação é válida apenas para as placas A1 e A2, pois a placa A3 apresentou sempre valores inferiores àqueles obtidos para as placas A1 e A2, com exceção à primavera (outubro de 2.000), fato este já constatado durante as comutações, e que será discutido posteriormente.

Os diferenciais térmicos mínimos e máximos observados foram similares para as placas A1 e A2; porém a placa A3 apresentou esta similaridade apenas no período de agosto a outubro de 2.000.

A Tabela 7.13 apresenta os valores médios, máximos e mínimos, para temperaturas de topo e fundo e diferenciais térmicos absolutos para as seções C e D.

Tabela 7.13 Valores de Temperaturas e Diferenciais Térmicos – C2 e D2

Seção C – Placas C2 e D2						
	Posição	Placa	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Temperatura Mínima (°C)	Topo	C2a	28,3	23,5	14,1	24,5
		C2b	25,1	22,2	13,7	24,3
		D2c	20,4	15,2	16,1	20,9
		D2d	24,6	17,3	17,4	22,8
	Fundo	C2a	27,7	23,6	15,2	24,5
		C2b	27,3	23,8	17,2	24,4
		D2c	28,2	20,2	20,8	26,6
		D2d	27,6	20,2	20,7	27,0
Temperatura Máxima (°C)	Topo	C2a	45,2	34,4	26,8	42,3
		C2b	43,5	35,2	27,9	42,9
		D2c	31,6	23,0	28	38,0
		D2d	37,5	27,2	29,7	40,8
	Fundo	C2a	28,7	26,1	18,4	29,4
		C2b	31,6	27,2	20,5	28,2
		D2c	32,1	23,3	25,3	32,7
		D2d	32,2	23,3	25,3	33,0
DT (°C)	Mínimo	C2a	0,0	-0,7	-1,4	0,0
		C2b	-2,7	-2,4	-3,3	-0,1
		D2c	-8,0	-5,6	-5,0	-6,2
		D2d	-4,0	-3,2	-3,8	-4,9
	Máximo	C2a	14,9	10	10,3	15,8
		C2b	13,4	9,4	9,3	16,6
		D2c	4,4	4,3	4,8	7,9
		D2d	8,7	5,6	6,8	10,3

A partir da tabela 7.13, pode-se verificar que valores semelhantes de temperaturas máximas e mínimas de topo são semelhantes para as placas C2 (C2a e C2b) e, independentemente, na placa D2 (D2c e D2d), pois as leituras de C2 e D2 foram obtidas em dias diferentes em função do arranjo do sistema de aquisição de dados, que opera apenas com 32 canais em cada conjunto de leituras, como já se esclareceu.

Uma concordância para as temperaturas de fundo também foi verificada para as placas C2 e D2, em todas as suas posições.

As temperaturas de topo foram similares para todas as placas e posições analisadas (A1, A2, A3, C2a, C2b, D2c e D2d).

A partir dos dados coletados entre novembro de 1.999 e fevereiro de 2.001, juntamente com a tipificação dos dados para cada uma das estações climáticas, observou-se que no outono, em dias posteriores à mudança de estação ocorreram situações em que as temperaturas máximas e mínimas de topo alcançaram valores típicos de verão, pois durante os primeiros 40 dias de outono ainda verificou-se um comportamento climático semelhante ao do verão (19/04/2.000 a 23/04/2.000); sendo assim os dias compreendidos entre 16/05/2.000 e 21/05/2.000 (placa D2) foram considerados, para as análises, como típicos dias de outono.

A mesma constatação foi feita para a primavera, onde dias que antecederam a mudança de primavera para verão (30/11/99 a 06/12/99) apresentaram temperaturas do ar (histogramas do CTH) e, conseqüentemente, temperaturas máximas e mínimas de topo alcançando valores típicos de verão, sendo portanto considerado para as análises da seção A os dias 30/11/99 a 06/12/99 como típicos dias de verão.

Observou-se, para temperaturas máximas e mínimas de topo, uma clara distinção entre primavera/verão e outono/inverno. Durante a primavera/verão, a média da temperatura mínima de topo variou de 20°C a 28°C, sendo que durante o outono/inverno estes valores estiveram entre 13°C e 18°C. A média da temperatura máxima de topo durante a primavera/verão variou entre 31°C e 46°C e entre outono/inverno entre 23°C e 30°C.

A temperatura de fundo também apresenta a mesma distinção entre primavera/verão e outono/inverno, sendo que a análise da temperatura de fundo considerou a espessura das placas; portanto foram, além de agrupadas por estação do ano, agrupadas segundo suas espessuras.

A média da temperatura mínima de fundo para as placas de 150 mm (seção A) variou de 21°C a 26°C para as placas A1 e A2 durante primavera/verão, sendo que a placa A3 apresentou valores mínimos aproximadamente 5°C abaixo dos valores obtidos para A1 e A2 durante o verão (os dias típicos de primavera considerados foram de 03/10/00 a 08/10/2.000, onde não foi observada esta anomalia). Para outono/inverno os valores estiveram entre 14°C e 22°C para as placas A1, A2 e A3, não sendo observada a anomalia da placa A3 durante o inverno.

Para as placas de 250 mm (C e D) a média da temperatura mínima de fundo variou de 24°C a 28°C durante primavera/verão e de 15° a 20°C durante outono/inverno.

A média da temperatura máxima de fundo para as placas de 150 mm de espessura variou de 30°C a 35°C durante primavera/verão para as placas A1 e A2 e durante o outono/inverno a temperatura máxima de fundo variou entre 18°C e 29°C para as placas A1 e A2, sendo válidas para a placa A3 as mesmas observações feitas para a temperatura de fundo mínima em placas de 150 mm.

Para as placas de 250 mm de espessura (C2 e D2) a média da temperatura máxima de fundo variou de 28°C a 33°C durante primavera/verão e entre 18°C e 27°C durante outono/inverno.

Os diferenciais térmicos observados apresentam clara distinção entre as placas com espessura de 150 mm (seção A) e as placas com espessuras de

250 mm (seções C e D), ainda sendo válido o agrupamento entre primavera/verão e outono/inverno.

Observa-se que os diferenciais térmicos negativos são muito menores, em valores absolutos, que os diferenciais térmicos positivos, tanto para as placas de 150 mm, quanto para as de 250 mm.

Os diferenciais térmicos negativos foram mais expressivos para as placas de 250 mm, podendo ser assumido um valor de -5°C para todas as estações do ano, onde foram obtidos valores isolados de $-10,5^{\circ}\text{C}$ durante o verão e valores próximos a zero durante a primavera.

Para as placas de 150 mm os diferenciais térmicos negativos podem ser assumidos como sendo igual a -2°C para todas as estações do ano, com exceção da placa A3, onde, devido à anomalia apresentada, foram observados diferenciais térmicos negativos desta magnitude apenas de agosto ao início de outubro de 2.000 e para os demais períodos sempre atingindo valores positivos.

Os diferenciais térmicos positivos médios para as placas A1 e A2 (150 mm) variaram de 6°C a $7,5^{\circ}\text{C}$ para o outono/inverno e de $7,5^{\circ}\text{C}$ a $9,0^{\circ}\text{C}$ para a primavera/verão, atingindo valores máximos isolados de 15°C .

Para a placa A3 foram observados diferenciais térmicos positivos em aproximadamente 80% das leituras (exceto de agosto a início de outubro de 2.000), atingindo valores que variaram de $3,5^{\circ}\text{C}$ a $12,5^{\circ}\text{C}$.

Para as placas de 250 mm (C2 e D2) foram verificados diferenciais térmicos positivos médios variando de 8°C a 17°C durante a primavera/verão e de 6°C a 10°C durante outono/inverno, atingindo valores máximos isolados próximos a $22,5^{\circ}\text{C}$.

Portanto os diferenciais térmicos positivos variam de acordo com as estações climáticas e espessura da placa. Para placas de 150 mm os diferenciais térmicos positivos foram de 3,5 (inverno) a 4,5 (verão) vezes maiores que os diferenciais negativos e para as placas de 250 mm, os diferenciais térmicos positivos foram de 2 (inverno) a 3,5 (verão) vezes maiores que os diferenciais térmicos negativos (todos em valor absoluto).

A relação entre os diferenciais térmicos e a espessura da placa, ou seja, os gradientes térmicos, foram obtidos a partir da divisão do diferencial térmico pela espessura remanescente entre os PT-100 posicionados a 2 mm do topo e a 2 mm do fundo da placa (110 mm para as placas da seção A e 210 mm para as placas C2 e D2). Os valores obtidos são apresentados na tabela 7.14.

Os gradientes térmicos negativos mostraram-se similares para todas as estações do ano, sendo observados para as placas A1 e A2 (150 mm) valores próximos a $-0,015^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ e para as placas de 250 mm, valores próximos a $-0,07^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, metade do valor observado para as placas de 150 mm.

A placa A3 apresentou gradientes térmicos negativos apenas durante os meses de seca, constatado a partir das leituras realizadas no início de agosto de 2.000, onde obteve-se valores similares àqueles apresentados para as placas A1 e A2.

Os gradientes térmicos positivos para as placas A1 e A2 (150 mm) não apresentaram significativa variação durante as estações do ano, apontando valores entre $0,061^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ e $0,069^{\circ}\text{C}/\text{mm}$.

Para as placas de 250 mm (considerando para a análise a placa C2) verificou-se que os gradientes térmicos variaram de $0,067^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ a

0,078°C/mm durante a primavera/verão, e para o outono/inverno os valores se aproximaram de 0,045°C/mm.

Tabela 7.14 Gradientes térmicos obtidos

Espessura (mm)	Placa	Média dos Dias Típicos*				
		Primavera	Verão	Outono	Inverno	
Gradientes Térmicos Mínimos (°C/mm)**						
150 mm	A1	mínimo	0,000	-0,027	-0,023	0,005
		máximo	0,000	0,000	0,009	0,018
		médio	0,000	-0,014	-0,006	0,011
	A2	mínimo	-0,027	-0,023	-0,023	-0,018
		máximo	-0,009	-0,005	0,000	-0,005
		médio	-0,017	-0,013	-0,015	-0,013
	A3	mínimo	0,000	0,027	0,027	0,036
		máximo	0,005	0,045	0,045	0,041
		médio	0,003	0,037	0,037	0,040
250 mm	C2a	mínimo	-0,010	-0,012	-0,005	-0,019
		máximo	0,000	0,007	0,000	0,000
		médio	-0,001	0,000	-0,003	-0,006
	C2b	mínimo	-0,012	-0,019	-0,019	-0,026
		máximo	0,000	-0,007	-0,005	-0,007
		médio	-0,003	-0,013	-0,011	-0,015
	D2c	mínimo	-0,033	-0,050	-0,036	-0,029
		máximo	-0,026	-0,024	-0,017	-0,019
		médio	-0,030	0,038	-0,027	-0,024
	D2d	mínimo	-0,029	-0,029	-0,024	-0,024
		máximo	-0,019	-0,014	-0,007	-0,010
		médio	-0,021	-0,019	-0,016	-0,019
Gradientes Térmicos Máximos (°C/mm)**						
150 mm	A1	mínimo	0,009	0,045	0,055	0,055
		máximo	0,100	0,082	0,077	0,082
		médio	0,067	0,067	0,066	0,067
	A2	mínimo	0,045	0,050	0,045	0,045
		máximo	0,082	0,114	0,073	0,064
		médio	0,070	0,078	0,059	0,055
	A3	mínimo	0,068	0,118	0,100	0,095
		máximo	0,116	0,141	0,123	0,109
		médio	0,100	0,126	0,112	0,102
250 mm	C2a	mínimo	0,067	0,062	0,021	0,043
		máximo	0,081	0,079	0,062	0,055
		médio	0,076	0,071	0,044	0,050
	C2b	mínimo	0,057	0,043	0,031	0,038
		máximo	0,090	0,081	0,060	0,050
		médio	0,080	0,064	0,043	0,045
	D2c	mínimo	0,012	0,014	0,012	0,005
		máximo	0,052	0,029	0,029	0,036
		médio	0,038	0,021	0,020	0,023
	D2D	mínimo	0,036	0,026	0,010	0,005
		máximo	0,062	0,048	0,038	0,048
		médio	0,049	0,041	0,027	0,032

* Os dias típicos são apresentados nas Tabelas 7.5 a 7.11

** Valores de gradientes térmicos se relacionam à distância entre termoresistores de topo e de fundo

Os gradientes térmicos observados para a primavera/verão nas placas de 250 mm apresentaram valores muito próximos àqueles obtidos para todas as estações do ano em placas de 150 mm; contudo, durante o outono/inverno, os valores observados para as placas de 250 mm são aproximadamente 1,5 vezes menores que aqueles obtidos para as placas de 150 mm.

Com relação à placa A3, os gradientes térmicos positivos máximos atingiram valores 1,8 vezes maiores que aqueles obtidos nas placas A1 e A2, apresentando valores similares aos obtidos para placas de mesma espessura apenas nos meses de seca.

A Tabela 7.15 apresenta a média dos gradientes térmicos negativos e positivos obtidos para as estações do ano.

Tabela 7.15 Média dos gradientes térmicos positivos e negativos

Seção	Primavera	Verão	Outono	Inverno
150 mm (A1 e A2)	-0,017 a 0,069	-0,013 a 0,063	-0,010 a 0,063	-0,013 a 0,061
250 mm (C2)	-0,002 a 0,078	-0,007 a 0,067	-0,007 a 0,043	-0,010 a 0,047
150 mm (A3)	0,003 a 0,100	0,037 a 0,126	0,037 a 0,112	-0,017 a 0,060*

*valor calculado a partir das leituras dos dias 05/08 a 09/08/2.000.

7.3.2 Valores Extremos Obtidos

A partir das análises de todas as leituras realizadas foram extraídos valores extremos de temperaturas e diferenciais térmicos absolutos que ocorreram durante a monitoração da pista experimental, de novembro de 1.999 a fevereiro de 2.001, conforme seguem:

- Temperatura de topo mínima: 6,5°C (21/07/2.000 – 8 horas);
- Temperatura de topo máxima: 55°C (04/01/2.001 – 15 horas);
- Diferencial térmico máximo positivo:
 - placas de 150 mm: 15°C (04/01/2.001 – 15 horas);
 - placas de 250 mm: 22,5°C (27/01/2.001 – 14 horas);

- Temperatura de fundo mínima:
 - placas de 150 mm: 12,5°C (A3 – 16/06/2.000 – 7h30);
 - placas de 250 mm: 13,5°C (23/06/2.000 – 9h30);
- Temperatura de fundo máxima:
 - placas de 150 mm: 42°C (04/01/2.001 – 16h30);
 - placas de 250 mm: 35°C (09/02/2.001 – 19 horas);
- Diferencial térmico negativo mínimo:
 - placas de 150 mm: -3°C (07/10/2.000 – 7 horas);
 - placas de 250 mm: -10,5°C (07/02/2.001 – 7 horas).

Em 27/01/2.001 obteve-se portanto um gradiente térmico de 0,107 °C/mm e estimando-se um gradiente linear, o diferencial térmico seria igual a 26,8°C para placas com 250 mm de espessura.

7.3.3 Taxas de Crescimento e Queda da Temperatura

Para o entendimento da forma como as temperaturas se modificam no topo e no fundo das placas de CCP, foram definidas as seguintes taxas:

- T1 – Taxa de elevação da temperatura de topo como a razão entre a diferença das temperaturas de topo máxima e mínima e o número de horas decorridas entre tais valores;
- T2 – Taxa de elevação da temperatura de fundo como a razão entre a diferença das temperaturas de fundo máxima e mínima e o número de horas decorridas entre tais valores;
- T3 – Taxa de decréscimo de temperatura de topo como sendo a razão entre a diferença entre seu pico e o momento de inversão entre valores de topo e fundo (à tarde ou à noite) e o número de horas decorridas entre tais valores;
- T4 – Taxa de decréscimo de temperatura de fundo como sendo a razão entre a diferença entre seu pico e a temperatura no momento da

inversão seguinte (da manhã ou da madrugada sucessiva) e o número de horas decorridas entre tais valores.

A Figura 7.2 apresenta, esquematicamente, os limites de cálculo das taxas acima mencionadas.

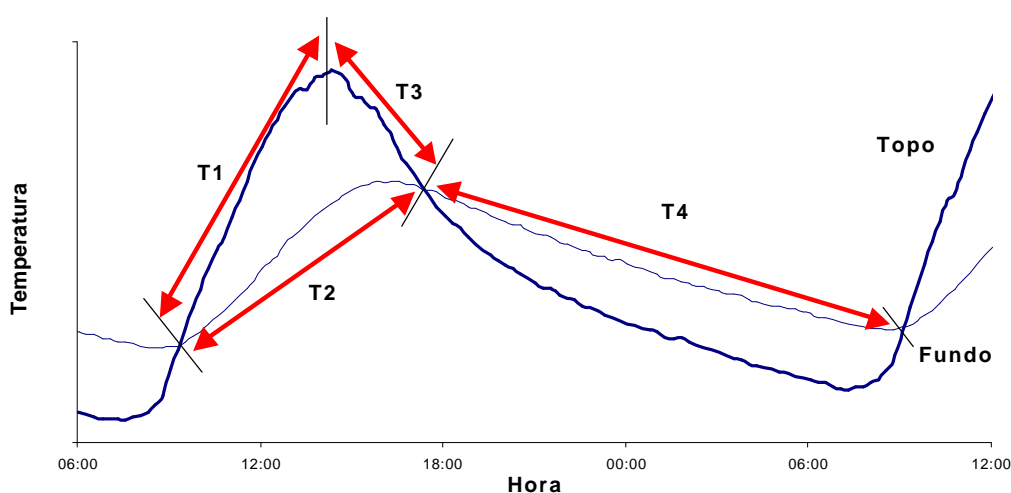


Figura 7.2 Pontos limite para o cálculo das taxas de elevação e queda de temperaturas (esquemático)

Na Tabela 7.16 são apresentadas as taxas referentes às estações do ano, calculadas a partir dos valores obtidos no tratamento dos dados.

A partir da Tabela 7.16, observa-se que a taxa de elevação da temperatura de topo (T1) apresentaram variações similares entre as placas de 150 mm e 250 mm. Durante a primavera/verão variaram de 1,8°C/h a 2,6°C/h e durante o outono/inverno, entre 1,1°C/h e 2,1 °C/h, ou seja, aproximadamente 25% menor nas estações mais frias, sendo portanto dependente da temperatura do ar.

Tabela 7.16 Taxas de elevação e decréscimo de temperaturas (°C/h)

Seção	Estação	T1		T2		T3		T4	
		média	s	média	s	média	s	média	s
A1	primavera	2,45	0,44	1,12	0,35	-1,98	0,28	-0,61	0,22
	verão	1,84	0,70	1,00	0,44	-1,96	0,75	-0,59	0,14
	outono	1,84	0,42	0,68	0,15	-1,50	0,43	-0,50	0,13
	inverno	1,66	0,37	0,61	0,18	NI	NI*	-0,33	0,11
A2	primavera	2,53	0,54	1,04	0,27	-2,01	0,33	-0,73	0,14
	verão	2,42	0,78	1,09	0,42	-2,02	0,52	-0,54	0,24
	outono	1,65	0,48	0,75	0,15	-2,01	0,87	-0,39	0,13
	inverno	1,52	0,21	0,68	0,05	-1,05	0,38	-0,33	0,05
A3	primavera	2,52	0,46	1,18	0,30	NI	NI	-0,80	0,12
	verão	2,15	0,73	0,96	0,42	NI	NI	-0,55	0,09
	outono	2,12	0,52	1,05	0,29	NI	NI	-0,51	0,14
	inverno	1,83	0,39	0,87	0,19	NI	NI	-0,44	0,08
C2a	primavera	2,42	0,27	0,44	0,14	-1,05	0,11	-0,34	0,10
	verão	2,26	0,22	0,52	0,20	-1,52	0,33	-0,29	0,03
	outono	1,32	0,30	0,22	0,06	-1,59	0,21	-0,20	0,07
	inverno	1,92	0,40	0,34	0,08	-1,57	0,22	-0,20	0,06
C2b	primavera	2,57	0,29	0,34	0,06	-1,94	0,29	-0,29	0,06
	verão	2,42	0,22	0,50	0,13	-2,09	0,55	-0,32	0,05
	outono	1,82	0,41	0,31	0,06	-1,52	0,25	-0,20	0,07
	inverno	2,14	0,44	0,36	0,28	-1,56	0,30	-0,24	0,13
D2c	primavera	2,33	0,51	0,77	0,12	-1,43	0,60	-0,36	0,07
	verão	1,53	0,65	0,48	0,29	-2,18	1,64	-0,27	0,13
	outono	1,15	0,81	0,41	0,17	-1,03	0,54	-0,22	0,08
	inverno	1,64	0,54	0,60	0,18	-1,18	0,64	-0,25	0,07
D2d	primavera	2,43	0,45	0,61	0,21	-1,83	0,43	-0,39	0,04
	verão	1,58	0,34	0,66	0,25	-1,99	0,81	-0,32	0,13
	outono	1,51	0,77	0,45	0,12	-1,27	0,42	-0,21	0,04
	inverno	1,64	0,62	0,56	0,17	-1,36	0,59	-0,26	0,09

s - desvio padrão

NI – não inversão

As taxas de elevação da temperatura de fundo (T2), apresentam uma clara distinção entre placas com espessuras diferentes:

- placas de 150 mm: as temperaturas de fundo se elevam a uma taxa aproximada de 1,0°C/h a 1,2 °C/h, durante a primavera/verão e a uma taxa de aproximadamente 0,6°C/h a 1,0°C/h, durante o outono/inverno;
- placas de 250 mm: as taxas de elevação da temperatura de fundo então compreendidas entre 0,2°C/h e 0,7°C/h, independente da estação climática.

Verifica-se portanto que as taxas de elevação da temperatura de fundo são menores para as placas mais espessas, como era de se esperar.

Analisando a taxa de decréscimo da temperatura de topo (T3), verifica-se, como para as taxas de elevação da temperatura de topo, variações similares entre placas de 150 mm e 250 mm, estando entre $-1,5^{\circ}\text{C/h}$ e $-2,2^{\circ}\text{C/h}$ durante a primavera/verão e entre $-1,0^{\circ}\text{C/h}$ e $-1,5^{\circ}\text{C/h}$ durante o outono/inverno, ratificando a dependência da temperatura de topo da temperatura do ar, pois as taxas são claramente maiores durante as estações quentes.

As taxas de decréscimo da temperatura de fundo (T4), também apresentam uma clara distinção entre placas com espessuras diferentes:

- placas de 150 mm: as temperaturas de fundo decrescem a uma taxa aproximada de $-0,5^{\circ}\text{C/h}$ a $-0,8^{\circ}\text{C/h}$, durante a primavera/verão e de aproximadamente $-0,3^{\circ}\text{C/h}$ e $-0,5^{\circ}\text{C/h}$, durante o outono/inverno;
- placas de 250 mm: as taxas de decréscimo da temperatura de fundo então compreendidas entre $-0,2^{\circ}\text{C/h}$ e $-0,4^{\circ}\text{C/h}$, independentemente da estação climática.

Verifica-se portanto que as taxas de elevação e queda da temperatura de topo são fortemente dependentes da temperatura do ar e da estação climática.

Comparando as taxas de elevação e decréscimo da temperatura de fundo, verifica-se que a temperatura de fundo se eleva a uma taxa maior durante as estações quentes e para as taxas de decréscimo da temperatura de fundo, observa-se também uma dependência da espessura da placa, onde placas de 150 mm apresentam valores similares às placas de 250 mm apenas durante o outono/inverno, estando mais elevadas durante a primavera/verão.

Portanto as taxas de elevação e decréscimo da temperatura de fundo são diretamente dependentes da espessura da placa de concreto de cimento Portland do pavimento.

7.3.4 Descrição dos Efeitos Específicos do Clima

As temperaturas de topo e fundo variam de acordo com as condições climáticas, ou seja, se o dia é quente e ensolarado, se é um dia nublado, se houve chuva, se esta chuva foi uma chuva tropical, etc.

A situação mais comum (Figura 7.3) é aquela onde a temperatura de fundo durante a madrugada é superior àquela de topo, ocorrendo uma inversão dessa condição nas primeiras horas da manhã (ou, ainda, excepcionalmente durante a madrugada) e a partir deste ponto a temperatura de topo se eleva a uma taxa superior em comparação à temperatura de fundo, até ocorrer o pico de temperatura de topo, que a partir de então começa a decrescer; a temperatura de fundo atinge seu maior valor algum tempo depois, geralmente muito próximo a um horário em que novamente ocorre uma inversão, entre 16 horas e 18 horas, quando então o diferencial absoluto entre o topo e o fundo é negativo (gradiente noturno).

A Figura 7.4 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa, onde pode-se considerar uma distribuição linear do diferencial térmico entre 20 horas e 6 horas, ocorrendo para os demais períodos uma distribuição não linear (quadrática).

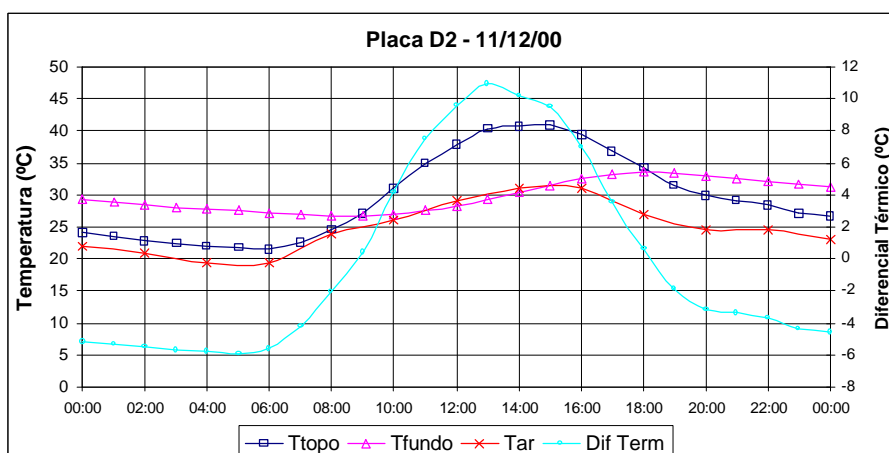


Figura 7.3 Variação da temperatura - situação típica

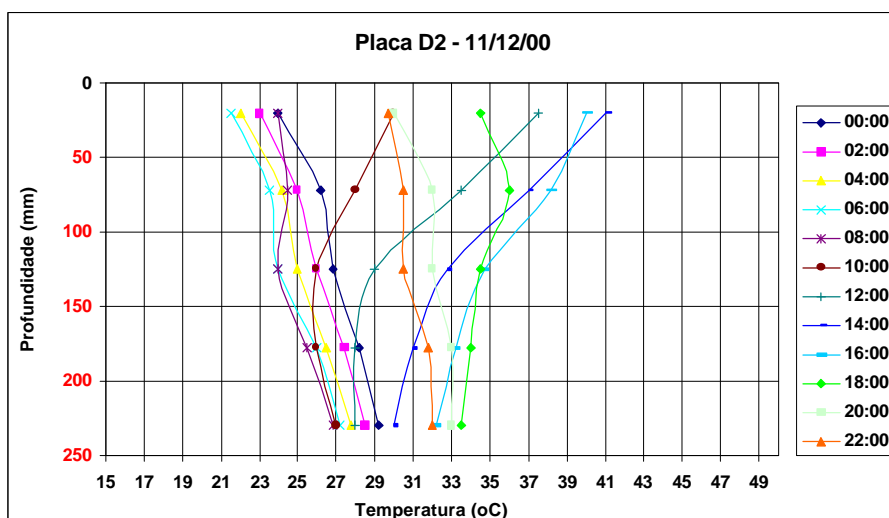


Figura 7.4 Variação da temperatura ao longo da profundidade da placa para a situação típica (11/12/2000)

7.3.4.1 Dia quente ensolarado

A ocorrência de dias quentes ensolarados foi observada em 40,5% dos 190 dias de leituras. A Figura 7.5 apresenta a variação típica de temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para um dia quente ensolarado, quando ocorre elevado diferencial térmico diurno, sendo que a inversão entre topo e fundo no período da tarde ocorre sempre após as 18 horas. No caso, a temperatura do ar encontrava-se a 33°C e o número de horas de insolação recebido até as 16 horas foi de 8 horas.

A Figura 7.6 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia quente ensolarado, onde também pode-se considerar uma distribuição linear do diferencial térmico entre 20 horas e 6 horas, ocorrendo para os demais períodos uma distribuição não linear.

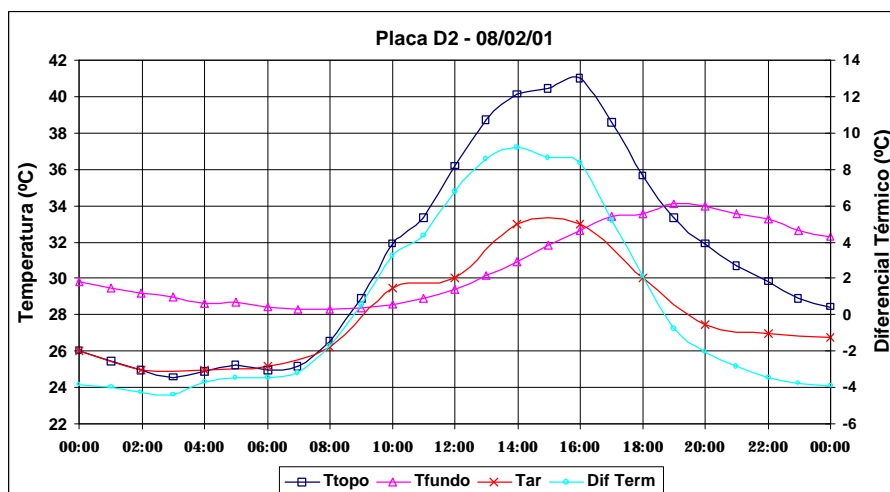


Figura 7.5 Variação da temperatura em um dia quente ensolarado (08/02/2.001)

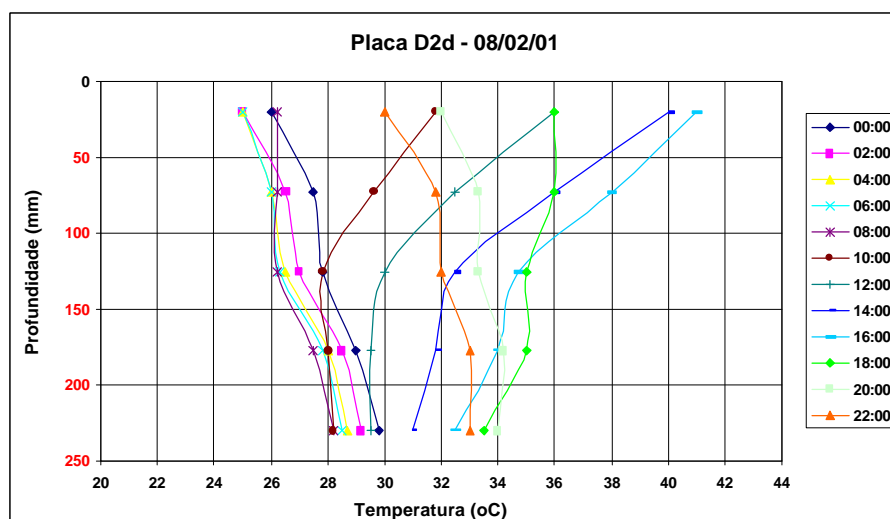


Figura 7.6 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia quente ensolarado (08/02/2.001)

7.3.4.2 Efeitos de uma chuva tropical

Bruscas quedas nos diferenciais térmicos, devido chuvas tropicais, ocorreram em 7,4% dos 190 dias de leituras realizadas; nestes casos, a temperatura do topo cai rapidamente quando o dia repentinamente se torna nublado e ocorrem pancadas de chuva.

Em 23/01/01 uma forte chuva tropical caiu aproximadamente às 14 horas; neste instante a temperatura do ar estava em torno de 33°C e a temperatura da placa em 45°C no topo e 29°C no fundo, portanto apresentando um diferencial térmico de 16°C. Ao término da chuva, o céu continuou nublado, eliminando qualquer possibilidade de aumento da temperatura de topo depois da chuva; sendo assim, às 15 horas, o diferencial de temperatura caiu para 4°C e uma hora depois da chuva, ainda durante a tarde, o diferencial de temperatura ficou negativo. Outro caso onde foi observado o efeito de uma chuva tropical foi em 10/12/2.000, descrito na seqüência.

A Figura 7.7 apresenta a variação típica de temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para o dia 23/01/2.001.

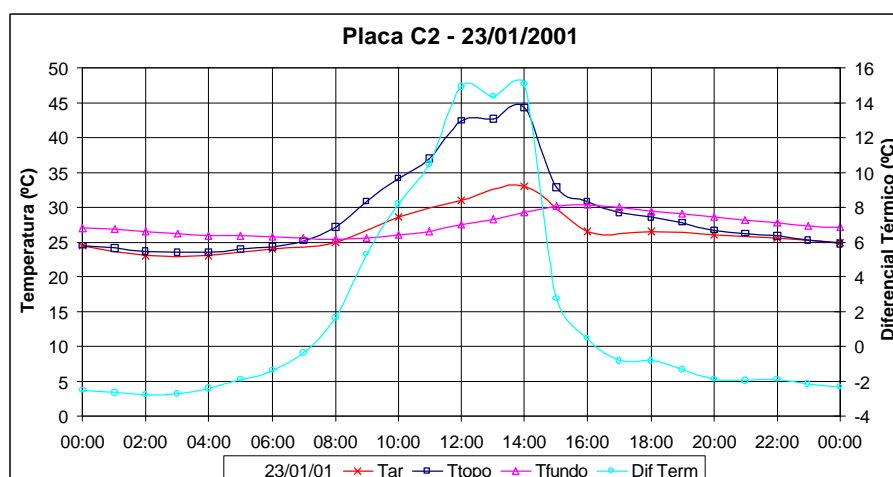


Figura 7.7 Variação da temperatura em um dia de chuva tropical (23/01/2.001)

A Figura 7.8 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante a ocorrência de uma chuva tropical (23/01/2.001). O diferencial térmico apresenta uma distribuição linear até a metade da espessura da placa quando a temperatura do topo decresce devido ao resfriamento da superfície (16 horas), sendo esta chuva insuficiente para alterar a temperatura abaixo da metade da espessura da placa. Os demais horários apresentam uma distribuição não linear do diferencial térmico.

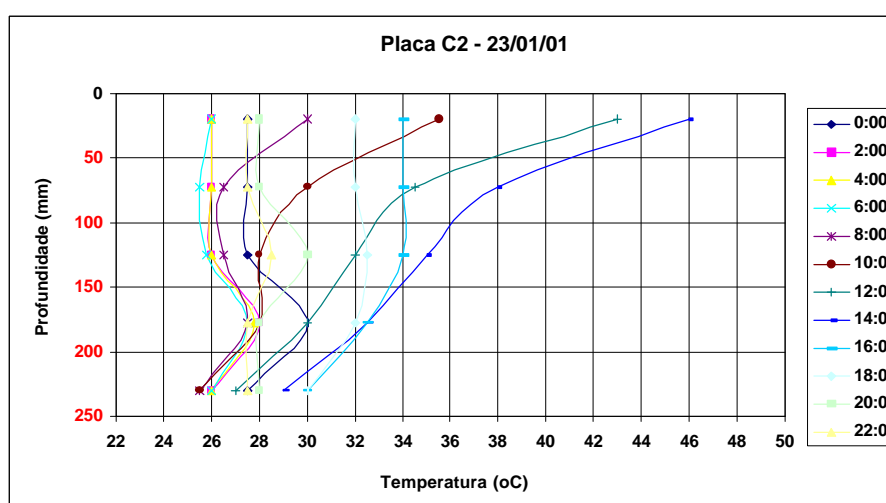


Figura 7.8 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante uma chuva tropical (23/01/2.001)

7.3.4.3 Efeitos de ocorrência de múltipla inversão

Outra importante ocorrência foi a múltipla inversão, observada em apenas 2,3% dos 190 dias de leituras. Em 10/12/2.000 às 10h30, depois de uma clara manhã de sol, e a ocorrência da primeira inversão do diferencial térmico (de negativo para positivo), as condições do tempo mudaram subitamente e o céu ficou totalmente nublado, o que causou uma pequena queda na temperatura do topo da placa. O céu permaneceu nublado até às 11h30, quando o diferencial de temperatura era maior que 6°C e então começou a chover forte, mas apenas durante um curto período de tempo.

Próximo ao meio dia ocorreu a segunda inversão do diferencial térmico (de positivo para negativo) e às 12h30 seu valor era -5°C , a partir daí a temperatura do fundo da placa tendeu ao equilíbrio, mas a temperatura de topo aumentou novamente devido ao reaparecimento do sol.

Às 14h30 houve a terceira inversão do diferencial térmico, agora de negativo para positivo, sendo que o diferencial térmico aumentou até por volta de 16 horas, e então ocorreu a quarta e última inversão do dia, às 17h30. A Figura 7.9 apresenta a variação típica de temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para o dia 10/12/2.000.

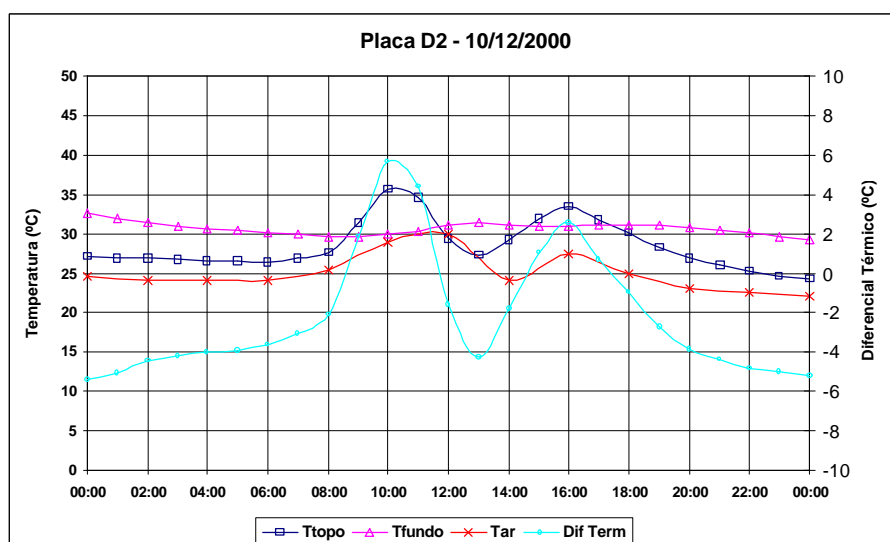


Figura 7.9 Variação da temperatura em um dia com múltipla inversão (10/12/2.000)

A Figura 7.10 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante a ocorrência de múltiplas inversões (10/12/2.000). A temperatura de topo passa a ser menor que a temperatura nas demais profundidades do pavimento e, com o ressurgimento do sol, esta temperatura se eleva novamente, voltando a decrescer após as 16 horas. O diferencial térmico apresenta uma distribuição não linear durante todo o dia.

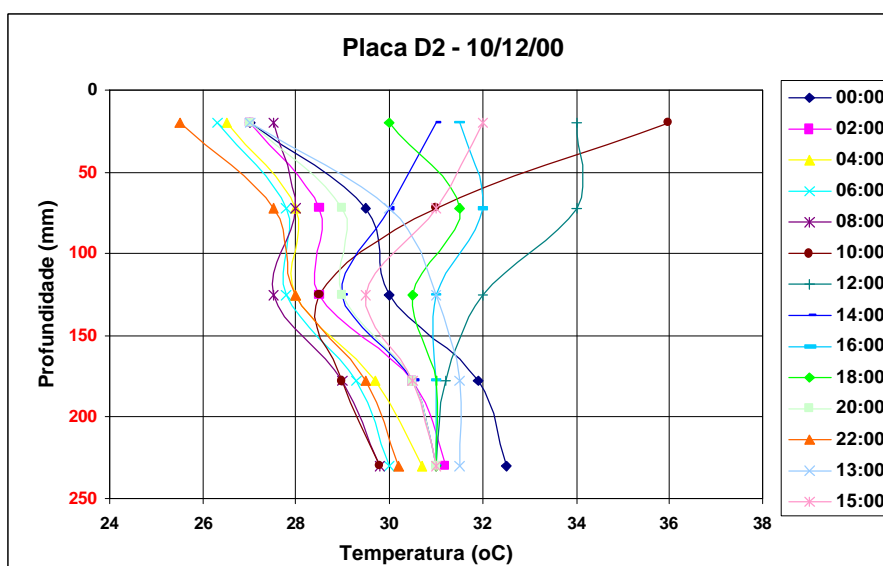


Figura 7.10 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa em um dia com múltipla inversão (10/12/2.000)

7.3.4.4 Diferencial térmico positivo ou nulo o dia todo

Verificou-se em 8,5% dos 190 dias de leituras, a ocorrência de diferenciais térmicos positivos ou nulos durante todo o dia, como em 03 e 04/10/00 e em 26 a 28/01/01, como pode ser verificado na Figura 7.11, onde são apresentadas as variações típicas de temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar. Este comportamento ocorreu, na maioria das vezes, quando a temperatura de fundo é estável e próxima do valor da temperatura do ar.

Analisando os dias antecedentes à ocorrência, observou-se que foram dias bem quentes, onde a máxima temperatura do ar foi de 32°C (histogramas de temperatura do CTH) e durante a noite a temperatura do ar se manteve próxima a 22°C, ou seja, noites quentes, podendo ser uma possível causa para a ocorrência de diferenciais térmicos positivos o dia todo.

As explicações para esta hipótese somente serão possíveis com a continuidade da pesquisa, procedendo com a coleta de dados para as placas C2 e D2 de maneira contínua por longos períodos.

Outra hipótese para a ocorrência de diferenciais térmicos positivos o dia todo, para o caso da seção A3, é a presença de umidade excessiva ou saturação da base granular, ponto que será discutido mais adiante.

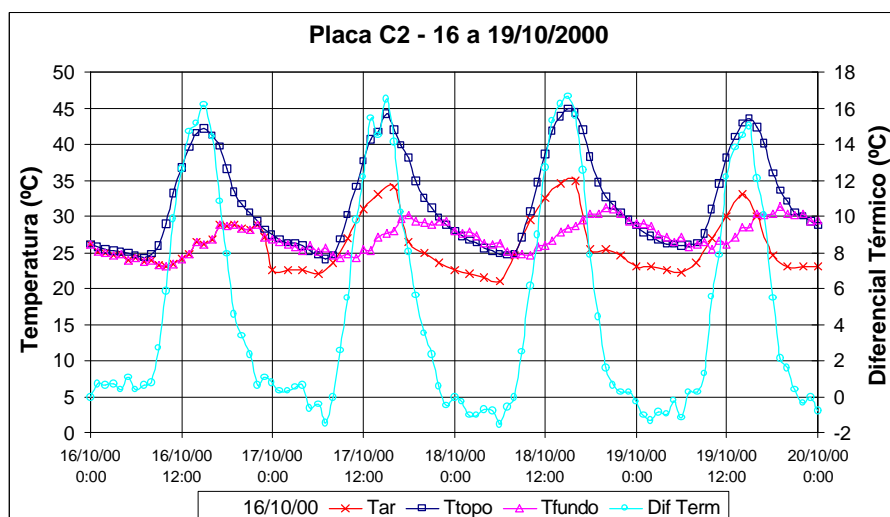


Figura 7.11 Variação da temperatura em um dia com Gradiente Positivo (16 a 19/10/2.000)

A Figura 7.12 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante a ocorrência de diferenciais térmicos positivos o dia todo. Neste caso, a distribuição do diferencial térmico é não linear durante todo o dia, apresentando uma distribuição parabólica entre as 0 horas e 8 horas.

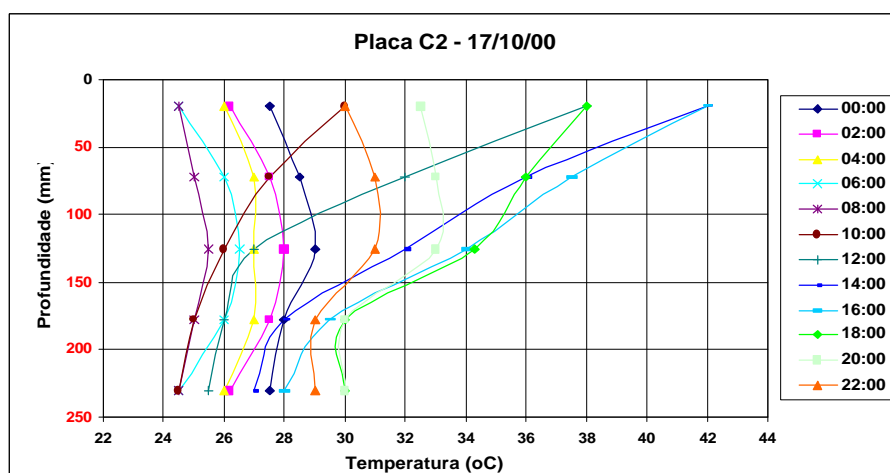


Figura 7.12 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para diferencial térmico positivo o dia todo (17/10/2.000)

7.3.4.5 Diferencial térmico negativo o dia todo

Houve casos em que os diferenciais térmicos eram negativos o dia todo, não ocorrendo nenhuma inversão. Este tipo de situação ocorreu em apenas 4,7 % dos 190 dias de leituras.

Na Figura 7.13 pode ser observado o comportamento das temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para os dias 13 e 14/11/2.000. A temperatura do ar se manteve constante, sem variação, e com diferencial baixo (14/11/2.000); a temperatura de topo do pavimento não se elevou a ponto de superar a temperatura de fundo que estava alta devido ao dia anterior ter sido um dia quente (temperatura do ar igual aos dias anteriores).

A Figura 7.14 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa durante a ocorrência diferenciais térmicos positivos o dia todo de onde são verificados diferenciais térmicos não lineares durante todo o dia.

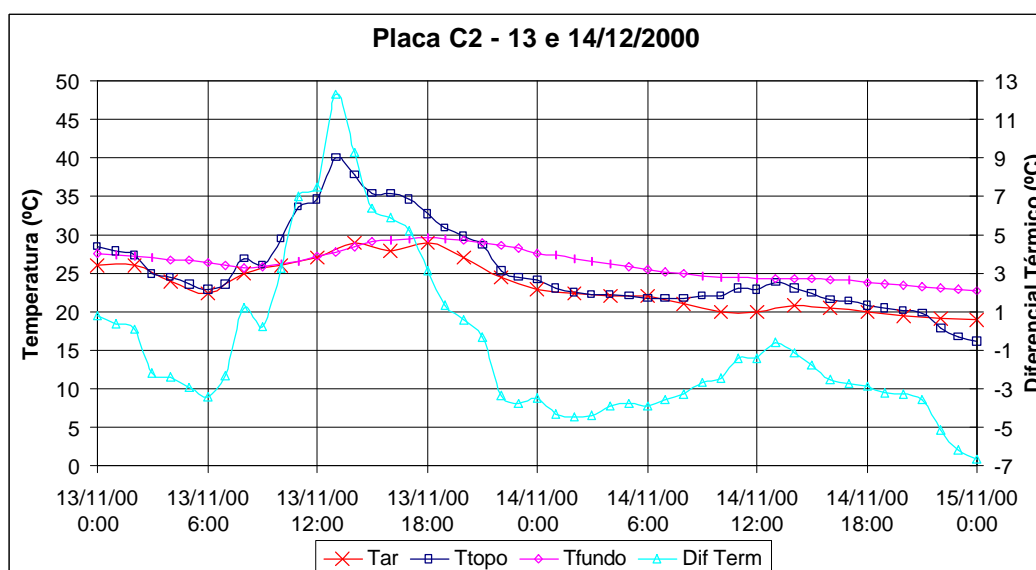


Figura 7.13 Variação da temperatura em um dia com gradiente térmico negativo (13 e 14/12/2.000)

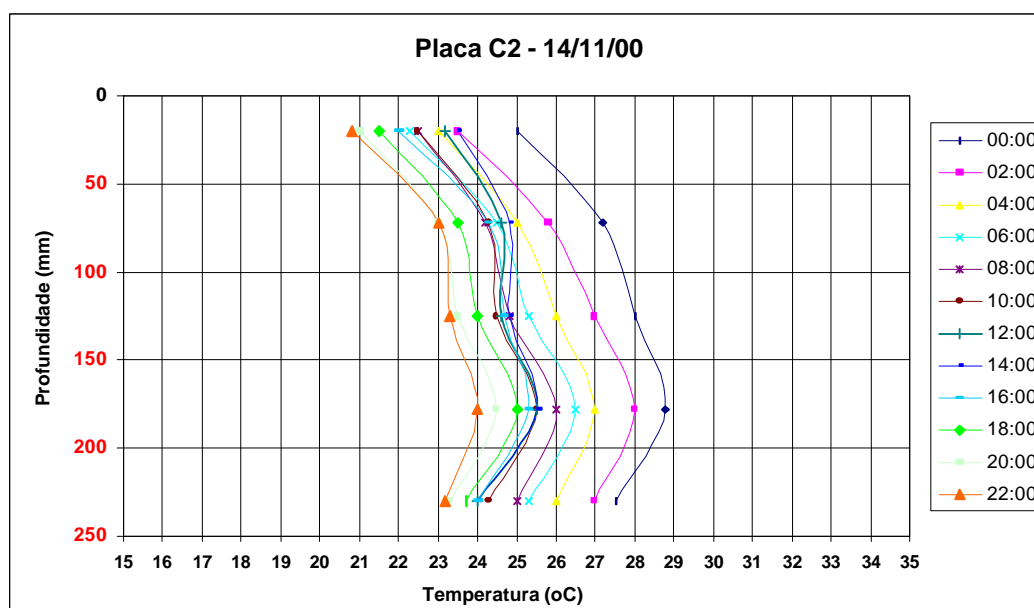


Figura 7.14 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para diferencial negativo o dia todo (14/11/2.000)

7.3.4.6 Efeito de um dia nublado

A ocorrência de dias nublados foi observada em 10% dos 190 dias de leituras. Em dias nublados o diferencial térmico positivo não é superior a 5°C , ocorrendo as inversões da manhã e tarde nos horários típicos. A Figura 7.15 apresenta a variação típica de temperaturas de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para o dia 09/12/1.999.

A Figura 7.16 apresenta a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa. A ocorrência verificada no dia 06/12/99 foi um caso isolado de dia nublado, onde os diferenciais térmicos apresentam-se não lineares, praticamente o tempo todo (exceção das 16 horas). Verificou-se que dias nublados seqüenciais, como em 03 e 04/07/2.000, o diferencial térmico apresenta um comportamento não linear durante praticamente o dia todo, conforme pode ser verificado a partir das Figuras 7.17 a 7.20.

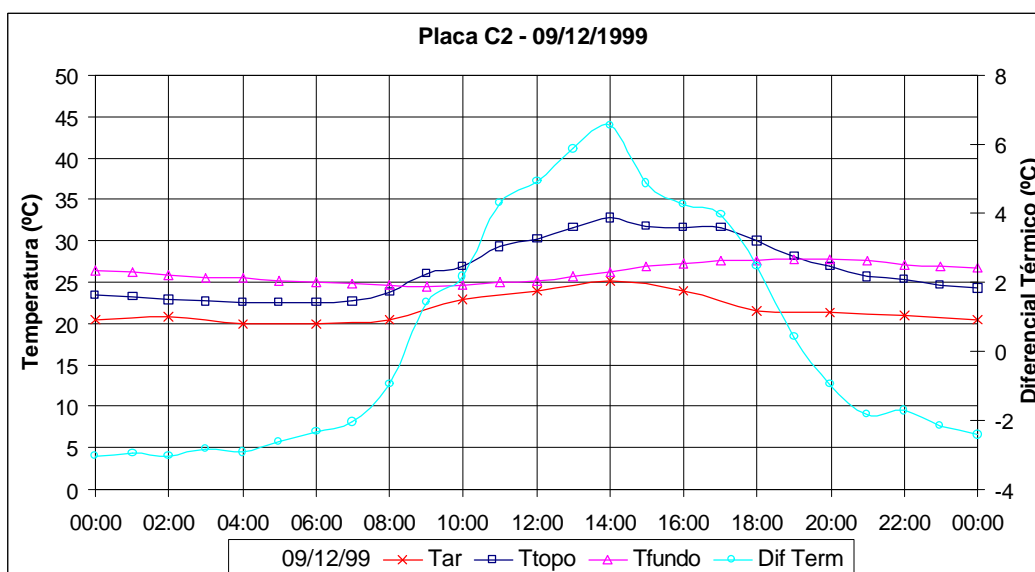


Figura 7.15 Variação da temperatura em um dia nublado (09/12/1.999)

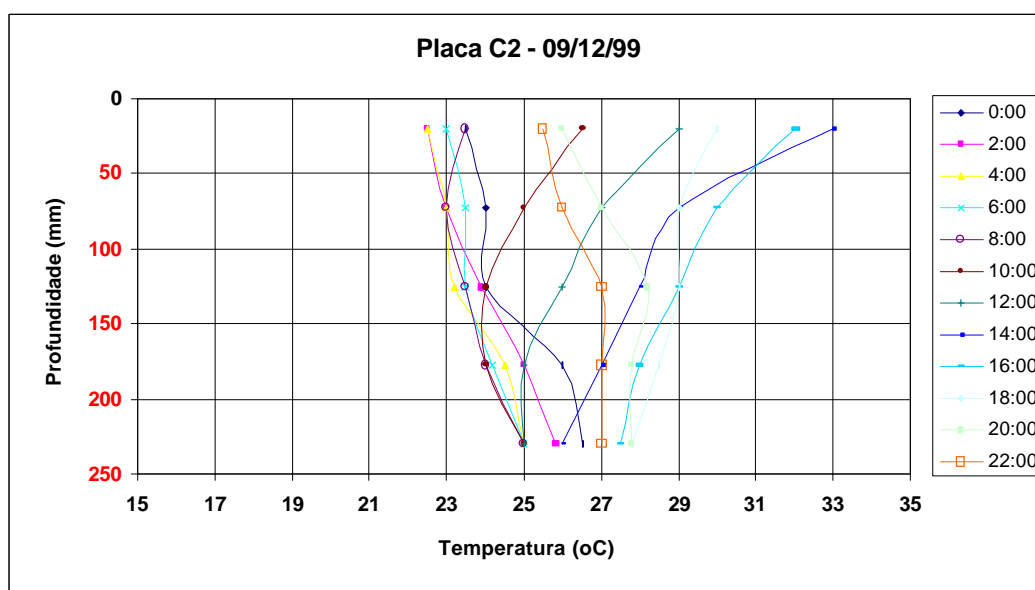


Figura 7.16 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (09/12/1.999)

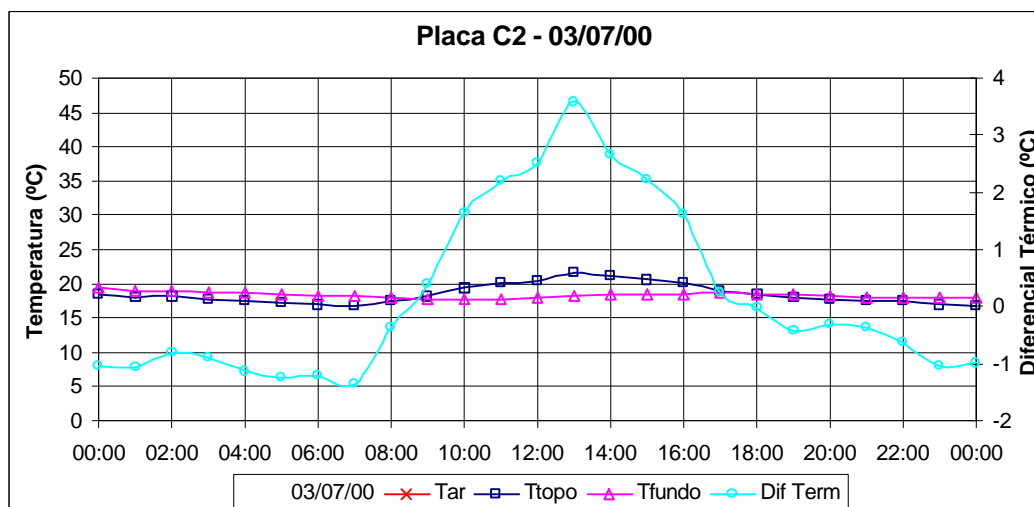


Figura 7.17 Variação da temperatura em um dia nublado (03/07/2.000)

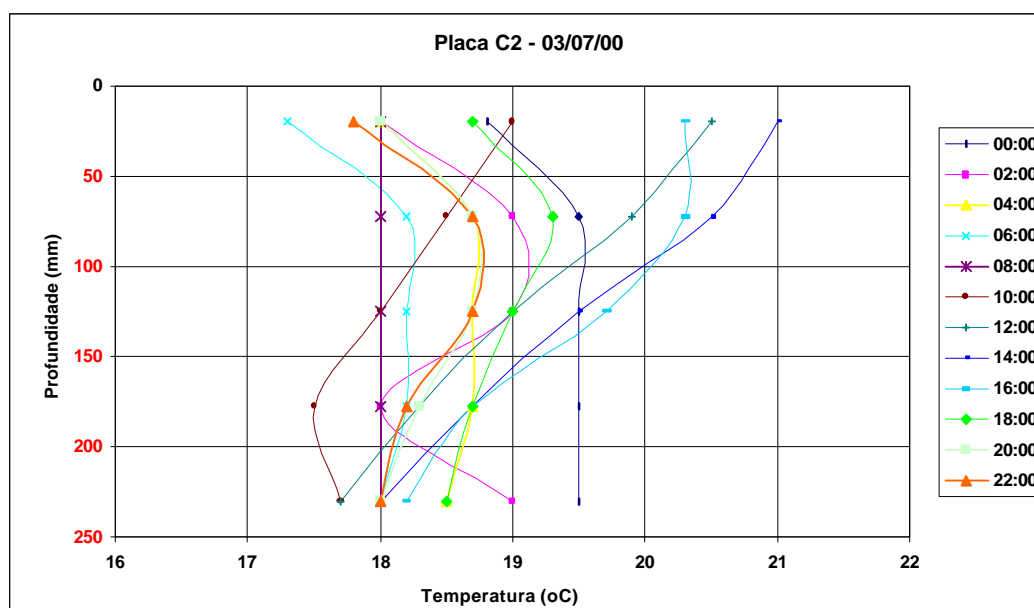


Figura 7.18 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (03/07/2.000)

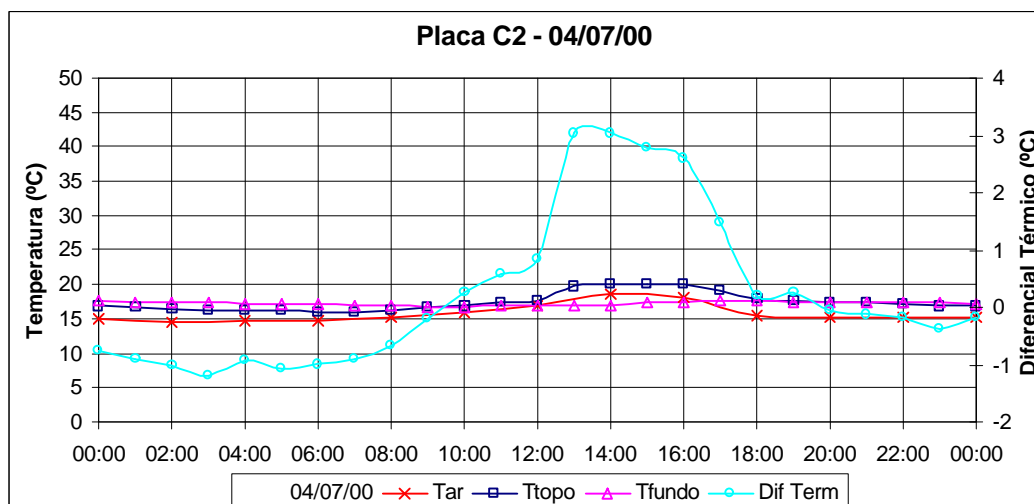


Figura 7.19 Variação da temperatura em um dia nublado (04/07/2.000)

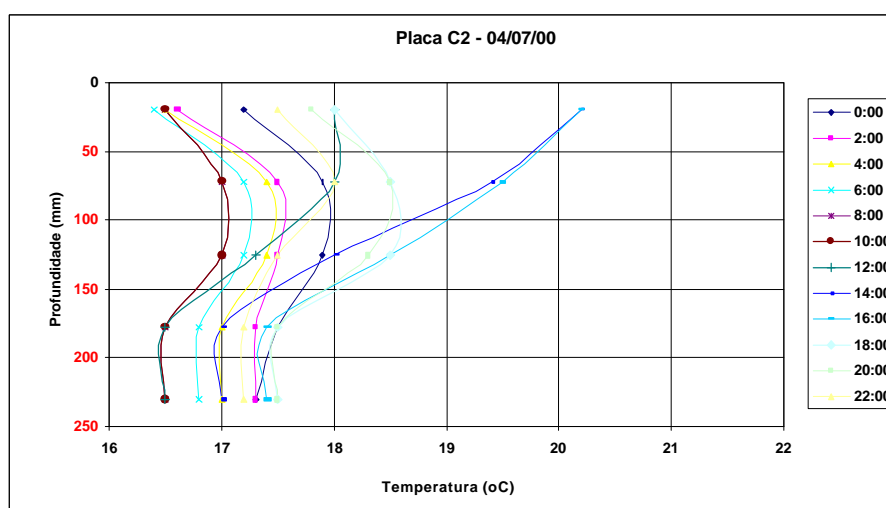


Figura 7.20 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia nublado (04/07/2.000)

7.3.4.7 Efeito de um dia com chuvisco

O efeito de um dia com chuvisco foi observado em 5,3% dos 190 dias de leituras se assemelha bastante ao efeito de um dia nublado; porém a inversão da manhã ocorre mais tarde que em um dia normal e a inversão da tarde bem mais cedo que em um dia normal, sendo o diferencial térmico não é superior a 5°C. A Figura 7.21 apresenta a variação típica de temperaturas

de topo e fundo, diferencial térmico e temperatura do ar para o dia 01/12/2.000.

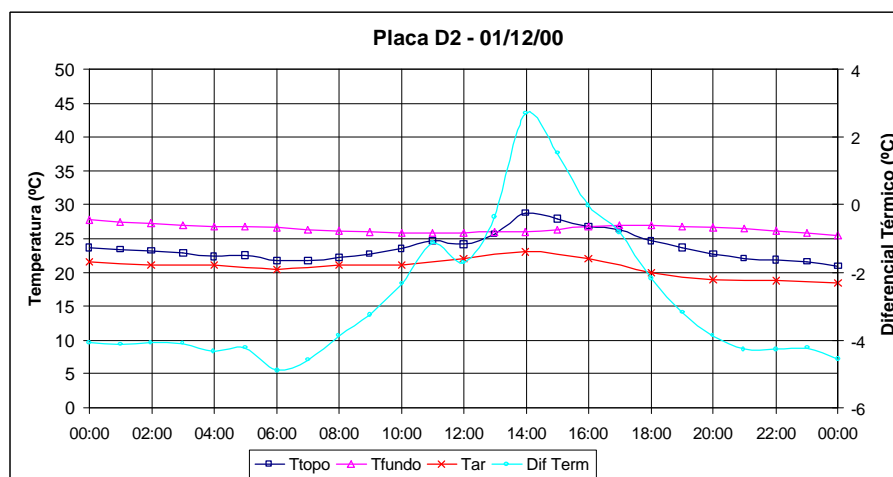


Figura 7.21 Variação da temperatura em um dia com chuva (01/12/2.000)

Na Figura 7.22 pode ser observada a distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa, onde verifica-se novamente a não linearidade da mesma.

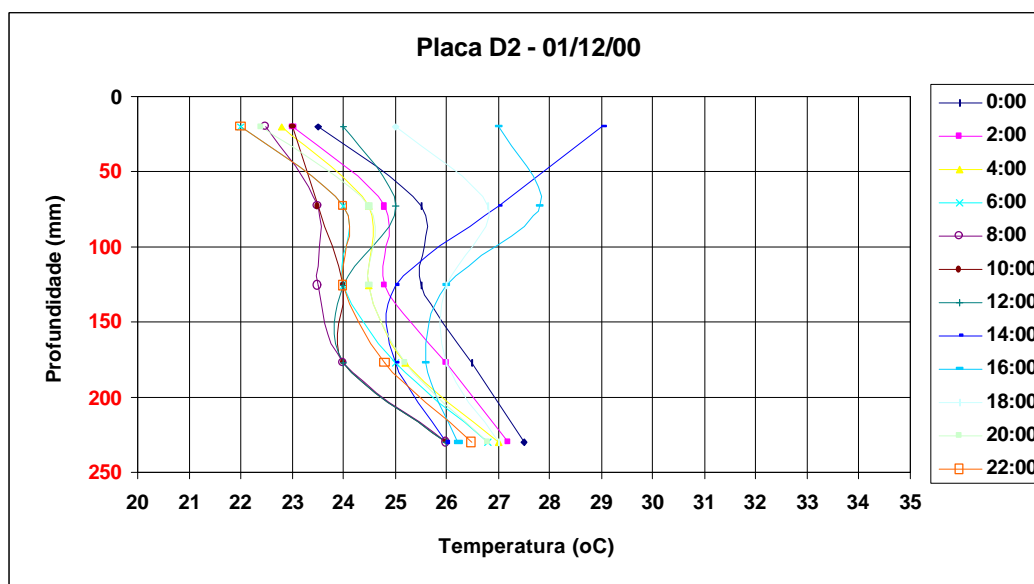


Figura 7.22 Distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa para um dia com chuva (01/12/2.000)

7.4 Efeitos Relacionados à Presença de Umidade na Base

Logo no início do tratamento dos dados coletados para a seção A, onde todos os instrumentos estavam operantes, lembrando que os mesmos estão posicionados no centro de cada uma das placas, a 2 mm do topo e a 2 mm do fundo da placa, verificou-se que as temperaturas de fundo da placa A3 apresentavam sempre valores inferiores àqueles observados nas placas A1 e A2.

Estava constatado que havia uma anomalia na placa A3 e então suspeitou-se da presença de umidade na base desta placa, que foi construída em brita graduada simples.

Nas primeiras leituras de agosto de 2.000 (05/08/2.000 a 09/08/2.000), período de seca, verificou-se que esta anomalia havia desaparecido e a partir das comutações realizadas em 09/08/2.000 (Tabela 7.1), verificou-se que as temperaturas de fundo de todas as placas da seção A eram semelhantes.

Nas leituras realizadas de 02/10/2.000 a 08/10/2.000 ainda observou-se semelhança entre as temperaturas de fundo das placas da seção A, apresentando os mesmos diferenciais térmicos, não ocorrendo a não inversão do mesmo observada durante os meses de chuva (anteriores a agosto de 2.000).

As leituras dos meses subsequentes voltaram a apresentar esta anomalia e as comutações realizadas em 08/11/2.000, 28/11/2.000 e 05/01/2.001 (Tabelas 7.2 a 7.4) confirmaram novamente a ocorrência de temperaturas de fundo na placa A3 inferiores as temperaturas de fundo das placas A1 e A2.

A área onde a pista experimental foi construída (Av. Prof. Almeida Prado, ao lado do edifício da Engenharia Civil da EPUSP), trata-se de um aterro sem

controle, executado há muitos anos sobre os solos aluvionares mal drenados daquela bacia, estando o terreno em nível com o sistema fluvial local (Rio Pinheiros).

Em decorrência das chuvas, ainda que escassas, porém ocorridas nos dias anteriores à execução da base em BGS na seção A, observou-se dificuldades de compactação do solo do subleito, que apresentava o fenômeno de deslocamentos plásticos laterais do solo argiloso de aterro durante a compactação, também denominado por “borrachudo”, exatamente da metade da seção A para seu final (a seção A possui a placa A1 com 4 m, a placa A2 com 5,5 m e a placa A3 com 7,5 m), vindo a coincidir exatamente na área da futura placa A3.

Como o experimento não estaria sujeito à tráfego pesado e constante, tal condição não impediria a compactação da base em BGS e posterior execução do pavimento de concreto.

A água presente nas camadas inferiores tende a migrar, por efeito de capilaridade, para a base do pavimento, que neste caso foi construída em BGS, fenômeno típico de regiões tropicais, condicionando a presença de água ou umidade excessiva no fundo da placa A3 nos períodos de chuva, ratificando os valores de temperatura de fundo observados na placa A3, pois apenas no período de grande estiagem ocorrido em São Paulo, do outono até a primavera de 2.000, ocorreu perda de água nas camadas de subleito e de base, permitindo então que as temperaturas de fundo não fossem afetadas (diminuídas) pela presença de umidade excessiva na base da placa A3.

Desta maneira torna-se possível o entendimento da ocorrência de diferenciais térmicos positivos durante todo o dia, ou seja, ocorrência de não inversão do diferencial térmico, e com valores expressivamente superiores na placa A3 (12,5°C) em comparação às placas A1 e A2 (de 6°C a 8°C), com

exceção feita à estação seca, onde os diferenciais térmicos foram semelhantes para todas as placas da seção A (Tabela 7.12).

A única forma de comparar o fenômeno cientificamente, não apenas fundamentado nas evidências de obra para engenheiros, seria a futura instalação de piezômetros ou de medidores de umidade mais modernos.

Como conseqüências deste tipo de fenômeno, pavimentos de CCP construídos em vias de fundo de vale muito comuns na cidade de São Paulo, estariam muito mais sujeito aos efeitos de empenamento (aumento das tensões) que aqueles construídos em via ou rodovia bem drenada, para situações climáticas semelhantes, em termos de diferenciais térmicos que poderiam ocorrer.

Na Figura 7.23 apresenta-se a variação de temperaturas de topo e fundo, o respectivo diferencial térmico e a temperatura do ar para um dia em que ocorreram diferenciais noturnos positivos resultantes de presença de umidade no fundo da placa A3 (época quente e de chuvas); como discorrido, a umidade de fundo causaria uma queda na temperatura de fundo, resultando no comportamento observado.

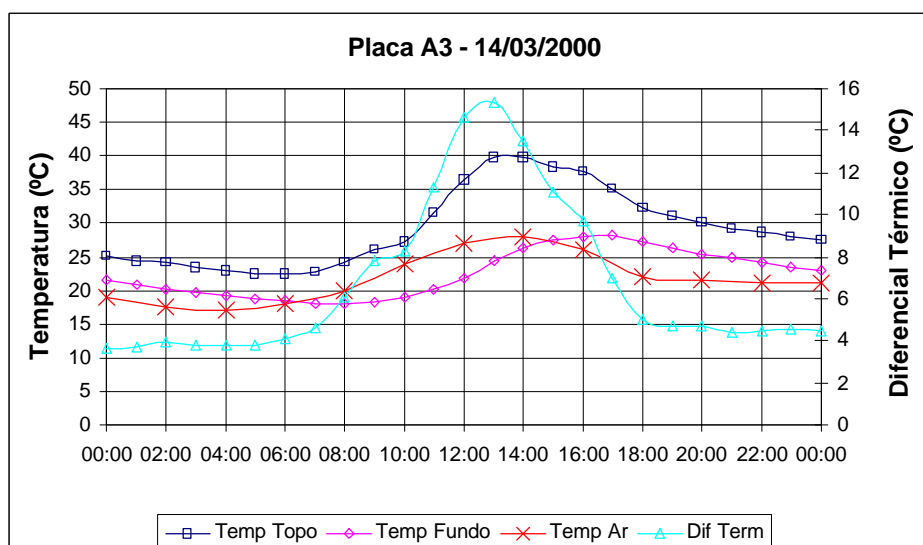


Figura 7.23 Efeito de Presença de Umidade no Fundo da Placa (14/03/2.000)

7.5 Não Linearidade dos Diferenciais Térmicos

Para ter-se uma idéia, ainda que grosseira, do comportamento a temperatura ao longo da espessura da placa, ou seja se o diferencial térmico é linear ou não linear, durante o dia todo e ainda durante as estações do ano, pautou-se pelos dias típicos de cada estação (Figuras 7.24 a 7.27), sendo consideradas as placas com espessura de 250 mm (instrumentos instalados em cinco profundidades).

Foi possível observar uma similaridade entre a primavera e verão e entre o outono e inverno. Observando-se os dias típicos de primavera/verão, é possível verificar que existe uma distribuição aproximadamente linear da temperatura ao longo da profundidade da placa entre as 20 horas e 6 horas, mas quando a temperatura do ar começa a se elevar e a incidência de radiação solar aumenta, o comportamento passa a ser não linear durante o restante do dia.

É possível verificar um efeito decrescente de variações de temperatura, sendo do topo para o meio mais acentuada que do meio para o fundo, consequência da transmissão de calor lenta do material por comparação a outros materiais de pavimentação, como por exemplo os concretos asfálticos que são muito termo-suscetíveis.

Durante os dias típicos de outono/inverno, observam-se mudanças no comportamento da temperatura ao longo da espessura da placa. Um comportamento não linear é típico durante todo o dia, sendo a temperatura de fundo pouco alterada; também verifica-se uma pequena variação da temperatura de fundo, sendo esta variação entre 3°C e 5°C durante a primavera/verão e de 2°C durante outono/inverno. Uma grosseira aproximação linear somente seria possível durante os horários em que o diferencial térmico atinge seu valor máximo.

Portanto observa-se que diferenciais térmicos não lineares ocorrem em 60% do dia durante a primavera e o verão e em 95% do dia durante o outono e o inverno. Para um ano cheio, ou seja, 365 dias, diferenciais térmicos lineares ocorrem apenas em 25% dos dias, desta maneira, assumir uma distribuição linear do diferencial térmico não seria real; além disso, poderia resultar em tensões de empenamento muito otimistas como se apresentará no Capítulo 8.

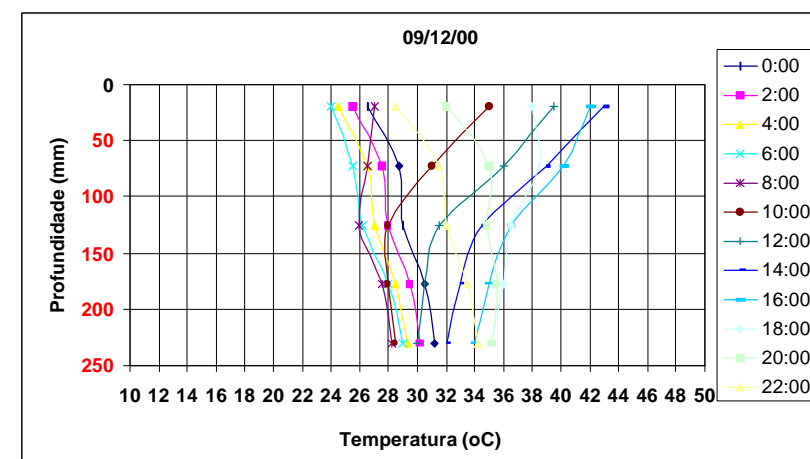
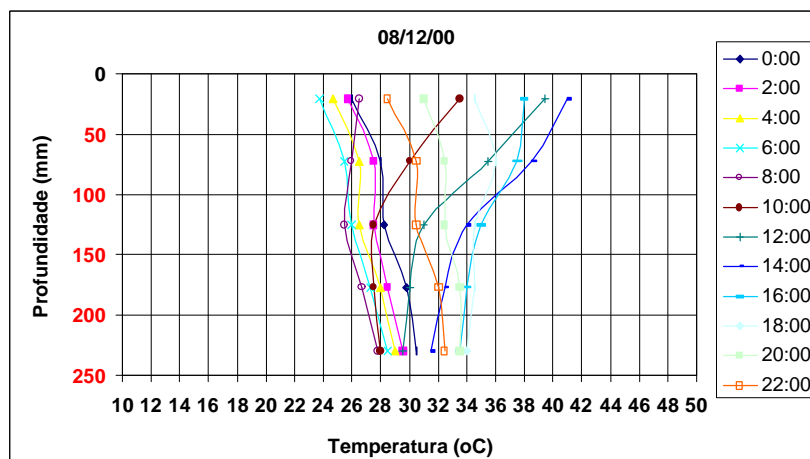
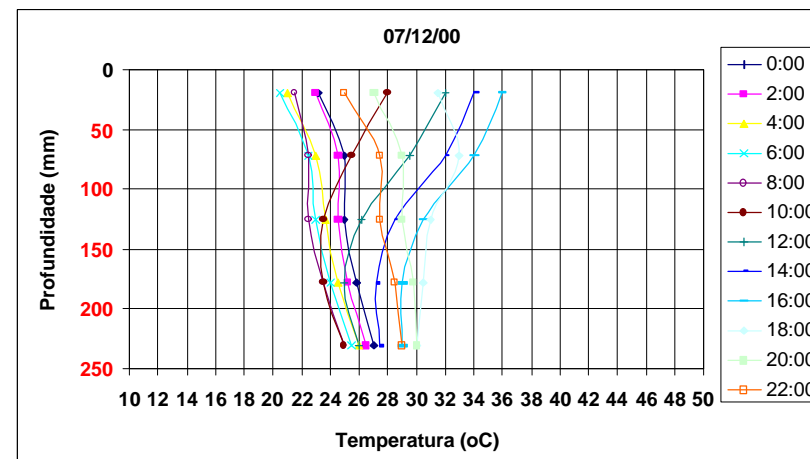
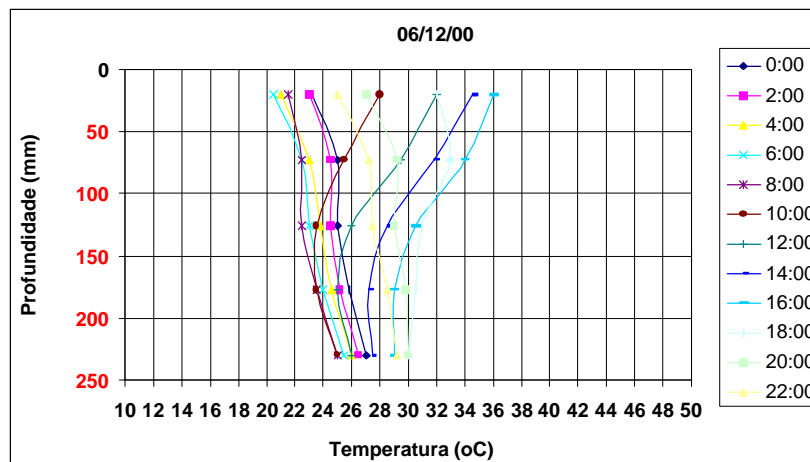


Figura 7.24 Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de primavera

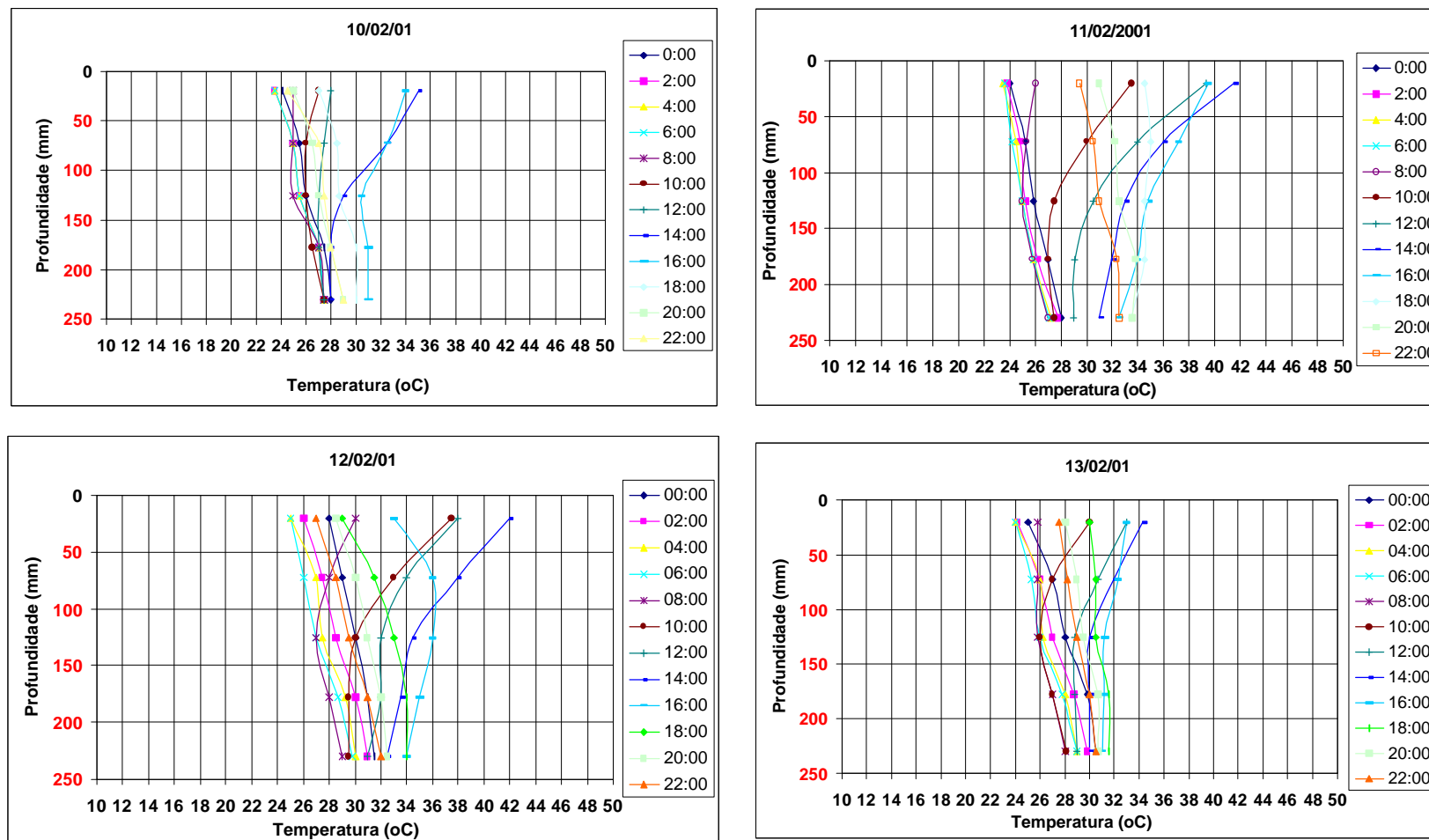


Figura 7.25 Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de verão

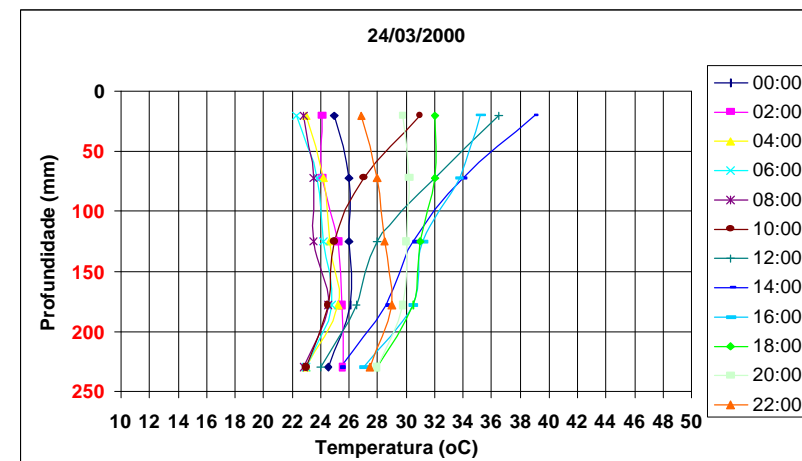
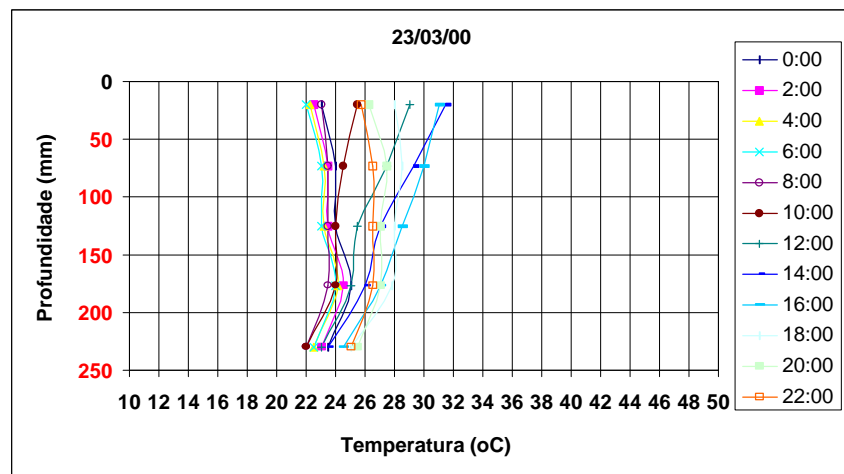
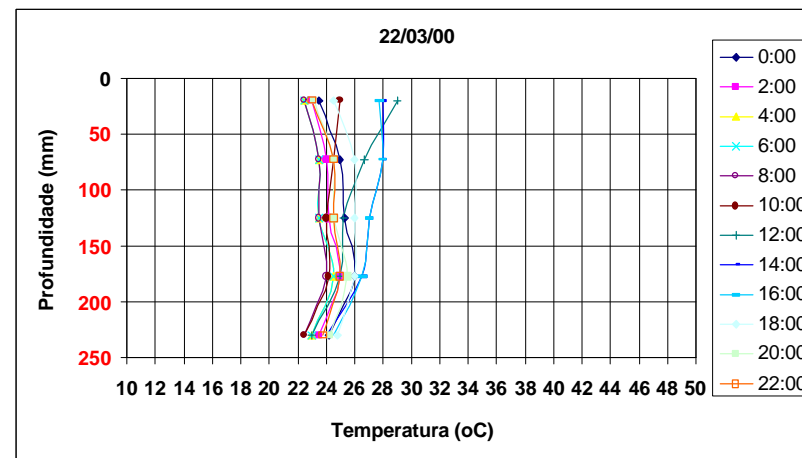
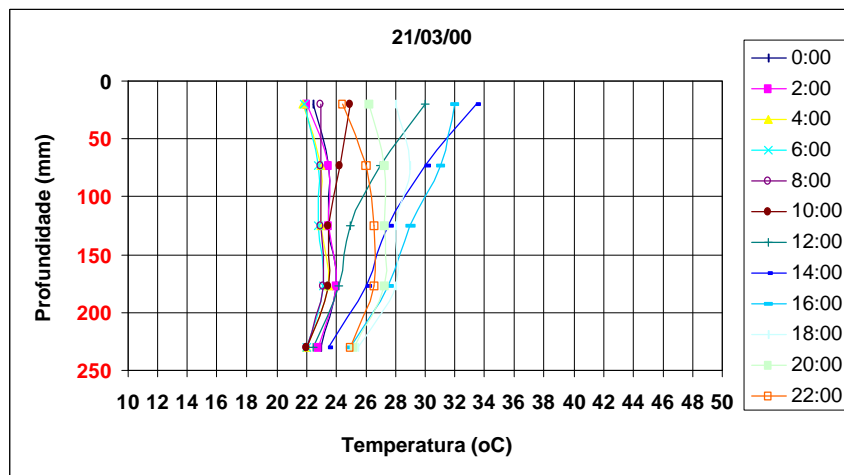


Figura 7.26 Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de outono

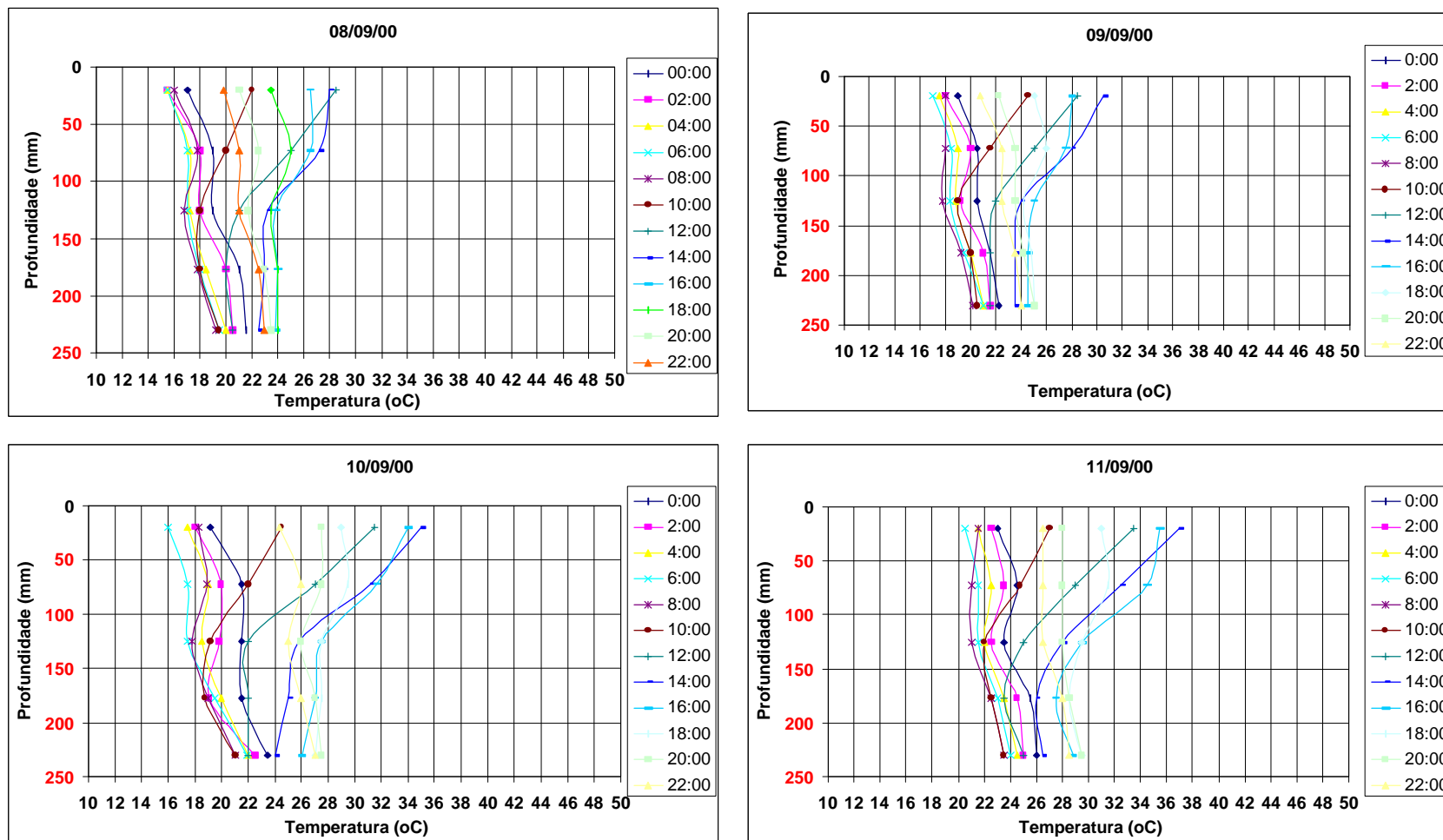


Figura 7.27 Comportamento do gradiente térmico ao longo da espessura da placa para os dias típicos de inverno

7.6 Frequência de Distribuição dos Diferenciais Térmicos

Nesta análise de ocorrências de diferenciais térmicos positivos ou negativos em termos percentuais, a partir das distribuições de frequências apresentadas, foi tomado que, dada a precisão de leituras dos PT-100, já mencionada anteriormente, no limite entre -2°C a 0°C poderiam estar ocorrendo, na realidade, gradientes superiores ao nulo (e positivos, portanto), sendo então admitida meio a meio a frequência cheia observada em tal faixa para a faixa entre 0°C e $+2^{\circ}\text{C}$; mesmo procedimento foi adotado, vice-versa, para a frequência cheia entre -2°C e 0°C .

Os histogramas de distribuição da frequência dos diferenciais térmicos para todas as leituras realizadas em cada estação do ano, são apresentados nas Figuras 7.28 a 7.31 para as placas de 150 mm de espessura e nas Figuras 7.32 a 7.35 para as placas de 250 mm de espessura.

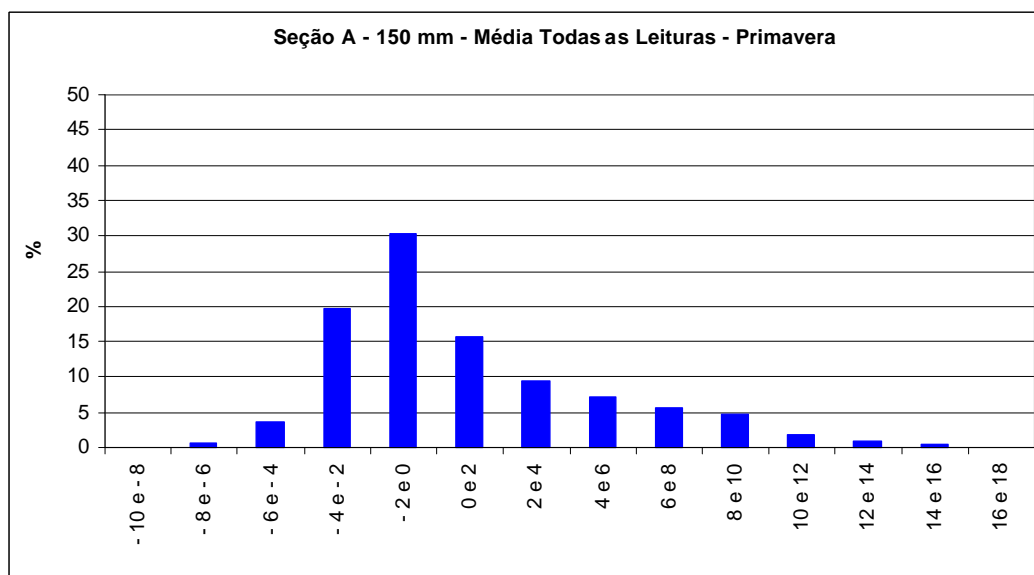


Figura 7.28 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera – placas de 150 mm (todos os dias de leitura)

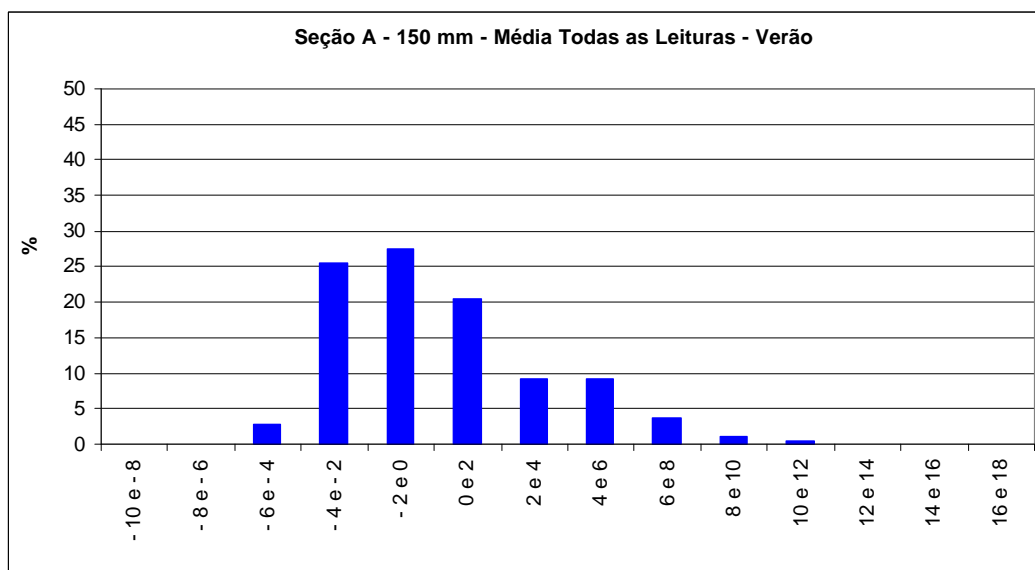


Figura 7.29 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão
– placas de 150 mm (todos os dias de leitura)

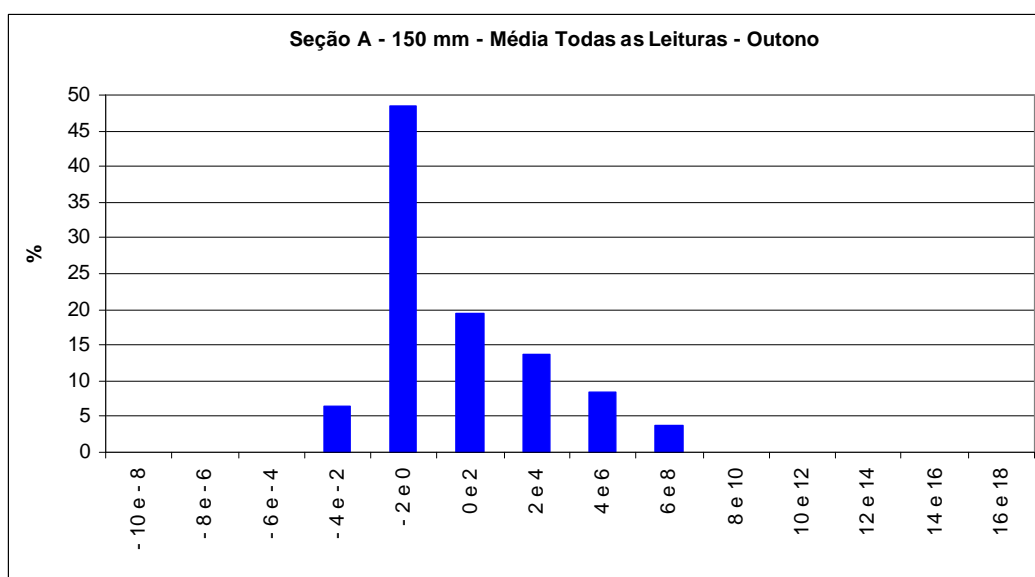


Figura 7.30 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono – placas de 150 mm (todos os dias de leitura)

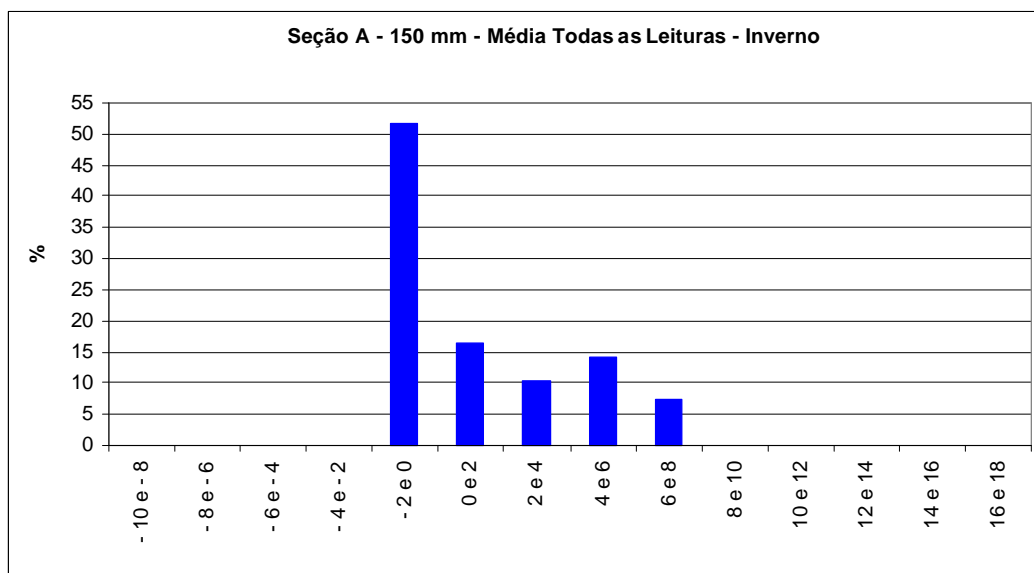


Figura 7.31 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno – placas de 150 mm (todos os dias de leitura)

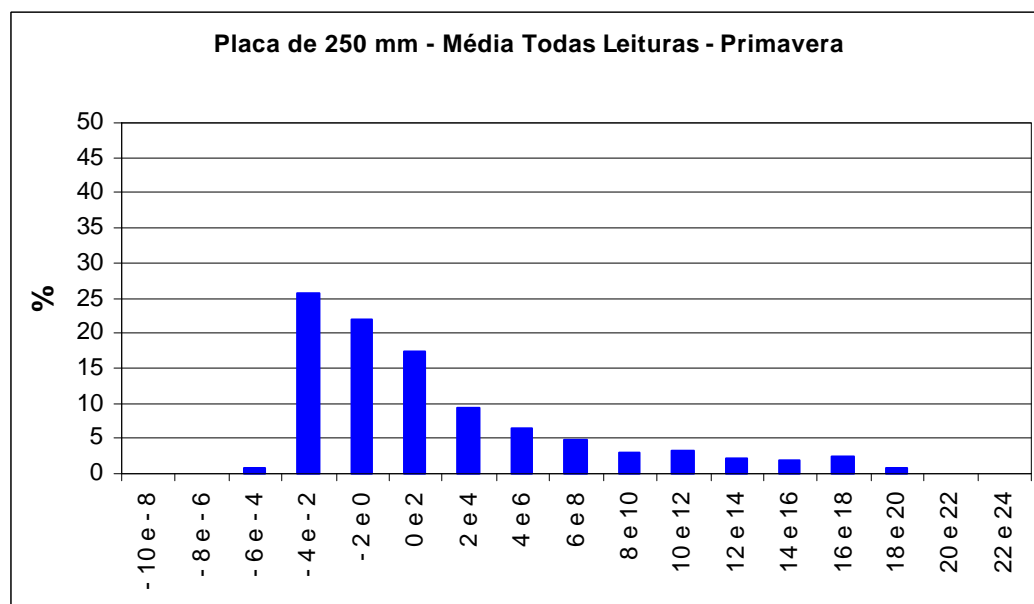


Figura 7.32 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera – placas de 250 mm (todos os dias de leitura)

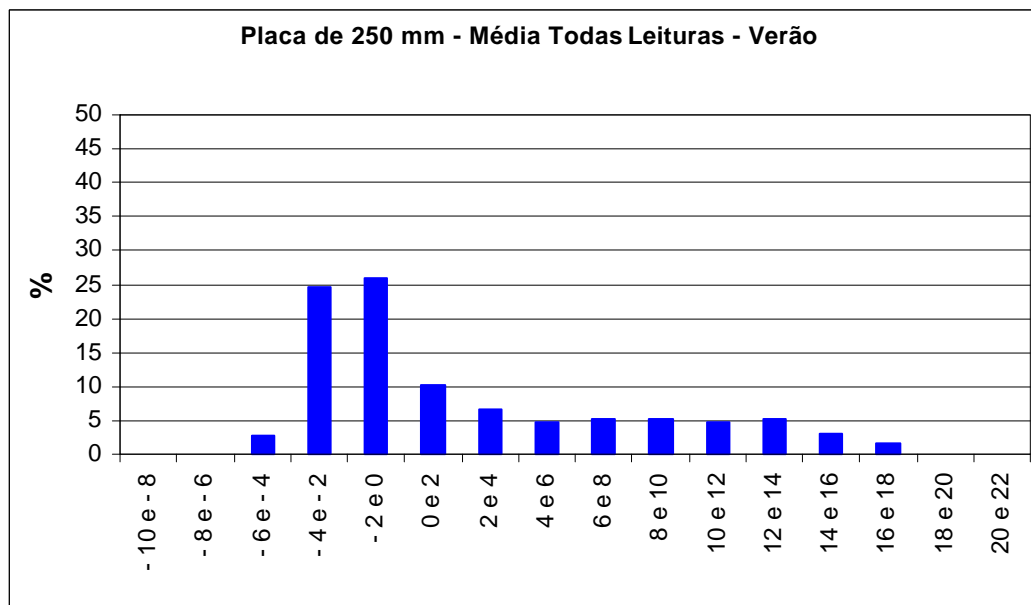


Figura 7.33 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão – placas de 250 mm (todos os dias de leitura)

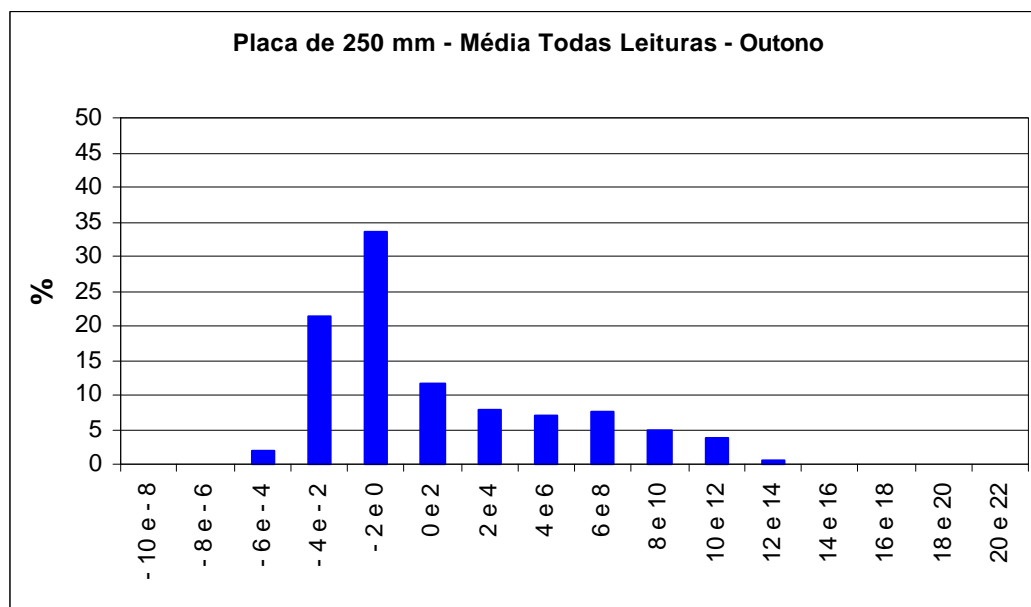


Figura 7.34 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono – placas de 250 mm (todos os dias de leitura)

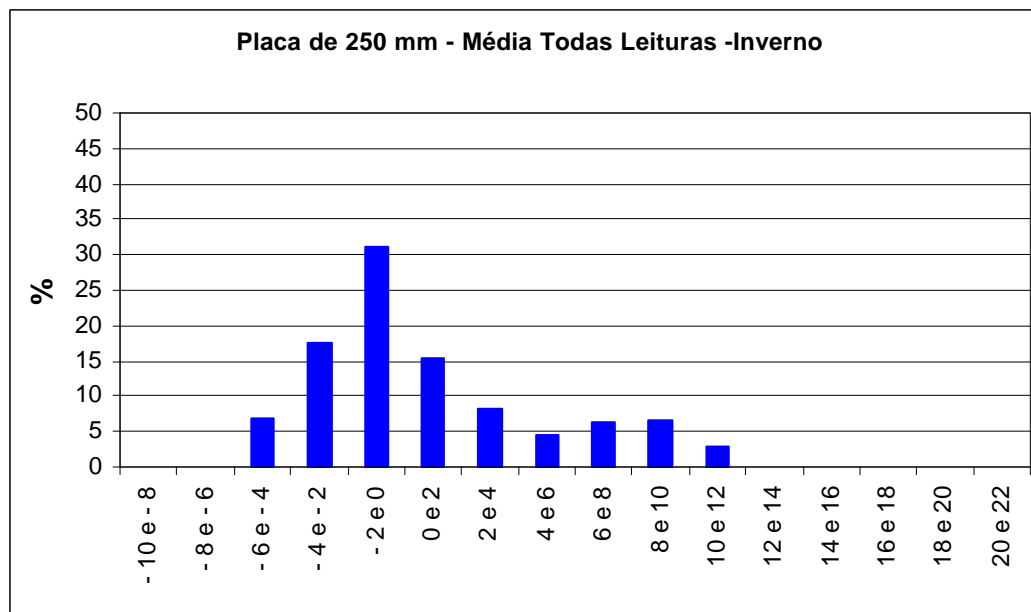


Figura 7.35 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno – placas de 250 mm (todos os dias de leitura)

A Figura 7.36 e 7.37 apresentam os histogramas da média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras realizadas nas placas de 150 mm e 250 mm de espessura.

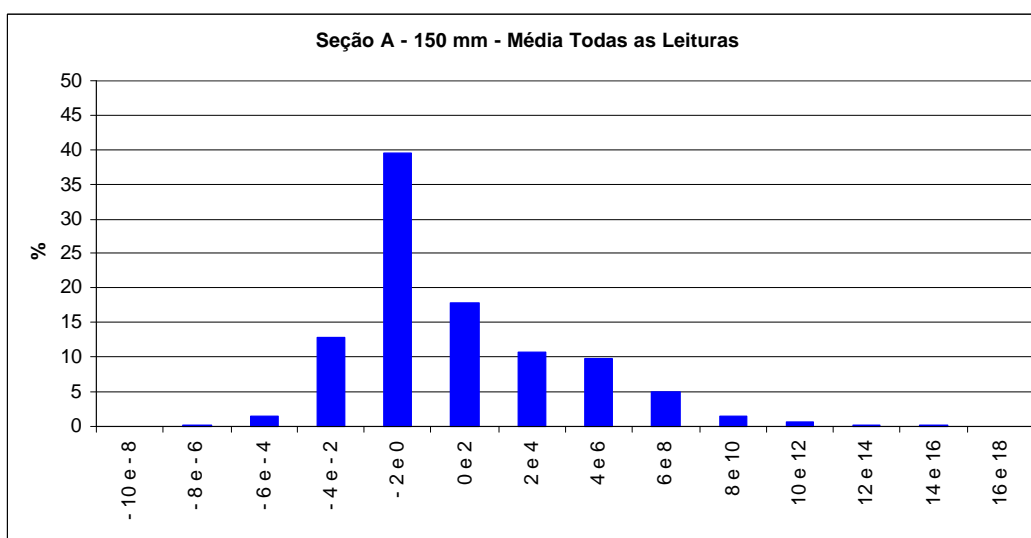


Figura 7.36 Média da freqüência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras – placas de 150 mm

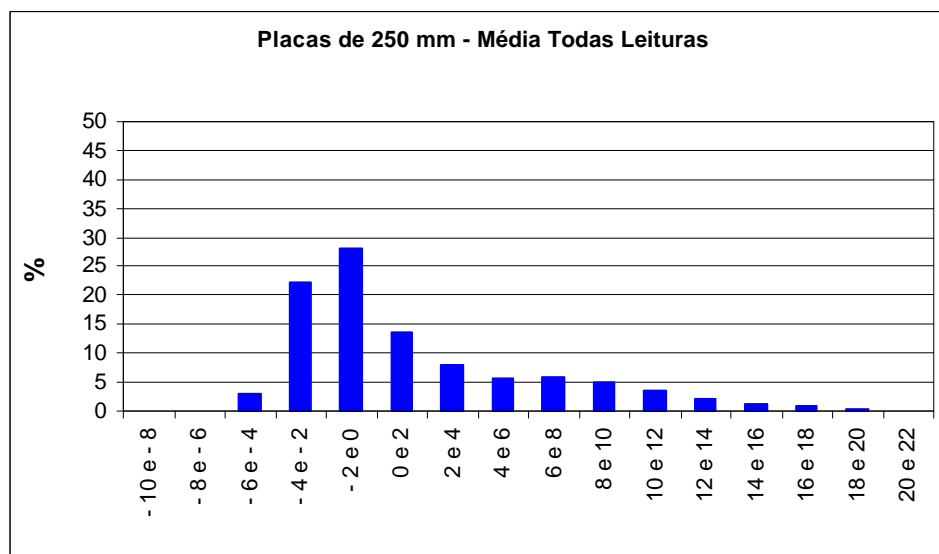


Figura 7.37 Média da frequência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras – placas de 250 mm

A partir da tipificação dos dados para as estações climáticas foi possível obter as frequências de ocorrência dos diferenciais térmicos para cada uma das estações típicas.

As Figuras 7.38 a 7.41 apresentam os histogramas de distribuição da frequência dos diferenciais térmicos para os dias típicos de cada estação para as placas de 150 mm de espessura.

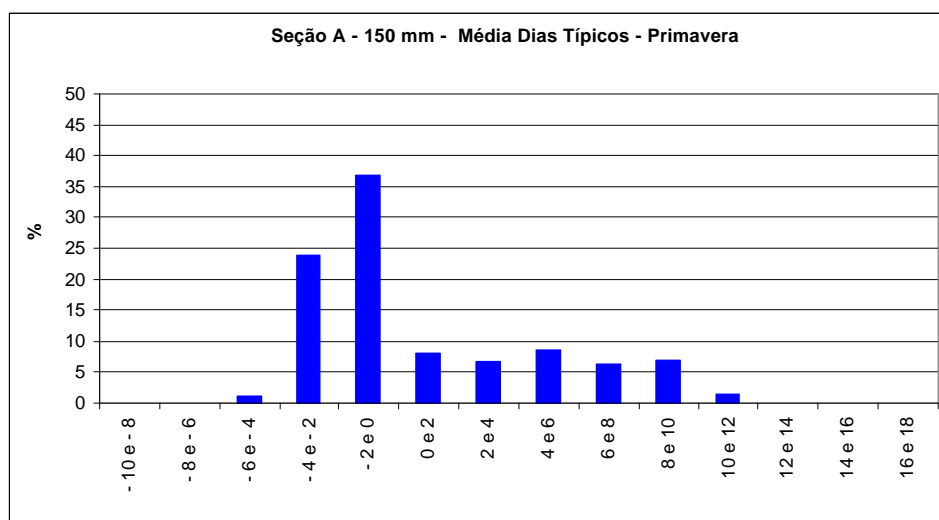


Figura 7.38 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de primavera – placas de 150 mm

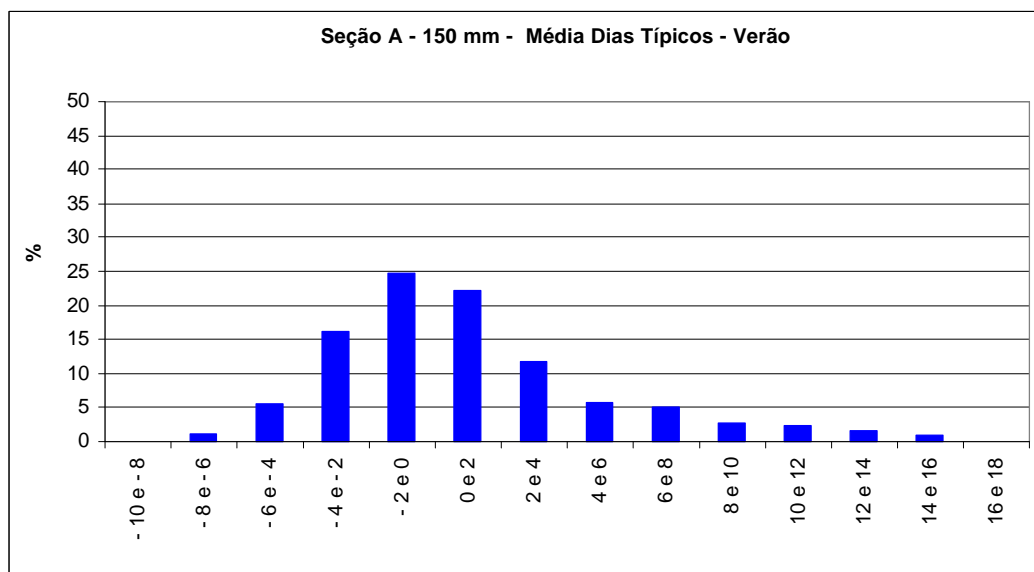


Figura 7.39 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de verão – placas de 150 mm

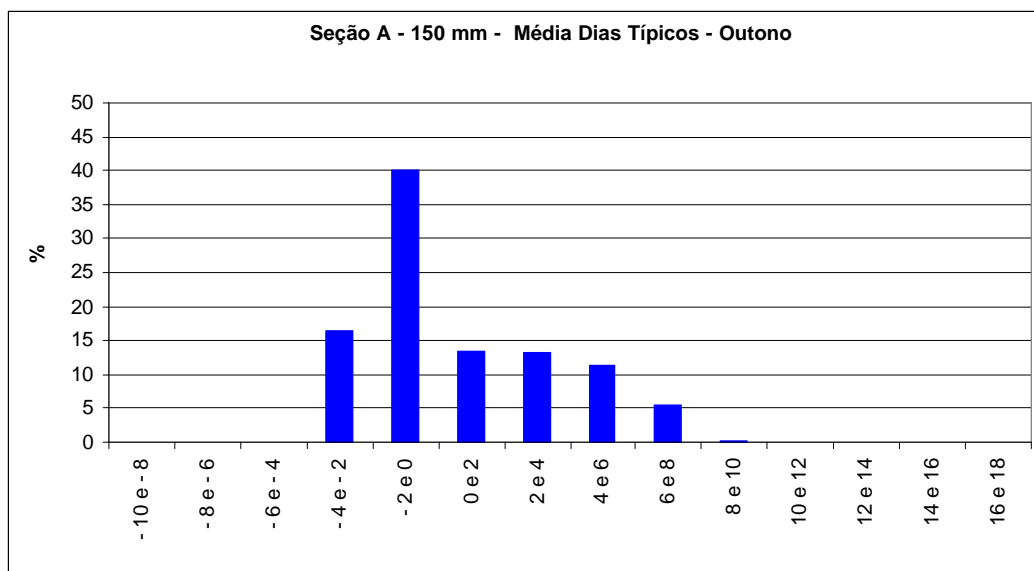


Figura 7.40 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de outono – placas de 150 mm

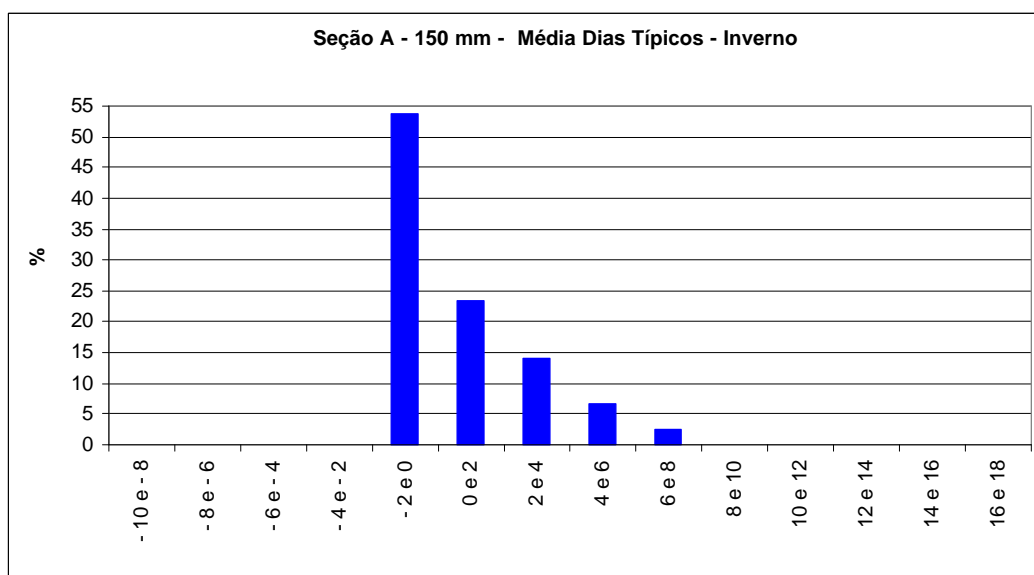


Figura 7.41 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de inverno – placas de 150 mm

As Figuras 7.42 a 7.45 apresentam os histogramas de distribuição da frequência dos diferenciais térmicos para os dias típicos de cada estação para placas de 250 mm de espessura.

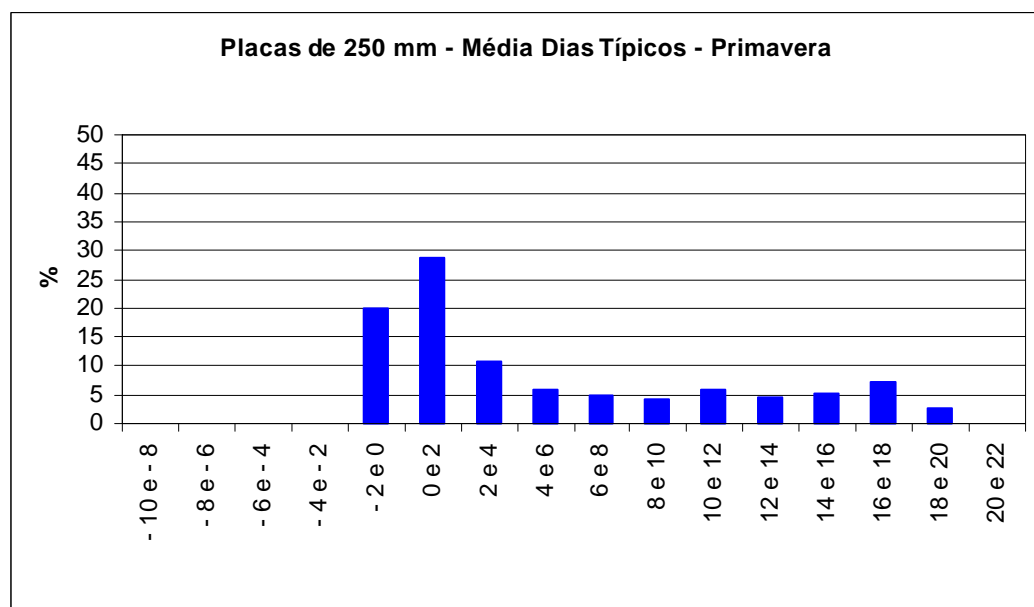


Figura 7.42 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de primavera – placas de 250 mm

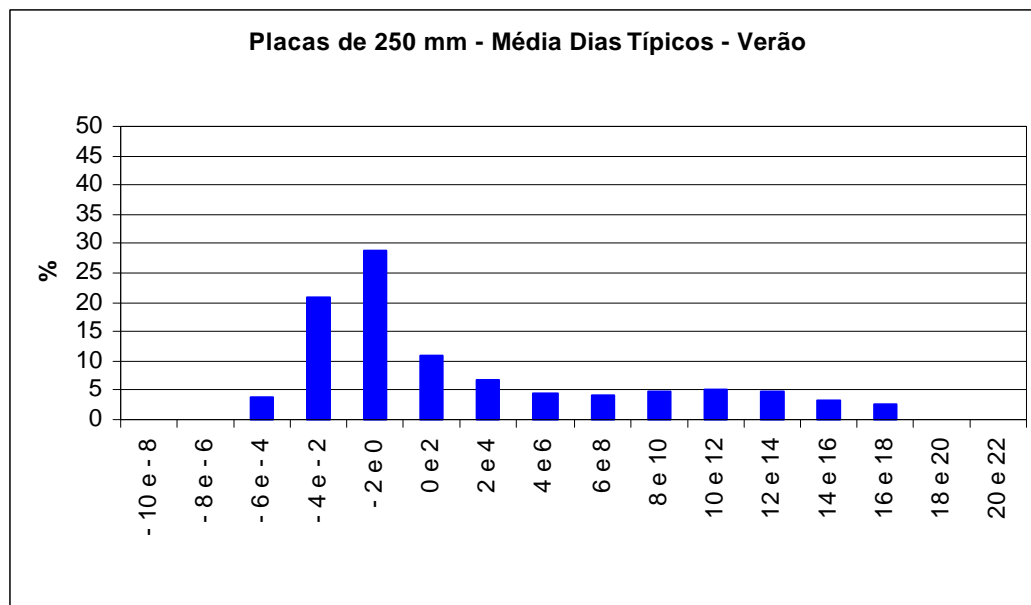


Figura 7.43 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de verão – placas de 250 mm

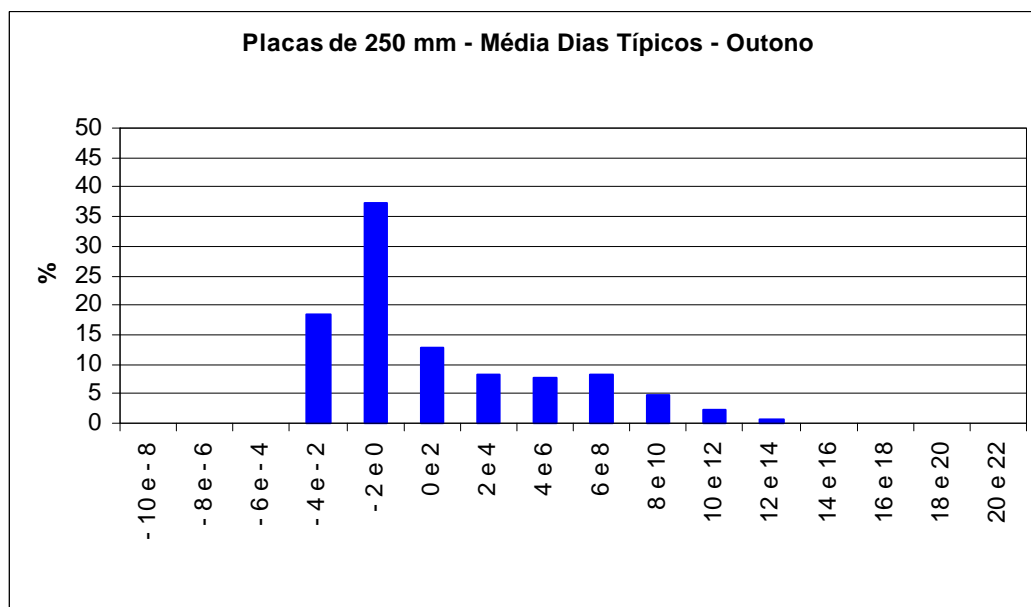


Figura 7.44 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de outono – placas de 250 mm

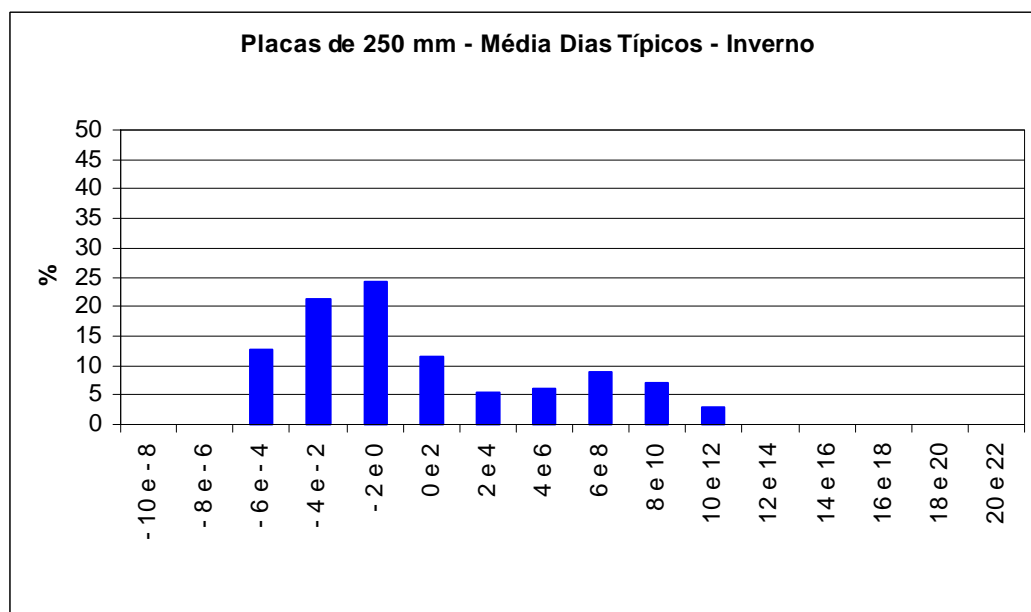


Figura 7.45 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos de inverno – placas de 250 mm

As médias das frequências de ocorrência durante as estações para as espessuras de placa de 150 mm e 250 mm são apresentadas nas Figura 7.46 e 7.47.

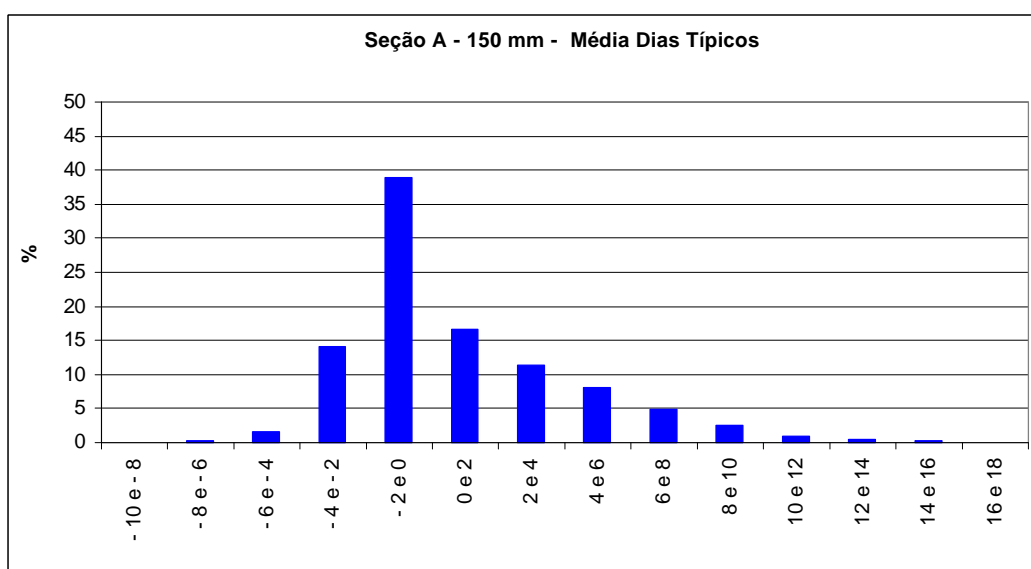


Figura 7.46 Média da frequência de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos – placas de 150 mm

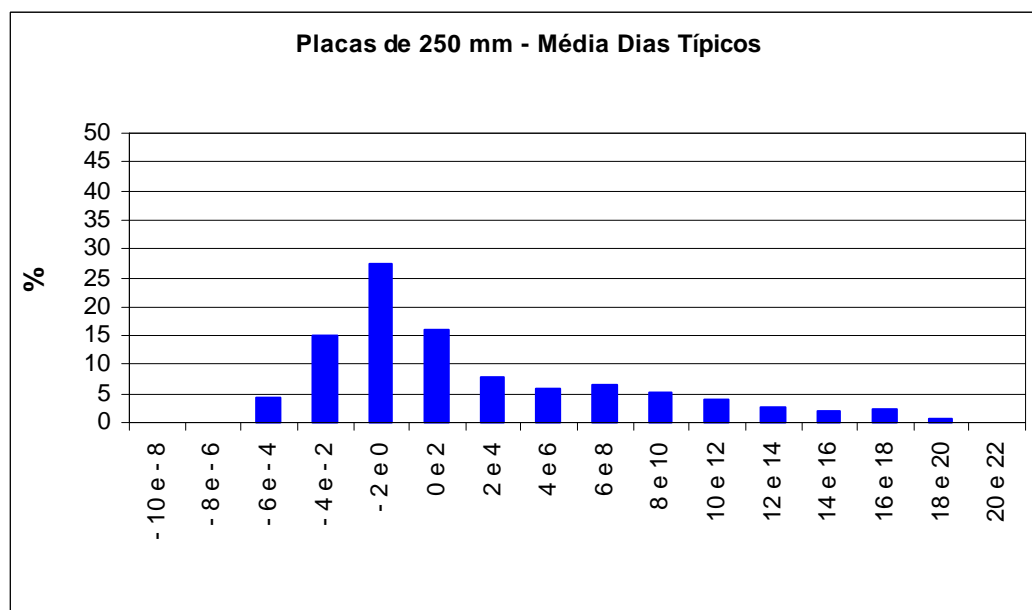


Figura 7.47 Média da frequência de ocorrência de diferenciais térmicos para os dias típicos – placas de 250 mm

A partir dos histogramas apresentados, elaborou-se uma tabela resumo (Tabela 7.17), onde são apresentadas frequências de diferenciais térmicos positivos obtidos durante todas as leituras e durante os dias típicos.

Tabela 7.17 Resumo das frequências de ocorrência de diferenciais térmicos positivos

Espessura Placa	Estação do Ano	Frequência de Ocorrência de Diferenciais Térmicos Positivos (%)		
		Todas as leituras/estação	Dias típicos de uma estação	Média de todas as estações
150 mm	Primavera	52	52	55
	Verão	46	54	
	Outono	60	57	
	Inverno	76	61	
250 mm	Primavera	54	76	55
	Verão	62	56	
	Outono	55	56	
	Inverno	53	48	

Verifica-se que as placas com 150 mm, na tendência desbalanceada do diferencial térmico, encontram-se acima de 60% do tempo positivos, atingindo valores de até 75%, dependendo da estação do ano.

Para as placas de 250 mm foram obtidos diferenciais térmicos positivos em 55% do tempo, sendo alcançados valores de até 60%, dependendo da estação do ano.

Observando-se os valores obtidos por dias típicos de uma estação, verifica-se uma similaridade entre as freqüências obtidas para as placas de 150 mm de espessura durante a primavera e verão e o outono e inverno, apresentando 55% e 60% do tempo os diferenciais positivos, respectivamente.

Os dias típicos de uma estação para as placas de 250 mm de espessura apresentaram durante a primavera 75% do tempo diferenciais positivos, sendo que durante o inverno foram observados em 50% do tempo.

Durante o verão e o outono típicos para as placas de 250 mm observou-se que 55% do tempo apresentou diferenciais térmicos positivos; esta similaridade entre verão e outono ressalta a semelhança entre os limites das estações, neste caso porque os dados típicos de outono foram coletados no início da estação. É importante observar, portanto, que diferenciais térmicos positivos são muito comuns em clima tropical, ocorrendo em mais de 55% do tempo.

Com relação à presença de umidade na base, caso ocorrido para a placa A3, diferenciais térmicos positivos o dia todo ocorrem em 90% do tempo. As Figuras 7.48 a 7.51 apresentam a distribuição da freqüência dos diferenciais térmicos na placa A3 para as todas as estações do ano e a Figura 7.52 apresenta a freqüência média para todas as leituras.

Durante a primavera até o outono verifica-se que aproximadamente 90% do tempo os diferenciais térmicos são positivos, sendo durante o inverno, positivos até 85% do tempo.

A distribuição dos diferenciais térmicos para a placa A3 mostrou que a umidade excessiva na base granular resultou em uma tendência significativa ao aumento dos gradientes térmicos em placas e mesmo que apresente gradiente negativo, este seria insignificante para as análises de tensões nestes casos, pois ocorreram em aproximadamente 10% do tempo.

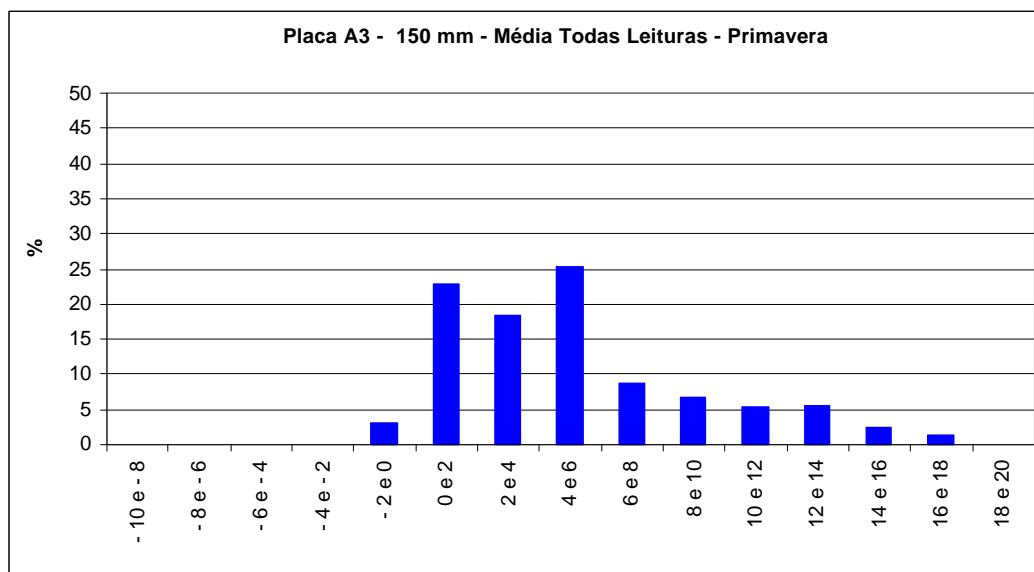


Figura 7.48 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para a primavera – placa A3 (todas as leituras)

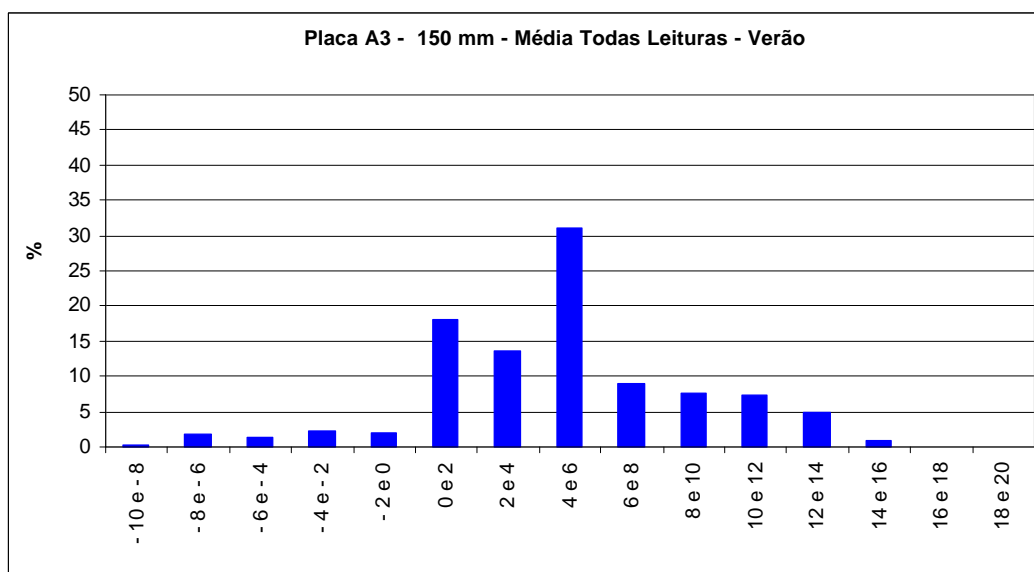


Figura 7.49 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o verão –placa A3 (todas as leituras)

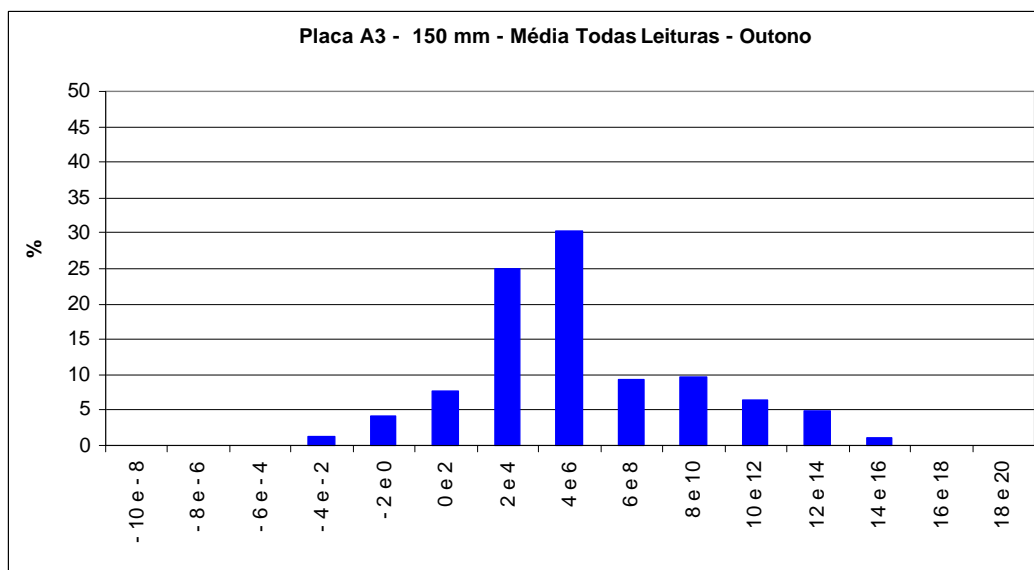


Figura 7.50 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o outono – placa A3 (todas as leituras)

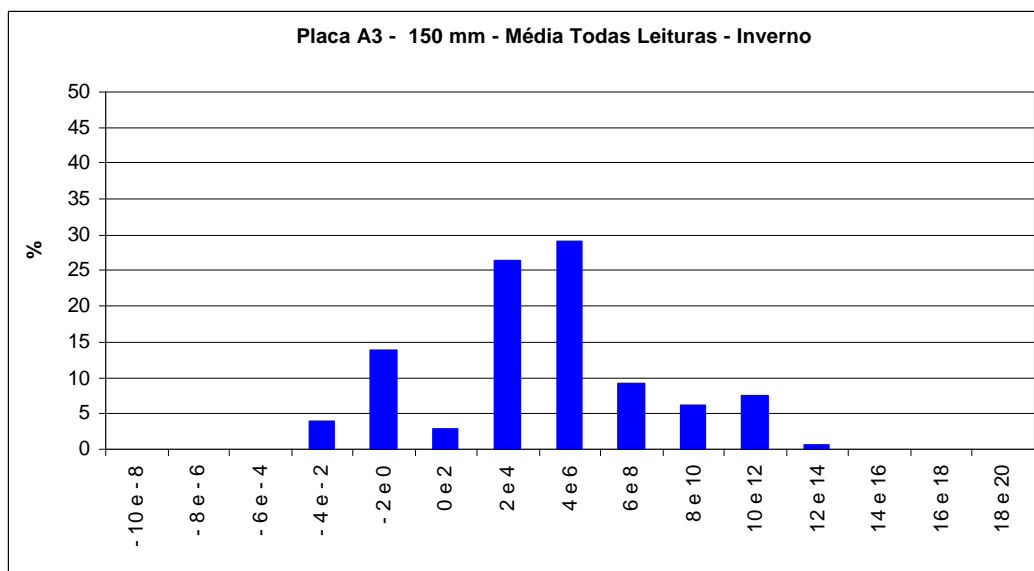


Figura 7.51 Frequências de ocorrência de diferenciais térmicos para o inverno – placa A3 (todas as leituras)

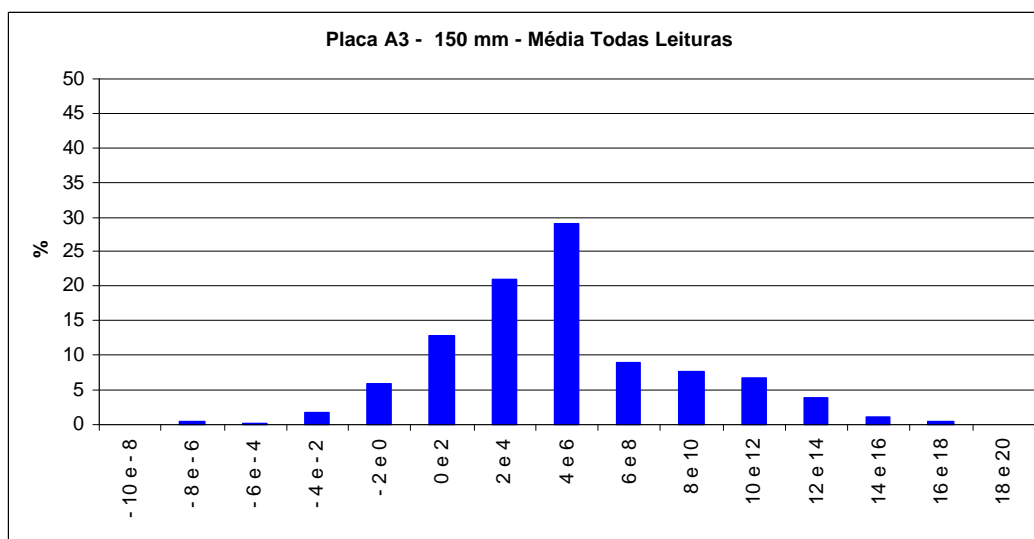


Figura 7.52 Média da frequência de ocorrência de diferenciais térmicos para todas as leituras da placa A3.

8

Análise dos Efeitos do Clima em Ambiente Tropical

Os efeitos do clima em ambiente tropical foram analisados durante os 190 dias de leituras realizadas na pista experimental construída no *campus* da Universidade de São Paulo, em São Paulo e para ressaltar as diferenças entre os efeitos térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland em clima tropical, apresentar-se-ão as comparações entre os resultados obtidos em nove experimentos similares realizados em clima temperado, os modelos de previsão de diferenciais térmicos máximos positivos desenvolvidos para clima tropical, uma previsão dos efeitos da não linearidade dos diferenciais térmicos em pavimentos de CCP e ainda uma análise dos resultados obtidos comparados com o modelo de projeto vigente.

8.1 Confrontação com Resultados em Clima Temperado

A primeira pista experimental construída, onde também foram verificados os efeitos de gradientes térmicos em pavimentos de CCP foi construída em 1.920 na cidade de Bates nos EUA; desde então mais oito pistas experimentais foram construídas e os efeitos dos gradientes térmicos em pavimentos de CCP foram avaliados, porém todas em clima temperado ou em zonas subtropicais. Após setenta e nove anos construiu-se a primeira

pista experimental em clima tropical com o intuito de verificar o efeito dos gradientes térmicos em pavimentos de CCP.

Das nove pistas experimentais construídas em regiões com clima temperado e subtropical, apenas o importante experimento realizado na *AASHO Road Test* (1959) teve grandes proporções, sendo todas estas pistas experimentais descritas no Capítulo 4 deste trabalho.

O Quadro 8.1 apresenta os dados disponíveis dos nove experimentos realizados em clima temperado e também o experimento realizado em clima tropical (presente estudo), onde estão indicadas as temperaturas de topo máxima e mínima, as temperaturas de fundo máxima e mínima, os diferenciais térmicos máximo positivo e negativo e as frequências de ocorrência destes diferenciais térmicos.

A partir do Quadro 8.1, pode-se observar que elevadas temperaturas no topo em pavimentos de CCP, para a primavera e verão, ocorrem tanto em clima tropical quanto em climas temperados. Durante o outono e inverno as temperaturas de topo que ocorrem em clima temperado são bem inferiores, chegando a atingir -25°C , conforme observado no experimento realizado no Estado do Kansas, enquanto que no clima tropical estes valores não são inferiores a 13°C .

A temperatura de topo observada apresentou-se, para o clima tropical e temperado, 10°C acima da temperatura do ar durante a primavera e o verão, enquanto que para o outono e inverno a temperatura de topo observada em clima temperado apresentou-se em média 5°C acima da temperatura do ar, sendo que o presente estudo permitiu observar que este valor está próximo de 10°C .

Quadro 8.1 Resultados em pistas experimentais construídas em climas temperados e a pista experimental em São Paulo

Experimento	Latitude	Espessura mm	Tt, máx °C				Tt, mín °C				Tf, máx °C				Tf, mín °C				DT(+), máx °C				DT(-), máx °C				Frequência DT - %																							
			P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I																				
São Paulo (presente estudo)	23°33'S	150	46				30				20				13				42				29				21				12,5				15				7,5				-2				48	46	40	24
		250	46				30				20				13				35				27				24				15				22,5				10				-5				46	38	45	47
Bates (Older, 1924)	39°43'N	250	-	-	-	13	-	-	-	1,7	-	-	-	1,7	-	-	-	0,6	-	-	-	12	-	-	-	-1	-																							
Arlington (Teller e Sutherland, 1935)	38°53'N	150	31	41	20	10	11	22	10	-2	19	30	14	4	14	22	12	1	12	11	6	5	-3	-3	-2	-3	-																							
		230	29	43	21	7	10	22	11	-4	14	28	13	2	15	26	14	2	15	18	8	6	-5	-4	-3	-6	-																							
Kansas (Ardnt, 1943)	37°31'N	180	-	45	-	-	-	-	-	-25	-				-				-	8	-	-	-				-																							
Minnesota (Swanberg, 1945)	44°59'N	180	-	50	-	-	-	-	-	-23	-				-				-	7,2	-	-	-	-	-	-7	-	68	-	-	-																			
AASHO (AASHO, 1962)	41°20'N	240	-	40	-	-	-	26	-	-	-	31	-	-	-	27	-	-	-	9	-	-	-	-1	-	-	-																							
Flórida (Armaghani et al, 1987)	29°39'N	230	-	38	-	-	-	16	-	-	-	29	-	-	-	21	-	-	-	13	14	10	-	-4	-6	-5	-	54	-	-																				
Chile (Poplete et al, 1988)	33°27'S	220	-	50	-	-	-	16	-	-	-	35	-	-	-	28	-	-	-	9	-	-	-	-13	-	-	-	66	-	-																				
Illinois (Barenberg e Zollinger, 1990)	38°37'N	190	-				-				-				-				7,6				-	-	-	-3	-	-	-	50	59	80	86																	
França (Balay e Groux, 1994)	47°13'N	150	-				-				-				-				12				-	-	-	-	-	-	-	80	-	-	-																	

Quanto às temperaturas de fundo máximas e mínimas, verifica-se que placas mais espessas apresentam uma temperatura de fundo menor que as placas mais delgadas, tanto para clima temperado quanto para clima tropical, conforme anteriormente ressaltado.

As máximas temperaturas de fundo observadas nas pistas experimentais construídas em clima temperado são muito inferiores às obtidas no presente estudo ocorrendo diferenças de aproximadamente 10°C durante a primavera e verão (*Arlington Experimental Farm, AASHO Road Test e Flórida*) e de 15°C durante o outono (*Arlington Experimental Farm*), atingindo até 27°C de diferença durante o inverno (*Bates Road Test*).

As temperaturas de fundo mínimas observadas em climas temperados são similares às obtidas em clima tropical para a primavera, o verão e o outono (*Arlington Experimental Farm, AASHO Road Test, Chile e Flórida*), sendo muito inferiores durante o inverno, alcançando uma diferença de até 15°C (*Bates Road Test*).

É importante ressaltar que valores negativos para a temperatura do ar foram freqüentemente observados durante o inverno em clima temperado, quando valores próximos a -30°C foram registrados durante o experimento realizado em Minnesota (Swanberg, 1945), enquanto que a mínima temperatura do ar observada durante os dias de leitura de inverno em São Paulo foi sempre próxima dos 10°C, ocorrendo isoladamente dias com temperaturas entre 3°C e 5°C (17/07/00 a 24/07/00) durante a madrugada.

Os diferenciais térmicos positivos máximos observados em clima temperado foram inferiores àqueles observados durante o experimento realizado em clima tropical, onde foram obtidos valores extremos de diferenciais térmicos positivos máximos durante o verão de 22,5°C (placas de 250 mm, diferencial não retificado para a espessura total), contra valores extremos não superiores a 18°C (*Arlington Experimental Farm - placas de 230 mm*).

A média do diferencial térmico positivo máximo obtido em clima tropical durante a primavera/verão, foi de 15°C e 17°C para placas de 150 mm e 250 mm, respectivamente, enquanto que freqüentemente observaram-se valores próximos de 10°C durante os nove experimentos realizados em clima temperado.

Não são apenas valores extremos que confirmam a diferença entre gradientes térmicos em clima temperado e tropical; algumas outras diferenças são marcantes, dependendo da proporção do tempo ao longo do ano, quando gradientes negativos e positivos ocorrem.

Outro aspecto relevante para destacar a diferença entre os valores de diferenciais térmicos obtidos em clima temperado e tropical é a freqüência com que ocorrem diferenciais térmicos negativos. Durante as análises dos dados do presente estudo, conforme apresentado no Capítulo 7, verificou-se que a média da freqüência de diferenciais térmicos negativos para todas as estações do ano não foi superior a 45% do tempo.

Em clima temperado e subtropical o diferencial térmico durante o verão foi 60% do tempo negativo durante o experimento realizado em Minnesota, 54% do tempo durante o experimento realizado na Flórida, 66% do tempo durante o experimento realizado no Chile, de 40% a 59% do tempo durante o experimento realizado em Illinois, e 80% do tempo durante o experimento realizado na França; em clima tropical o diferencial térmico foi negativo ocorreu em 38% do tempo.

Durante o inverno em clima temperado, o diferencial térmico foi negativo 86% do tempo (experimento realizado em Illinois), enquanto que no presente estudo observou-se que o diferencial térmico é negativo 47% do tempo para placas de 250 mm e 24% do tempo para placas de 150 mm (apenas durante o inverno).

Os diferenciais térmicos negativos obtidos em clima tropical foram, em valores absolutos, 3,5 (inverno) a 4,5 (verão) vezes inferiores aos diferenciais térmicos positivos para placas de 150 mm e de 2,0 a 3,5 vezes menores para placas de 250 mm. Isto aponta para uma preocupação menos importante na consideração de gradientes negativos para o clima tropical, o que não ocorre no clima temperado. De fato, gradientes térmicos negativos são bastante importantes em climas temperados, conforme se verifica no critério da AASHTO (1998).

Quanto à distribuição da temperatura ao longo da espessura da placa, verificou-se que a mesma apresenta-se não linear durante 95% do tempo para o outono e o inverno tropical e 60% do tempo durante a primavera e o verão tropical, prevalecendo portanto diferenciais térmicos não lineares, sendo que situações particulares, onde um diferencial térmico linear poderia servir como uma confiável aproximação, não são freqüentes. Em clima temperado, durante a *Arlington Experimental Farm* e durante o experimento da Flórida registrou-se a distribuição da temperatura ao longo da espessura da placa e constatou-se que foi na maior parte do tempo não linear.

Durante a *Arlington Experimental Farm* foi verificado que a umidade presente nas camadas inferiores do pavimento alteram a temperatura de fundo na placa, da mesma maneira como se verificou no presente estudo, conforme apresentado no Capítulo 7.

Quanto ao número de horas de insolação, verificou-se que a mesma exerce uma influência importante na temperatura de topo em clima tropical, também verificado em clima temperado (*Arlington Experimental Farm*, Kansas e Flórida). Observou-se durante o experimento da Flórida que a taxa de variação da temperatura do pavimento é mais elevada durante o dia, quando existe a influência dos raios solares, que durante a noite, conforme também foi verificado em clima tropical.

A ocorrência de uma chuva durante o dia, que no caso de São Paulo, seria uma forte chuva abrupta, é comum durante o verão e poderia ser uma particularidade mais ou menos significativa no projeto, dependendo do regime de chuvas da região, conforme foi verificado durante o experimento da Flórida, onde a ocorrência de uma chuva repentina e passageira (simulada), mas com uma duração representativa, durante os horários próximos à ocorrência do pico diferencial térmico positivo, podem gerar tensões na placa de magnitudes muito superiores que aquelas que ocorreriam em dias claros e ensolarados.

A partir das confrontações dos resultados obtidos em clima tropical e clima temperado, pode-se concluir que as diferenças são notórias e importantes, ainda mais quando os métodos de dimensionamento utilizados no Brasil foram desenvolvidos em e para clima temperado e ainda, se considerarmos o método de dimensionamento da AASHTO (1998), que contempla o efeito térmico em pavimentos de concreto refere-se a um método calibrado em regime temperado (baseado no *AASHTO Road Test*, o qual tem seus valores de temperatura apresentados no Quadro 8.1), empregando modelos empíricos para previsão do diferencial térmico também calibrados no mesmo regime climático, o que leva a crer, após todos os experimentos realizados, que aqueles modelos não seriam adequados para o dimensionamento de pavimentos de concreto em ambiente tropical.

8.2 Modelo de Previsão de Diferenciais Térmicos Positivos para a Área de Estudo

Ao longo dos 190 dias de leituras foi possível observar que a temperatura na superfície do pavimento de concreto de cimento Portland e os diferenciais térmicos absolutos apresentaram variações ao longo das estações climáticas, sendo verificada a possibilidade de agrupamento entre a

primavera e o verão e entre o outono e o inverno, conforme pôde ser verificado no Capítulo 7.

A análise destes dados permitiu o desenvolvimento de modelos empírico-estatísticos para a previsão da temperatura de topo máxima e do diferencial térmico máximo positivo em placas de pavimento de CCP.

Conforme pôde ser verificado no Capítulo 7, o diferencial térmico positivo apresentou valores muito mais elevados, atingindo freqüentemente 17°C para placas de 250 mm, que aqueles apresentados pelos diferenciais térmicos negativos, que atingiram freqüentemente -5°C para placas de 250 mm, sendo portanto a condição mais crítica para o empenamento dos pavimentos de concreto.

Dentre as inúmeras informações obtidas da estação meteorológica do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) na Cidade Universitária em São Paulo, as seguintes foram consideradas fundamentais para a elaboração dos modelos de previsão: o número de horas de insolação, expresso pelo número de horas de sol (ou insolação) entre o nascente e poente (NHI), a temperatura atmosférica (T_{ar}), a umidade relativa do ar (H) e a velocidade média do vento (v_v). Sendo assim considerou-se, a priori, que tais que variáveis climáticas seriam as principais responsáveis pelos estados térmicos verificados em pavimentos de concreto de cimento Portland.

Os modelos empíricos para previsão de temperatura de topo máxima e diferenciais térmicos positivos máximos obtidos para clima tropical a seguir apresentados, são confrontados com o modelo também empírico proposto por Kuo (1998) para clima temperado, sendo este modelo utilizado no método dimensionamento de pavimentos de concreto da AASHTO em sua versão suplementar de 1.998 para estimar o diferencial térmico positivo em pavimentos de CCP.

8.2.1 Modelos para previsão da temperatura de topo

Para a elaboração dos modelos de previsão de temperaturas de topo máximas buscou-se estabelecer relações estatísticas correlacionando dados de temperatura de topo medidos nas placas de CCP e dados oriundos da estação meteorológica do CTH, pautando-se pelos seguintes critérios de seleção de dados:

- todas as medidas referem-se ao horário solar independentemente da estação ou época do ano (os horários oficiais de verão no país foram de 03/10/1.999 a 27/02/2.000 e de 08/10/2.000 a 18/02/2.001);
- o número de horas de insolação (NHI) a ser considerado teria como referência o período entre o amanhecer e às 15 horas;
- a temperatura atmosférica (T_{ar}) seria a média entre a máxima e a mínima verificada entre as 9 horas e as 15 horas do dia.
- a velocidade média do vento (v_v) seria calculada para o período entre 9 horas e 15 horas do dia;
- a umidade relativa do ar (H) seria aquela aferida às 15 horas (mais próxima do evento);
- a ocorrência de chuva após as 9 horas eliminaria tal dia da análise global.

Ainda, sabendo-se que o NHI e a temperatura atmosférica seriam variáveis chaves para o processo de elevação da temperatura na superfície, apenas as datas em que o CTH coletou dados foram levadas a termo (o CTH não processa medidas em sua estação meteorológica no *campus* aos sábados e

domingos, além de ter paralisado as leituras de abril a meados de junho de 2.000).

Uma análise preliminar dos dados antes do tratamento estatístico permitiu verificar não existir relação direta entre a velocidade média de ventos aferida pelo CTH e os resultados em pista uma vez que tal velocidade praticamente não variava, estando entre 0,8 m/s e 1,1 m/s durante o horário de interesse, em qualquer época do ano; assim sendo, esta variável foi desconsiderada. Portanto a temperatura de topo de pavimentos de concreto de cimento Portland no local de análise seria dependente do número de horas de insolação, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar.

Após inúmeros testes e formulações de regressões lineares múltiplas, foi possível obter os seguintes modelos para a previsão da temperatura de topo em placas de concreto, para o ano cheio, para primavera/verão e para outono/inverno:

Ano Cheio:

$$T_{T,máx} = -6,00 + 1,00 \cdot NHI + 1,37 \cdot T_{ar} + 0,064 \cdot H \quad [8.1]$$

onde:

$T_{T,máx}$ = temperatura de topo máxima (°C);

NHI = número de horas de insolação (h);

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

H = umidade relativa do ar (%).

Este modelo apresentou, para 142 conjuntos de dados, um erro padrão de 3,7°C e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,73.

Primavera/verão:

$$T_{T,máx} = 11,94 + 1,01 \cdot NHI + 0,92 \cdot T_{ar} - 0,03 \cdot H \quad [8.2]$$

Este modelo apresentou, para 97 conjuntos de dados, erro padrão de 2,8°C e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,79.

Outono/inverno:

$$T_{T,máx} = 14,3 + 0,2 \cdot NHI + 0,75 \cdot T_{ar} - 0,07 \cdot H \quad [8.3]$$

Este modelo apresentou, para 39 conjuntos de dados, erro padrão de 2,0°C e coeficiente de determinação (R^2) de 0,70.

Verificou-se, após uma análise de sensibilidade, que o número de horas de insolação representa um incremento de 7% na temperatura de topo durante a primavera/verão e de apenas 1,5% durante o outono/inverno. O efeito combinado do número de horas de insolação e da temperatura do ar, para uma variação de 1°C na temperatura do ar, representa um incremento na temperatura de topo de 20% para a primavera/verão e de 7% durante o outono/inverno, ou seja, o número de horas de insolação é um parâmetro muito mais representativo durante os meses quentes.

Com relação à umidade relativa do ar, verifica-se que, embora pouco significativa para a temperatura de topo, sempre atua contrariamente a seu incremento em até 2%, tanto para a primavera/verão, quanto para outono/inverno.

8.2.2 Modelos de Previsão do Diferencial Térmico Máximo

Para a modelagem estatística dos diferenciais térmicos máximos positivos, considerou-se que os mesmos seriam dependentes dos seguintes parâmetros e fatores:

- da temperatura máxima de topo verificada no mesmo instante;
- do coeficiente de transmissão térmica do concreto de cimento Portland; no entanto, como supostamente os concretos empregados nas várias seções de pavimentos eram idênticos (mesmo material e traço), este parâmetro foi mantido como constante;
- da espessura da placa de CCP;
- da presença de umidade no fundo da placa (H_f) devido à má drenagem do pavimento, como verificado com a placa A3 (Capítulo 7).

Da mesma forma que para a obtenção do modelo de previsão para a temperatura de topo máxima, inúmeros testes de funções de correlação foram realizados, tendo sido os modelos para a previsão do diferencial térmico positivo máximo, para o ano cheio, para primavera/verão e para outono/inverno, descritos conforme apresentado na seqüência.

Previsão de Gradientes para ano cheio e possível umidade de fundo (tomar $H_f = 1$ neste caso; caso contrário $H_f = 0$)

$$DT+ = -7,883 + 0,379 \cdot T_{T,máx} + 0,018 \cdot h + 2,236 \cdot H_f \quad [8.4]$$

onde:

$DT +$ = diferencial térmico (°C);

$T_{T,máx}$ = temperatura de topo máxima (°C);

h = espessura da placa de CCP (mm);

H_f = umidade de fundo (1 para a ocorrência e 0 para não ocorrência).

Este modelo apresentou, para 107 conjuntos de dados, erro padrão de 2,6°C e R^2 de 0,56.

Devido ao baixo coeficiente de determinação apresentado por este modelo, os dados foram trabalhados em dois períodos climáticos, primavera/verão e outono/inverno, almejando-se com tal segregação a obtenção de melhores modelos de correlação, conforme segue.

Previsão de Gradientes para primavera/verão e possível umidade de fundo (tomar $H_f = 1$ neste caso; caso contrário $H_f = 0$)

$$DT+ = -18,83 + 0,542 \cdot T_{T,máx} + 0,037 \cdot h + 4,165 \cdot H_f \quad [8.5]$$

Este modelo apresentou erro padrão de 1,9°C e R^2 de 0,80 para 67 conjuntos de observações.

Previsão de Gradientes para outono/inverno sem umidade de fundo

$$DT+ = -6,534 + 0,509 \cdot T_{T,máx} + 0,0013 \cdot h \quad [8.6]$$

Este modelo apresentou, para 38 conjuntos de observações, erro padrão de 1,9°C e R^2 de 0,71.

A partir dos modelos de previsão do diferencial térmico máximo positivo, pode ser inferido que a espessura da placa é mais relevante durante os períodos quentes (primavera/verão) em comparação com os períodos frios (outono/inverno).

Também pôde ser verificado que modelos que consideram a presença de umidade no fundo da placa (bases saturadas) são mais relevantes para estações mais úmidas em clima tropical (primavera/verão), e não para estações secas (outono/inverno).

8.2.3 Modelo de previsão do diferencial térmico positivo proposto por Kuo

Kuo (1998) propôs modelos para previsão do diferencial térmico positivo e negativo em placas de pavimento de concreto em função da espessura da placa, média anual da temperatura do ar, precipitação anual e média anual da velocidade do vento. Os dados climatológicos utilizados pelo autor para a elaboração do modelo foram provenientes de 14 diferentes locais nos Estados Unidos da América em clima temperado, sendo o modelo proposto por Kuo representado pela expressão:

$$DT+ = 0,962 - \frac{52,181}{h} + 0,341 \cdot v_v + 0,184 \cdot T_{ar} - 0,00836 \cdot P \quad (R^2 = 0,84) \quad [8.7]$$

onde:

$DT+$ = diferencial térmico (°F);

h = espessura da placa (polegadas);

v_v = média anual da velocidade do vento (mph);

T_{ar} = temperatura atmosférica (°F);

P = precipitação anual (polegadas).

Foram realizadas análises de sensibilidade do modelo proposto por Kuo (1998), variando-se a espessura da placa, a velocidade do vento, a temperatura do ar e a precipitação. As Figuras 8.1 a 8.4 apresentam a variação do diferencial térmico em função dos parâmetros mencionados.

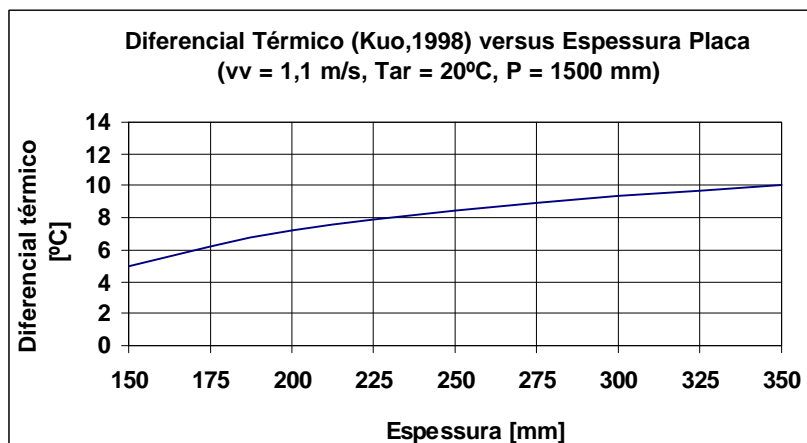


Figura 8.1 Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da espessura da placa ($T_{ar} = 20^\circ\text{C}$, $P = 1500$ mm e $v_v = 1,1$ m/s)

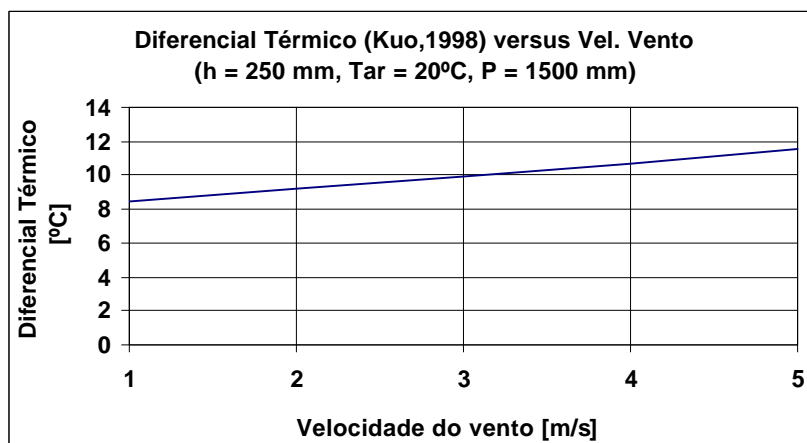


Figura 8.2 Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da velocidade do vento ($h=250$ mm, $T_{ar} = 20^\circ\text{C}$ e $P = 1500$ mm)

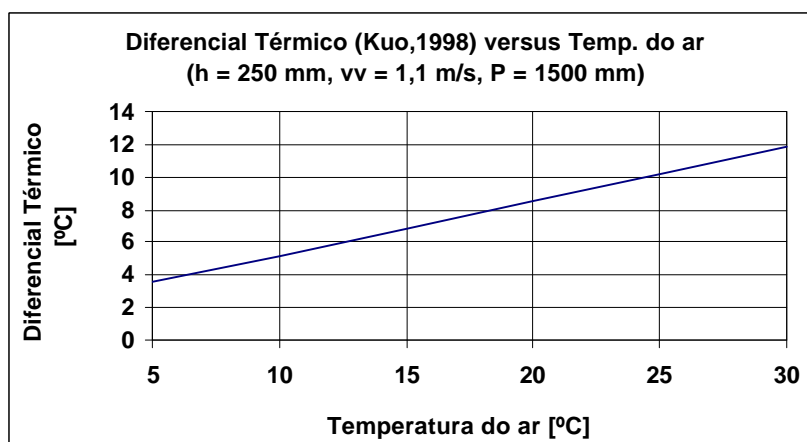


Figura 8.3 Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da temperatura do ar ($h=250$ mm, $v_v = 1,1$ m/s e $P = 1500$ mm)

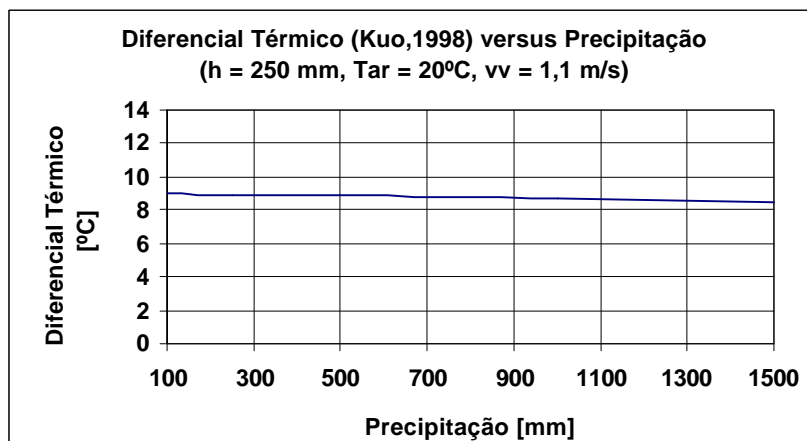


Figura 8.4 Sensibilidade do $DT+$ (modelo de Kuo, 1998) à variação da precipitação ($h=250$ mm, $v_v = 1,1$ m/s e $T_{ar} = 20^\circ\text{C}$)

Verifica-se, a partir das Figuras 8.1 a 8.4, que o modelo apresentado por Kuo (1998) é muito mais sensível à variação da temperatura do ar e, em contrapartida, praticamente insensível à variação da precipitação.

8.2.4 Modelo proposto *versus* modelo de Kuo

A partir dos modelos para previsão de diferenciais térmicos positivos máximos, propostos neste trabalho, foram realizadas comparações com o modelo proposto por Kuo (1998), considerando as condições climáticas apresentadas pela área de estudo, ou seja, em clima tropical de altitude.

Para as análises realizadas foram consideradas as espessuras de placa utilizadas na pista experimental EPUSP (150 mm e 250 mm) e também a presença de umidade no fundo da placa durante a primavera/verão (considerada no modelo proposto neste trabalho).

As Figuras 8.5 a 8.10 apresentam graficamente os resultados obtidos, sendo que os parâmetros climáticos considerados foram aqueles observados na área de pesquisa, tendo como faixas de variação:

- T_{ar} = de 5°C a 40°C para o ano cheio, de 20°C a 40°C para a primavera/verão e de 5°C a 25°C para o outono/inverno;
- NHI = 6 horas (invariável durante as análises);
- H = 70% para o ano cheio, 80% para a primavera/verão e 40% para o outono/inverno;
- v_v = 1,1 m/s (invariável durante as análises);
- P = 1.500 mm para o ano cheio, 1.200 mm para primavera/verão e 300 mm para outono/inverno.

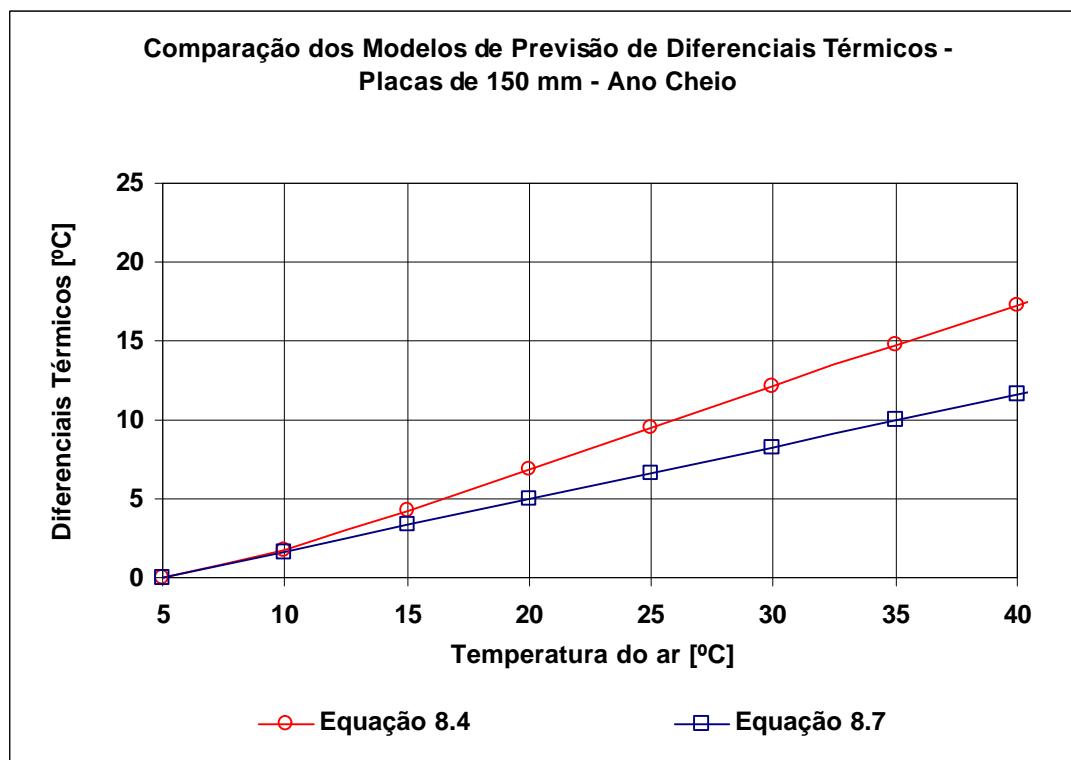


Figura 8.5 Comparação entre o modelo de previsão de proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm e ano cheio

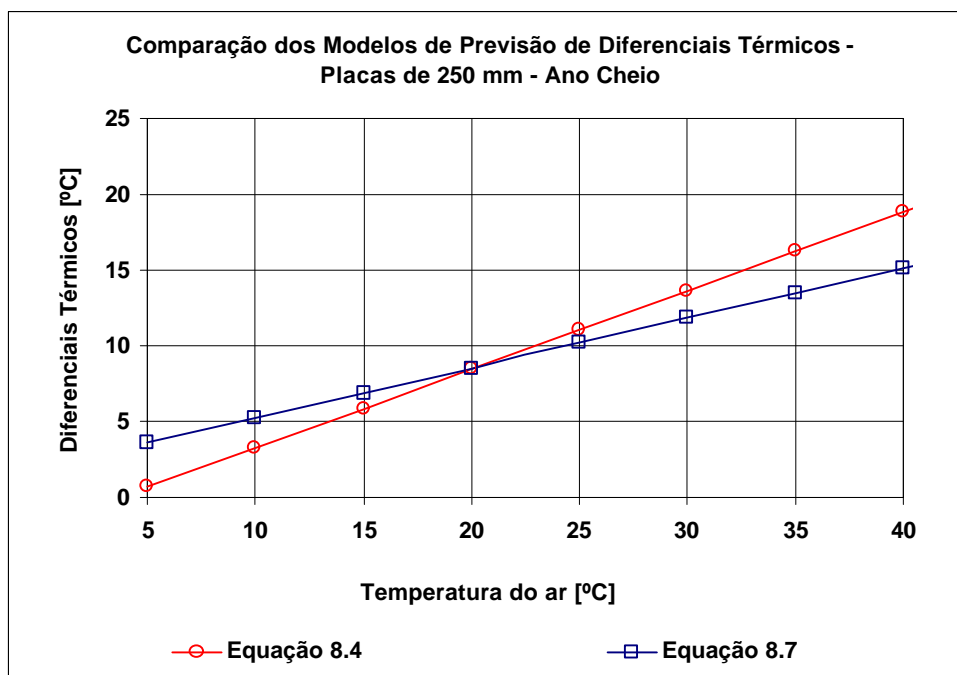


Figura 8.6 Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm e ano cheio

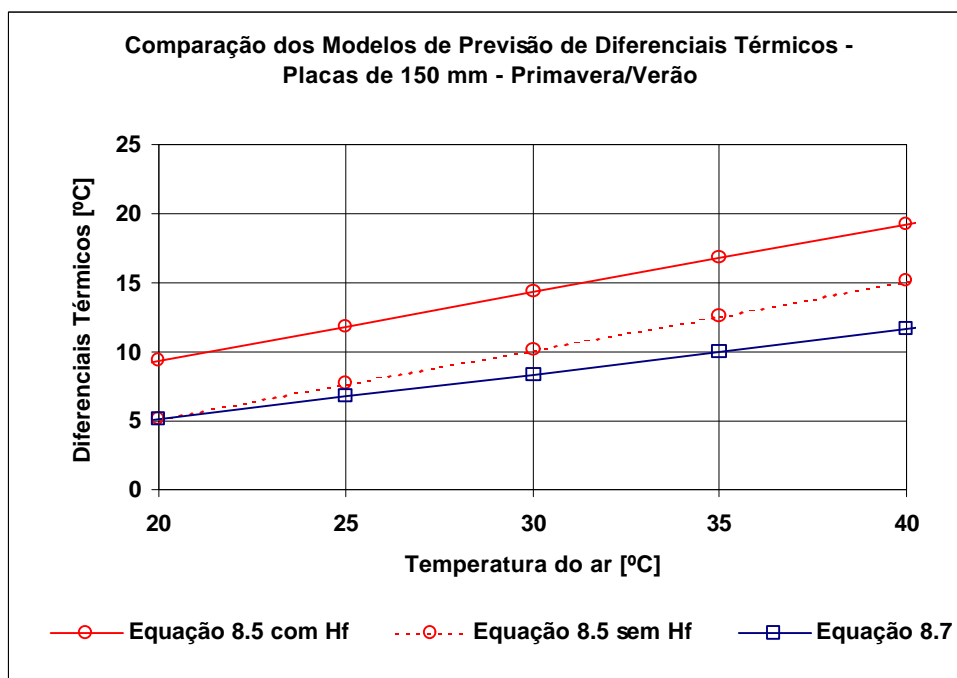


Figura 8.7 Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm, primavera/verão, com e sem presença de umidade de fundo

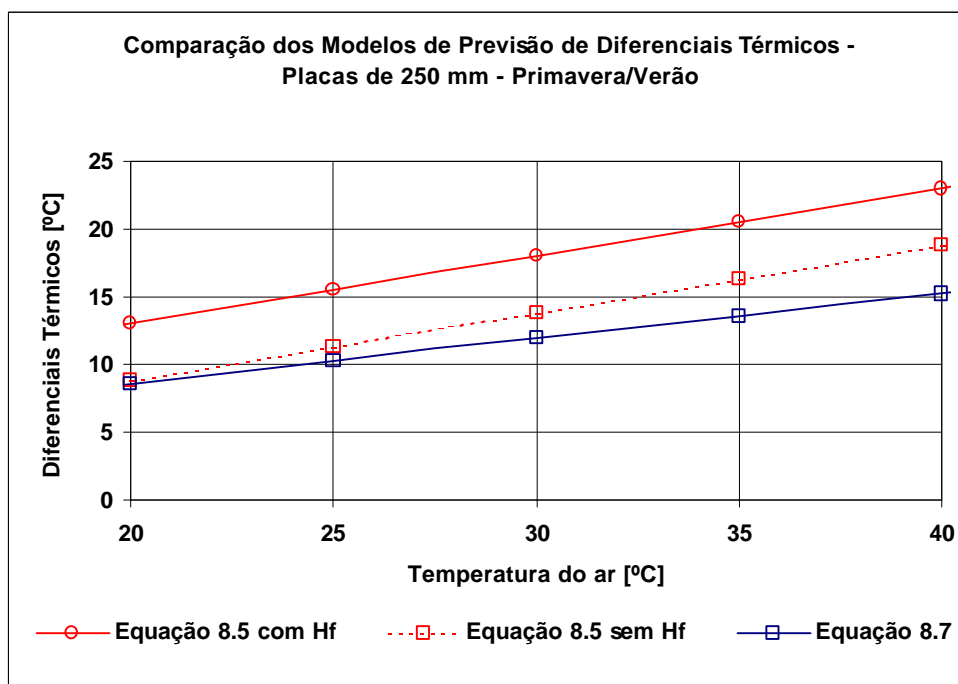


Figura 8.8 Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm, primavera/verão, com e sem presença de umidade de fundo

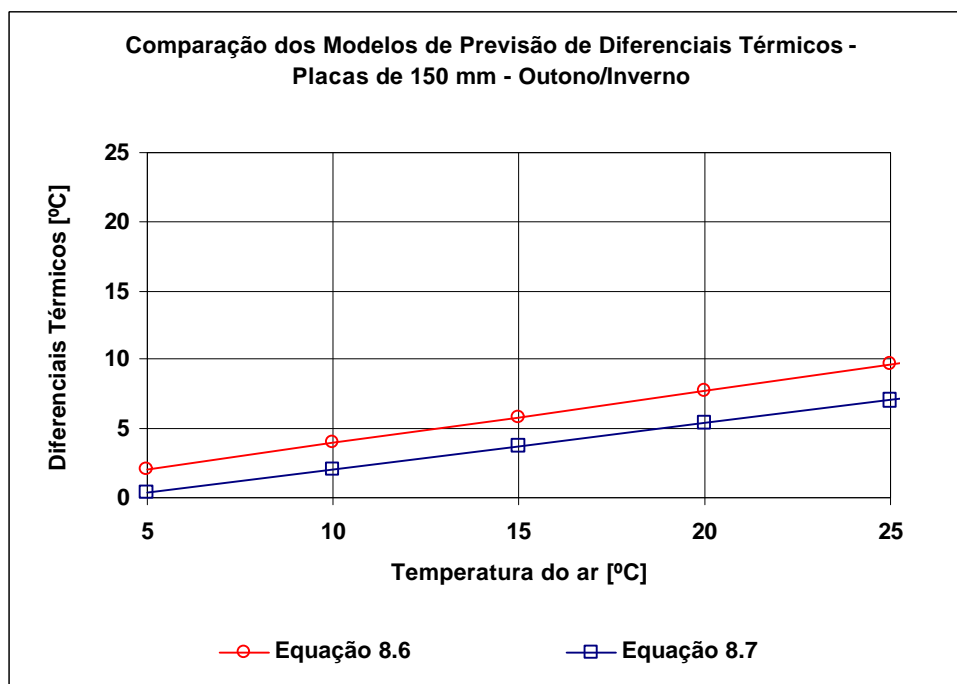


Figura 8.9 Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 150 mm, outono/inverno

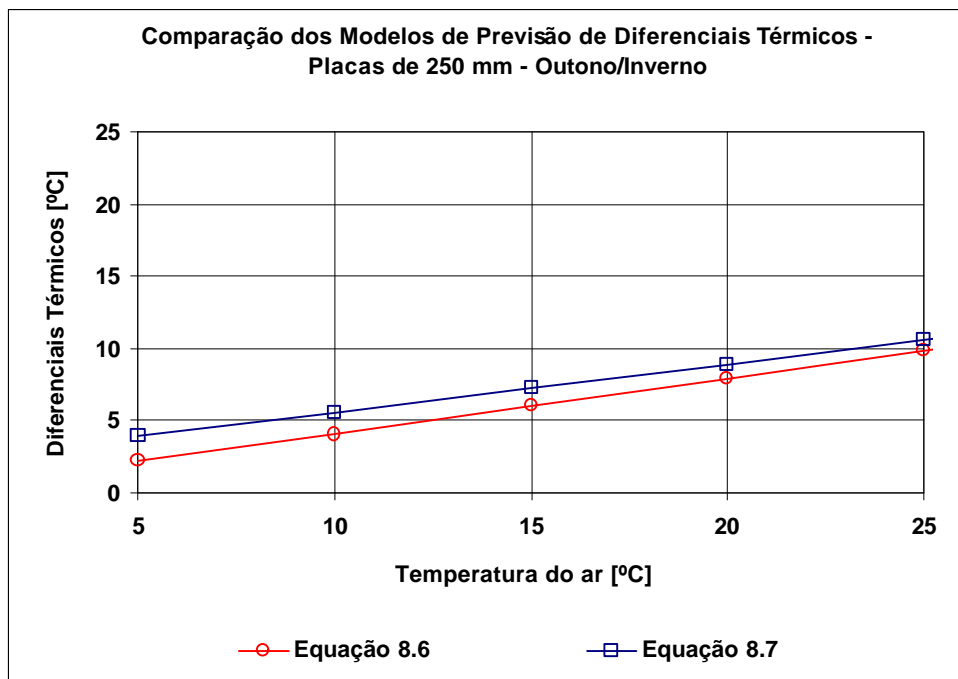


Figura 8.10 Comparação entre o modelo de previsão proposto e o modelo de Kuo (1998) - para placas de 250 mm, outono/inverno

Para a previsão do diferencial térmico positivo máximo para o ano todo, sem presença de umidade no fundo da placa, o modelo proposto na Equação 8.4 apresenta, para placas com espessuras de 150 mm (Figura 8.5), uma boa concordância com o modelo de Kuo (1998) para temperatura do ar variando de 5°C a 20°C, onde pôde ser obtido um diferencial térmico de 4,5°C para uma temperatura do ar de 15°C para ambos os modelos. Para a temperatura do ar superior a 20°C, o modelo de Kuo passa a subestimar o valor do diferencial térmico positivo máximo, chegando a uma diferença de 5°C, para uma temperatura do ar de 35°C, onde o diferencial térmico obtido a partir do modelo proposto na Equação 8.4 foi de 15°C.

Para placas de 250 mm (Figura 8.6), para uma previsão anual, o modelo de Kuo (Equação 8.7) assemelha-se ao modelo proposto (Equação 8.4) para temperaturas do ar entre 15°C e 30°C, onde se obtém um diferencial térmico de 8°C, para uma temperatura do ar de 20°C, para ambos os modelos. Para temperaturas do ar inferiores a 15°C, o modelo de Kuo passa a superestimar

o valor do diferencial térmico, com uma diferença de 4°C para uma temperatura do ar igual a 5°C, enquanto o diferencial térmico obtido a partir do modelo proposto (Equação 8.4) foi de 5°C. Para temperaturas do ar superiores a 30°C, o modelo de Kuo subestima o valor do diferencial térmico, chegando a alcançar uma diferença de 4°C, para uma temperatura do ar de 35°C, onde o diferencial térmico obtido a partir do modelo proposto (Equação 8.4) foi de 17°C.

O modelo proposto na Equação 8.5, para previsão de diferenciais térmicos positivos máximos durante a primavera/verão apresenta, quando não é considerada a presença de umidade no fundo da placa, para placas de 150 mm (Figura 8.7) e de 250 mm de espessura (Figura 8.8), uma boa concordância com o modelo proposto por Kuo, para temperaturas do ar entre 20°C e 30°C, novamente subestimando o valor do diferencial térmico para temperaturas do ar superiores a 30°C, apresentando uma diferença de 5°C para temperaturas do ar próximas aos 40°C, sendo que a partir do modelo proposto foi obtido um diferencial térmico de 15°C e 19°C para placas de 150 mm e 250 mm de espessura, respectivamente.

Ainda analisando as Figuras 8.7 e 8.8, verifica-se que os diferenciais térmicos obtidos em placas de 250 mm, com isso as Equações 8.5 (modelo proposto) e 8.7 (modelo de Kuo), apresentam valores superiores em até 5°C, quando comparados com os valores obtidos para placas de 150 mm, de acordo com o que foi verificado durante a monitoração dos dados apresentada no Capítulo 7.

Considerando-se a presença de umidade no fundo da placa (Figuras 8.7 e 8.8), o modelo proposto na Equação 8.5 apresenta valores de diferenciais térmicos positivos até 9°C superiores àqueles obtidos a partir do modelo de Kuo, estando aproximadamente 6°C acima para temperaturas do ar próximas de 30°C, para ambas as espessuras, onde o diferencial térmico

obtido a partir da equação 8.5 foi 15°C e 18°C, para placas de 150 mm e 250 mm de espessura, respectivamente.

Análises para as estações frias (outono/inverno), apresentadas nas Figuras 8.9 e 8.10, mostraram que o modelo proposto (Equação 8.6) assemelha-se ao modelo de Kuo, apresentando uma diferença entre os dois modelos de apenas 2°C.

Pode ser concluído que, a partir das comparações entre os modelos propostos nas Equações 8.4, 8.5 e 8.6 e o modelo proposto por Kuo (1998), existe uma boa concordância entre eles para as estações frias (outono/inverno) e também para as estações quentes (primavera/verão), quando as temperaturas do ar encontram-se abaixo de 30°C.

Sendo assim, para temperaturas superiores a 30°C (muito comum em regiões tipicamente tropicais) o modelo de Kuo passaria a subestimar os valores de diferenciais térmicos obtidos o que pode ser explicada pelo fato de simplesmente este modelo ter sido calibrado em clima temperado, onde para a média anual da temperatura do ar foi obtido um máximo valor de 20,2°C, contra os 25°C observados em São Paulo; quanto à média anual velocidade do vento, os valores obtidos para a calibração dos modelos de Kuo (1998) estiveram entre 3,23 m/s e 5,81 m/s, enquanto que na área de pesquisa o valor médio foi de 1,1 m/s. Lembrando também que os diferenciais térmicos máximos positivos alcançam aproximadamente 10°C em clima temperado, contra 17°C, freqüentemente obtido em clima tropical, chegando a atingir valores próximos de 25°C.

O método de dimensionamento de pavimentos de concreto de cimento Portland apresentado no suplemento do guia para projeto de estruturas de pavimentos (AASHTO, 1998), é o único que considera o efeito da temperatura. Para estimar o diferencial térmico positivo e negativo, o método utiliza-se do modelo proposto por Kuo (1998), onde é considerado ainda, no

que diz respeito ao efeito térmico, uma distribuição linear da temperatura ao longo da profundidade da placa; entende-se que este ainda seja o método mais completo (AASHTO, 1998), mas ainda assim é um método empírico calibrado em clima temperado.

A partir das análises realizadas com os modelos de previsão de diferenciais térmicos positivos propostos neste trabalho, e também das análises do comportamento da temperatura ao longo da profundidade da placa, que se apresentou em 92% do tempo não linear, pode-se concluir que um diferencial térmico estimado a partir do modelo proposto por Kuo (1998) resultaria em espessuras de placas inferiores àquela projetada para um diferencial térmico estimado a partir dos modelos presentemente propostos.

O efeito da temperatura do ar na placa de concreto de cimento Portland elimina dúvidas sobre se o efeito do diferencial térmico deverá ou não ser levado em consideração em projetos de pisos industriais de concreto, visto que o empenamento pode ocorrer mesmo neste caso, ou seja, sem ocorrência de luz solar incidindo diretamente sobre os pavimentos.

Os modelos empíricos propostos neste trabalho são uma importante ferramenta para a previsão da temperatura de topo máxima e do diferencial térmico positivo máximo em ambiente tropical para pavimentos de concreto de cimento Portland em serviço e, principalmente, para o projeto de novos pavimentos. Estudos futuros deverão ser realizados para a ampliação de tais modelos para outras localidades do Brasil que não São Paulo.

8.3 Previsão dos Efeitos da Não Linearidade sobre os Pavimentos de Concreto de Cimento Portland

Como procurou-se apresentar no Capítulo 3 desta tese, os modelos analíticos propostos por Choubane e Tia (1992; 1995) para o cálculo de

efeitos de gradientes térmicos levam a considerar que para os casos de distribuições não lineares de temperaturas ao longo da espessura de uma placa de concreto, além de causarem o empenamento da placa de CCP resultam em deformações que distorcem as faces planas deformadas após o empenamento, causando deformações complementares e diferenciadas ao longo da espessura do CCP.

Para melhor esclarecer os efeitos dos diferenciais térmicos não lineares, buscou-se a simulação de um caso real ocorrido na pista experimental, procurando-se empregar uma versão do programa por elementos finitos ILLISLAB, desenvolvido na Universidade de Illinois, que permitisse a consideração real de situações encontradas em campo. O programa ILSL2 tem implantada em sua rotina os modelos de não linearidade propostos por Choubane e Tia (1992; 1995), que permitem a simulação das condições reais prevalentes em pista (Ioannides e Korovesis, 1992; Khazanovich e Ioannides, 1993).

Para tais simulações com o ILSL2 é estritamente necessária a disponibilidade de medidas de temperaturas em vários pontos na profundidade das placas de modo a ser possível o emprego das equações de Choubane e Tia (1992; 1995) anteriormente apresentadas, o que se tornou possível tendo em vista que no experimento em São Paulo foram contempladas tais medidas (apresentadas no Capítulo 7).

Vários casos foram tratados durante os estudos, tomando-se várias datas de leituras ao longo do experimento realizado. O tratamento de dados de campo é um trabalho moroso e cuidadoso para a análise, de modo que foram escolhidas cinco datas para a simulação e averiguação de resultados, ao longo de mais de um ano de leituras disponíveis. Para exemplificar resultados típicos, na Tabela 8.1 são apresentados resultados obtidos para algumas horas do dia 7 de dezembro de 1.999, próximo ao limite entre primavera e verão, para a placa C2b, com 250 mm e base de CCR não aderida.

Nas simulações apresentadas foram observados os seguintes parâmetros para a seção C da pista experimental: módulo de reação do subleito de 20 MPa/m; módulo de deformação do CCP de 30.000 MPa; módulo de deformação do CCR de 22.400 MPa; coeficiente de Poisson para ambas as camadas de concreto (placa e base) de 0,15; coeficiente de expansão térmica do CCP de 10^{-5} . $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (assumido); não aderência entre placa e base em CCR e gradiente térmico (situação mais crítica de cálculo). As barras de transferência de cargas foram modeladas internamente no programa face ao seu diâmetro e comprimento real. Não foram consideradas cargas oriundas do tráfego nas simulações.

Tabela 8.1 Comparação entre análise linear e não linear (quadrática) de temperaturas

Horário	Gradiente ($^{\circ}\text{C}$)	Deflexão (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Parcelas não lineares de tensão (MPa)				
				Profundidade da placa (mm)				
				0	63	125	188	250
Análise linear do efeito térmico								
14	11,9	1,48	1,79	-	-	-	-	-
2	-4,0	0,54	0,60	-	-	-	-	-
12	5,4	0,89	0,81	-	-	-	-	-
18	1,7	0,55	0,26	-	-	-	-	-
Análise não linear do efeito térmico								
14	11,9	1,48	2,37	-0,58	0,07	0,29	0,07	0,58
2	-4,0	0,54	1,10	0,49	-0,06	-0,25	-0,06	0,49
12	5,4	0,89	1,31	-0,49	0,06	0,25	0,06	-0,49
18	1,7	0,54	0,60	0,6	-0,08	0,3	-0,08	0,6

Dos resultados apresentados observa-se que a formulação analítica para gradiente térmico não linear conduz a maiores valores de tensões de empenamento, como era de se esperar, mantendo-se constantes as deflexões na placa, pois, como esclarecido pelos estudos teóricos (Westergaard), apenas a parcela linear motiva o empenamento, e portanto, a formação de curvatura na placa de CCP.

Tais acréscimos, no entanto, não são constantes, dependendo do resíduo de temperatura entre a distribuição quadrática e a distribuição linear, todavia podendo a parcela de tensão devida à distorção não linear da placa de

concreto ser idêntica para valores de gradiente (absolutos) muito próximos (como apontam os casos de 2h da manhã e meio dia). Inclusive, deve ser ressaltado que a consideração de regime não linear dos gradientes térmicos causam acréscimos em tensões (devidas somente à temperatura) que podem atingir mais de 100% em relação à análise puramente linear, conforme pôde ser inferido a partir dos valores resultantes das simulações. Na Figura 8.11 são apresentados graficamente tais resultados.

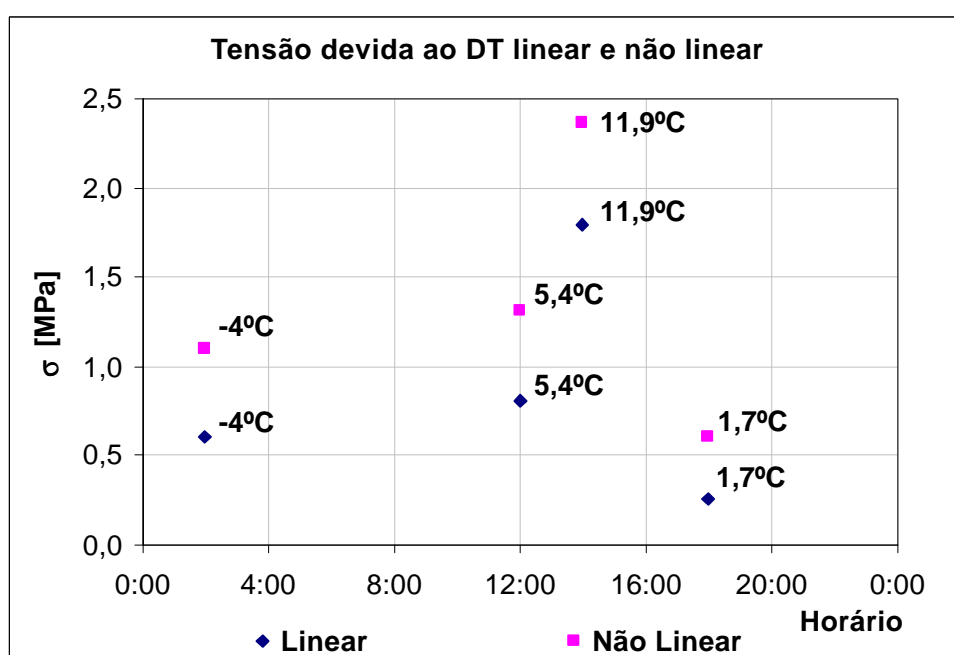


Figura 8.11 Tensão devida ao diferencial térmico linear e não linear

Tendo em vista tais constatações, resultantes da simulação de situações reais aferidas na pista experimental em São Paulo, uma criteriosa análise para finalidades de projeto de pavimento de CCP deverá necessariamente considerar a ocorrência de distribuições de temperatura não lineares para não se ter uma resposta muito otimista quanto à tensão causada por efeitos térmicos (isto é, considerar empenamento somado à distorção conforme propuseram e aferiram Choubane e Tia, 1992; 1995). A título de recordação, no experimento de São Paulo, durante um ano, apenas 25% do tempo as distribuições foram lineares, ou seja, 2.190 horas.

8.4 Resultados Obtidos *versus* Modelo de Projeto Vigente

Como já se referiu, no Brasil, emprega-se na atualidade (há mais de uma década) o método de projeto de pavimentos de CCP proposto pela PCA (Packard, 1984; Packard e Tayabji, 1985), que explicitamente alegava a não consideração dos efeitos térmicos em projeto por razões relacionadas à “complexidade das condições dos gradientes térmicos somadas à incerteza sobre precisão de medidas de temperatura em pavimentos de CCP”.

Este trabalho de doutorado constitui parte de uma ampla linha de pesquisas (Balbo, 2001), tendo sido seu objetivo precípua, como tese de doutorado, uma análise pioneira dos regimes térmicos aos quais ficam submetidos os pavimentos de concreto simples em condições tropicais, culminando na modelagem de modelos empírico-estatísticos para a previsão de diferenciais térmicos nas placas de CCP.

Paralelamente, dentre outros trabalhos já desenvolvidos e em desenvolvimento sobre a base experimental construída com apoio da FAPESP, Rodolfo (2001) desenvolveu a modelagem numérica de tensões devidas a cargas e temperaturas atuando sobre placas de concreto simples, com emprego do programa de elementos finitos ILSL2 (Ioannides e Korovesis, 1992; Khazanovich e Ioannides, 1993). Tais modelos, disponíveis a partir de então, permitem a consideração conjunta dos efeitos de cargas e temperaturas na avaliação de tensões críticas de tração na flexão nestes pavimentos.

Desta forma, vencida a complexidade da análise numérica mencionada por Packard (1984) para gradientes térmicos bem como, estabelecidas com precisão e clareza os regimes térmicos aos quais ficam sujeitas as placas de CCP em pista experimental (em escala real), apresenta-se a seguir uma análise crítica comparativa de tensões calculadas a partir do método da PCA (Packard, 1984; Packard e Tayabji, 1985) e aquelas calculadas a partir dos

modelos desenvolvidos por Rodolfo (2001) empregando-se medidas reais de temperatura obtidas ao longo da presente pesquisa.

Para a elaboração do modelo de cálculo da tensão de tração na flexão para as cargas críticas, posicionada no borda longitudinal da placa, o método da PCA/84 considerou dimensões de placa finitas, presença de barras de transferência de cargas, existência ou não de acostamentos em concreto, carga de 80kN do eixo simples de rodas duplas (ESRD) e admitiu a hipótese de linearidade entre tensões e cargas. As tensões obtidas são apresentadas no método no formato de tabelas e, a partir destas tabelas, Balbo (2002) extraiu modelos numérico-estatísticos para o computo das tensões críticas, descritos pela expressão genérica:

$$s = C_1 \cdot h^{C_2} \cdot k^{C_3} \quad [8.8]$$

onde:

s = tensão de tração na flexão crítica (MPa);

h = espessura da placa de CCP (mm);

k = módulo de reação do subleito (MPa/m);

C_1, C_2, C_3 = constantes de regressão

Para verificar as tensões devidas às cargas combinadas aos diferenciais térmicos, Rodolfo (2001) realizou 28.512 simulações numéricas utilizando o programa ILSL2 (Ioannides e Korovesis, 1992; Khazanovich e Ioannides, 1993), o que permitiu ao autor avaliar o comportamento da tensão na placa de CCP e modelar estatisticamente esta tensão em função dos seguintes parâmetros: espessura da placa e da base, módulo de deformação da base, módulo de reação do subleito, comprimento da placa, carga e diferenciais térmicos. A estrutura geral do modelo numérico-estatístico proposto por Rodolfo (2001) é:

$$s = I + x_1 Q + x_2 h^2 + x_3 h + x_4 h_b^2 + x_5 h_b + x_6 E_b^2 + x_7 E_b + x_8 DT \quad [8.9]$$

onde:

s = tensão de tração na flexão crítica (MPa);

Q = carga (kN);

h = espessura da placa (m);

h_b = espessura da base (m);

E_b = módulo de deformação da base (MPa);

DT = diferencial térmico (°C);

$I, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ = constantes de regressão

O módulo de deformação da placa de concreto é assumido nos modelos de Rodolfo (2001) como invariante (28.000 MPa). Para analisar as tensões de tração na flexão geradas em uma placa de 5,5 m de comprimento calculadas a partir do método da PCA/84 e do modelo proposto por Rodolfo (2001), apresentados nas equações 8.8 e 8.9, respectivamente, foram considerados os seguintes parâmetros (obtidos na pista experimental EPUSP):

- Seção C2 da pista experimental;
- $h = 150$ mm e 250 mm;
- $k = 30$ MPa/m;
- $Q = 80$ kN;
- $h = 150$ mm e 250 mm;
- $h_b = 100$ mm;
- $E_b = 22.400$ MPa;
- diferencial térmico (DT) variando de -5°C a 25°C ;
- não adoção de acostamento em concreto.

As constantes de regressão C_1 , C_2 e C_3 do modelo numérico-estatístico para o cálculo de tensões apresentado na Equação 8.8, para o caso de ESRD de 80 kN e a não adoção de acostamento em concreto são iguais a 5.984, $-1,40297$ e -0.18299 , respectivamente (Balbo, 2002).

As constantes de regressão do modelo proposto por Rodolfo (2001) são apresentadas na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 Coeficientes de regressão para placa de 5,50 m de comprimento e subleito com módulo de reação de 30 MPa/m (Rodolfo, 2001)

Coeficiente	Espessura da Placa de CCP	
	150 mm	250 mm
<i>I</i>	4,827795544	4,474855105
<i>x1</i>	0,024437136	0,019479424
<i>x2</i>	8,557526083	20,1091493
<i>x3</i>	-16,32412849	-20,62885666
<i>x4</i>	-11,73952917	-14,48337187
<i>x5</i>	-6,558617848	-0,146208073
<i>x6</i>	$5,7254 \times 10^{-10}$	$1,81825 \times 10^{-10}$
<i>x7</i>	$-4,94444 \times 10^{-05}$	$-2,00845 \times 10^{-05}$
<i>x8</i>	0,156020102	0,139112935

As tensões calculadas a partir do método da PCA/84 e do modelo proposto por Rodolfo (2001) são apresentadas na Tabela 8.3 e ilustradas graficamente na Figura 8.12

Tabela 8.3 Tensões de tração na flexão calculadas a partir do método da PCA/84 e dos modelos propostos por Rodolfo (2001)

DT	PCA/84		Rodolfo (2001)	
	150 mm	250 mm	150 mm	250 mm
-5	2,84	1,39	2,15	0,92
0	2,84	1,39	2,93	1,61
5	2,84	1,39	3,71	2,31
10	2,84	1,39	4,49	3,01
15	2,84	1,39	5,27	2,70
20	2,84	1,39	6,05	4,40
25	2,84	1,39	6,83	5,09

Conforme pôde ser verificado na Tabela 8.3, ilustrada na Figura 8.12 abaixo, para espessuras de 150 mm o método da PCA/84 apresenta valores de

tensão de tração na flexão superiores àqueles obtidos a partir do modelo de Rodolfo (2001) para diferenciais térmicos negativos.

Entretanto, quando ocorrem diferenciais térmicos positivos, o modelo da PCA/84 passa a subestimar os valores de tensão quando são considerados os efeitos combinados das cargas e diferenciais térmicos em 85% (2,43 MPa) quando temos diferenciais térmicos de 15°C, valor freqüentemente obtido para placas de 150 mm durante o verão. Diga-se de passagem que tensões calculadas pelos modelos de Rodolfo (2001), também encontrados em Rodolfo e Balbo (2002), para diferenciais térmicos nulos resultam idênticas àquelas prescritas pelo método da PCA (1984).

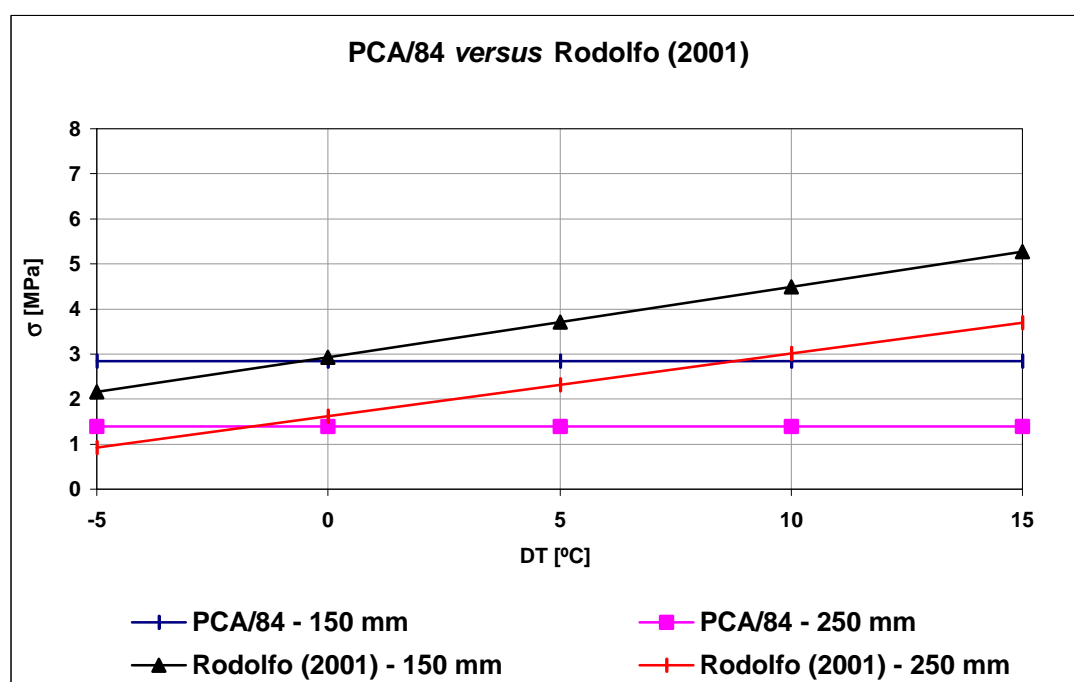


Figura 8.12 Tensões de tração na flexão calculadas a partir do método da PCA/84 e dos modelos propostos por Rodolfo (2001)

Para as placas de 250 mm de espessura, verificou-se que o método da PCA/84 subestima os valores de tensão de tração na flexão para qualquer valor de diferencial térmico positivo quando considera-se o efeito combinado de carga e diferencial térmico, onde a tensão obtida chega a ser superior em

186% (2,59 MPa) para diferenciais térmicos de 17°C, valor este freqüentemente obtido durante o verão para placas de 250 mm de espessura.

Sendo assim, o efeito combinado das cargas do tráfego e diferenciais térmicos eleva expressivamente o valor da tensão de tração na flexão na placa de CCP, deixando claro que o método de projeto utilizado no Brasil subestima os valores da tensão crítica em uma magnitude tal que, as espessuras de placa obtidas a partir deste método estariam aquém daquelas realmente necessárias para suportar efeitos combinados de tensões oriundas de cargas e de diferenciais térmicos; portanto, dimensionar pavimentos de concreto não considerando o efeito combinado das cargas do tráfego e dos diferenciais térmicos é temeroso para as condições de clima tropical, fazendo-se necessária uma alteração nos procedimentos de projeto.

Os dados obtidos em pista experimental, apresentados e discutidos nesse trabalho, apontam evidentemente para duas constatações: não se faz mais presente a incerteza existente no passado (até recente) sobre a precisão e as magnitudes de diferenciais térmicos e o ajuste e calibração de um critério de projeto específico para as condições brasileiras deve ser buscado, pois o método atualmente empregado, é muito incompleto, conforme se pôde cabalmente demonstrar, não com base em hipóteses, mas sob condições reais de emprego de pavimentos de CCP.

Conclusões

Setenta e nove anos após a realização do primeiro experimento em clima temperado no qual foram considerados os efeitos da temperatura em pavimentos de CCP, construiu-se a primeira pista experimental, em clima tropical, com o intuito de verificar os efeitos térmicos para este regime climático, configurando-se em um estudo pioneiro para o entendimento de parte das inúmeras questões (e angústias) que se colocam presentemente ao se dimensionar um pavimento de concreto simples.

As diferenças observadas entre os padrões térmicos em placas de concreto em ambiente tropical muito se diferenciaram daqueles observados em alguns estudos anteriores, todos eles conduzidos em ambientes nitidamente não tropicais e predominantemente temperados. Não são apenas os valores extremos que confirmaram tais diferenças; algumas outras diferenças são marcantes, dependendo da proporção do tempo ao longo do ano, quando gradientes negativos e positivos ocorrem. Pela primeira vez na literatura técnica pertinente ao assunto foram estudadas tais diferenças em termos experimentais.

Os resultados de mais de um ano de monitoração na pista experimental construída na EPUSP, em uma região de clima tropical úmido de altitude,

foram apresentados, dos quais extraíram-se os padrões de distribuição da temperatura em placas de CCP ao longo das estações do ano, bem como tais distribuições são afetadas pela temperatura do ar, pela umidade relativa do ar e pela radiação solar. Análises dos dados de temperatura obtidos a partir das seções de teste forneceram importantes esclarecimentos, não disponíveis anteriormente na literatura técnica, sobre condições térmicas em pavimentos de concreto de cimento Portland no clima tropical.

Temperaturas Típicas Observadas

As médias das temperaturas máximas e mínimas de topo apresentaram uma clara distinção entre primavera/verão e outono/inverno. A temperatura mínima de topo durante a primavera/verão variou entre 20°C e 28°C e durante o outono/inverno seus valores estiveram entre 13°C e 18°C. A temperatura máxima de topo durante a primavera/verão variou entre 31°C e 46°C e entre outono/inverno entre 23°C e 30°C, atingindo valores extremos de 55°C durante o verão e de 6,5 °C durante o inverno. As temperaturas máximas e mínimas de fundo apresentaram a mesma distinção entre a primavera/verão e o outono/inverno, sendo verificado que as mesmas dependem da espessura da placa e independem do tipo de base utilizada no pavimento.

As médias das temperaturas mínimas de fundo para as placas de 150 mm variaram de 21°C a 26°C durante primavera/verão e de 14°C e 22°C durante o outono/inverno; para as placas de 250 mm foram observados valores de 24°C a 28°C durante primavera/verão e de 15° a 20°C durante outono/inverno. As médias das temperaturas máximas de fundo, para as placas de 150 mm, apresentaram valores variando de 30°C a 35°C durante primavera/verão e de 18°C e 29°C durante o outono/inverno; para as placas de 250 mm as médias das temperaturas de fundo variaram de 28°C a 33°C durante primavera/verão e de 18°C e 27°C durante outono/inverno.

Diferenciais e Gradientes Térmicos Observados

Os diferenciais térmicos negativos não apresentaram variação durante as estações climáticas, sendo mais expressivos para as placas de 250 mm, apresentando valores médios de -5°C ; para as placas de 150 mm os diferenciais térmicos negativos médios foram de -2°C .

Os diferenciais térmicos positivos variaram de acordo com as estações climáticas e espessura da placa e ocorreram freqüentemente entre as 13 horas e as 15h30 em todas as estações do ano. As placas de 150 mm de espessura apresentaram diferenciais térmicos positivos variando de 6°C a $7,5^{\circ}\text{C}$ para o outono/inverno e de $7,5^{\circ}\text{C}$ a $9,0^{\circ}\text{C}$ para a primavera/verão, atingindo valores extremos de 15°C durante o verão; as placas de 250 mm apresentaram diferenciais térmicos positivos variando de 8°C a 17°C durante a primavera/verão e de 6°C a 10°C durante outono/inverno, atingindo valores extremos de $22,5^{\circ}\text{C}$ durante o verão.

Diferenciais térmicos positivos foram de 3,5 (inverno) a 4,5 (verão) vezes maiores que os diferenciais negativos para as placas de 150 mm e de 2 (inverno) a 3,5 (verão) vezes maiores que os diferenciais térmicos negativos para placas de 250 mm (em valor absoluto) e ocorreram em 55% do tempo durante a primavera/verão e 60% do tempo durante o outono/inverno, independentemente da espessura da placa, sendo portanto os diferenciais positivos mais freqüentes no clima tropical em questão.

Com relação aos gradientes térmicos, verificou-se que os gradientes negativos foram similares para todas as estações, apresentando valores de $-0,015^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ e de $-0,07^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ para placas de 150 mm e 250 mm de espessura, respectivamente; os gradientes térmicos positivos apresentaram clara distinção entre primavera/verão e outono/inverno sendo que as placas de 150 mm de espessura não apresentaram significativa variação durante as estações do ano, apontando valores entre $0,061^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ e $0,069^{\circ}\text{C}/\text{mm}$,

enquanto que para as placas de 250 mm seus valores estiveram entre $0,067^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ a $0,078^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ durante a primavera/verão e foram de $0,045^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ durante o outono/inverno. Valores extremos de $0,107^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ foram obtidos durante o verão e, estimando-se um gradiente linear, o diferencial térmico seria igual a $26,8^{\circ}\text{C}$ para placas com 250 mm de espessura.

Taxas de Elevação e Queda de Temperatura Observadas

As taxas de elevação da temperatura de topo variaram de $1,8^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $2,6^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante a primavera/verão e $1,1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $2,1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante o outono/inverno, ou seja aproximadamente 25% menor nas estações mais frias. As taxas de decréscimos da temperatura de topo variaram de $-1,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $-2,2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante a primavera/verão e de $-1,0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $-1,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante o outono/inverno, ratificando a dependência da temperatura de topo da temperatura do ar, pois as taxas são claramente maiores durante as estações quentes.

As taxas de elevação e decréscimo da temperatura de fundo são dependentes da espessura da placa onde verificou-se que as temperaturas de fundo para placas de 150 mm se elevaram a uma taxa de $1,0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $1,2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante a primavera/verão e, durante o outono/inverno, a uma taxa de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $1,0^{\circ}\text{C}/\text{h}$; as placas de 250 mm apresentaram taxas de elevação compreendidas entre $0,2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ e $0,7^{\circ}\text{C}/\text{h}$, independente da estação climática. A temperatura de fundo para placas de 150 mm de espessura decresce a uma taxa de $-0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $-0,8^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante a primavera/verão e de $-0,3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a $-0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ durante o outono/inverno, enquanto que para placas de 250 mm de espessura estas taxas estiveram compreendidas entre $-0,2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ e $-0,4^{\circ}\text{C}/\text{h}$, independentemente da estação climática.

Efeitos de Bases Saturadas em Pavimentos de Concreto Simples

A presença de umidade em bases de pavimentos de CCP ocasionou um decréscimo significativo na temperatura de fundo das placas gerando diferenciais térmicos positivos o dia todo e com valores 1,8 vezes superiores àqueles obtidos para placas de mesma espessura sobre bases não saturadas; portanto, pavimentos de concreto em vias mal drenadas, muito comuns em cidades brasileiras, estariam muito mais sujeitos aos efeitos de empenamento, resultando em acréscimos expressivos nas tensões de tração na flexão de projeto.

Modelos de Previsão de Temperaturas Propostos

Os modelos empírico-estatísticos propostos neste trabalho são uma importante ferramenta para a previsão da temperatura de topo máxima e do diferencial térmico positivo máximo em ambiente tropical para pavimentos de concreto de cimento Portland em serviço e, principalmente, para o projeto de novos pavimentos.

Análises de sensibilidade destes modelos permitiram concluir que o efeito combinado do número de horas de insolação e da temperatura do ar representa um incremento na temperatura de topo de 20% para a primavera/verão e de 7% durante o outono/inverno, ou seja, o número de horas de insolação é um parâmetro muito mais representativo durante os meses quentes em clima tropical.

Os modelos empírico-estatísticos apresentaram uma boa concordância com o modelo empregado pela AASHTO (1998) durante as estações frias; para as estações quentes, o modelo da AASHTO subestima os valores de diferenciais térmicos máximos que podem ser obtidos em clima tropical, que alcançam 20°C para uma temperatura do ar de 35°C, contra 14°C obtidos a partir do mesmo para placas de 250 mm de espessura.

A adoção de um diferencial térmico estimado a partir do modelo sugerido pela AASHTO, nas condições tropicais, resultaria em espessuras de placas inferiores àquela projetada para um diferencial térmico estimado a partir dos modelos presentemente oferecidos, inclusive quando é considerada uma distribuição da temperatura ao longo da profundidade da placa não linear, que ocorreu em 75% do tempo durante o presente estudo.

Os modelos propostos permitiram verificar que o efeito da temperatura do ar na placa de concreto de cimento Portland elimina dúvidas sobre se tensões devidas ao diferencial térmico deverão ou não ser consideradas em projetos de pisos industriais de concreto em áreas cobertas, visto que o empenamento pode ocorrer mesmo neste caso, ou seja, sem ocorrência de luz solar incidindo diretamente sobre os pavimentos.

A consideração de diferenciais térmicos não lineares conduziram a maiores valores de tensões de empenamento, causando acréscimos superiores a 100% em relação à análise puramente linear.

Comentários e Recomendações Finais

A partir dos resultados obtidos na pista experimental EPUSP venceu-se a complexidade da análise de temperaturas mencionada por Packard (1984) para sua consideração em projetos de pavimentos de CCP, permitindo concluir que na ocorrência de diferenciais térmicos positivos (condição mais freqüente em clima tropical), o método da PCA/84 subestima os valores de tensão de tração na flexão para qualquer valor de diferencial térmico positivo, quando é considerado o efeito combinado de carga e diferencial térmico; a tensão obtida ao se considerar cargas de veículos e ambientais é superior em 186%, por exemplo, para diferenciais térmicos de 17°C, freqüentemente obtidos durante o verão tropical.

O efeito combinado das cargas do tráfego e diferenciais térmicos eleva expressivamente o valor da tensão de tração na flexão na placa de CCP, deixando claro que o método de projeto empregado no Brasil (PCA, 1984) subestima os valores da tensão crítica em uma magnitude tal que, as espessuras de placa obtidas a partir deste método estariam aquém daquelas realmente necessárias para suportar efeitos combinados de tensões oriundas de cargas e de diferenciais térmicos ao longo de sua vida de serviço admitida durante o projeto de um pavimento; portanto, dimensionar pavimentos de concreto não considerando o efeito combinado das cargas do tráfego e dos diferenciais térmicos é temeroso para as condições de clima tropical, fazendo-se extremamente necessária uma alteração nos procedimentos de projeto.

Sendo o método de dimensionamento empregado no Brasil desenvolvido em e para clima temperado e ainda, ao se considerar o método de dimensionamento da AASHTO (1998), que contempla o efeito térmico em pavimentos de concreto empregando modelos empíricos para previsão do diferencial térmico também calibrados no mesmo regime climático, conclui-se que, após todos os experimentos realizados, aqueles modelos não seriam apropriados para o dimensionamento de pavimentos de concreto em ambiente tropical.

Ainda em relação aos métodos de projeto empregados no Brasil, uma criteriosa análise para finalidades de projeto de pavimento de CCP deverá necessariamente considerar a ocorrência de distribuições de temperatura não lineares para não se ter uma resposta muito otimista quanto à tensão causada por efeitos térmicos. A título de recordação, no experimento de São Paulo, as distribuições foram lineares apenas durante 2.190 horas em um ano (25% do tempo).

A continuidade na coleta de dados na pista experimental EPUSP durante mais alguns anos far-se-á necessária para permitir o máximo rigor das

análises dos efeitos térmicos durante as quatro estações do ano, inclusive para que possa ser investigado mais rigorosamente o efeito da presença de umidade na base de pavimentos de CCP, instalando-se piezômetros ou medidores de umidade.

Estudos futuros para desenvolver uma modelagem do efeito da não linearidade em pavimentos de concreto de CCP seriam indispensáveis para tornar possível a previsão das tensões devidas ao efeito térmico na sua mais plena realidade.

Sugerem-se ainda estudos futuros para a determinação experimental dos parâmetros de condutividade térmica do concreto com base nas taxas de elevação e queda de temperaturas verificadas na pista experimental EPUSP, empregando-se modelagem analítica baseada em conceitos da termodinâmica.

Finalmente, e acima de qualquer recomendação para estudos futuros, sugere-se, diante do expressivo crescimento do uso de pavimentos de CCP no país nos últimos cinco anos, com tendência a disseminação ainda mais ampla de seu emprego, a imediata alteração do critério de projeto atualmente empregado no Brasil. Dispõem-se de conhecimentos teóricos e experimentais suficientes, neste ponto, para que tal empreitada seja concluída em breve período de tempo.

Referências Bibliográficas

AASHTO (1986) *Guide for design of pavement structures*. American Association of Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, Washington D.C.

AASHTO (1998) *Supplement to the AASHTO guide for design of pavement structures – part II – rigid pavement design & rigid pavement joint design*. American Association of Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-078-1, Washington D.C.

Adkins, D. F.; Merkley, G. P. (1990) *Mathematical model of temperature changes in concrete pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 116, nº 03, pp. 349 – 358.

Alungbe, G. D.; Tia, M.; Bloomquist, D. G. (1992) *Effects of aggregate, water/cement, and curing on the coefficient of linear thermal expansion of concrete*. Transportation Research Record 1335, Transportation Research Board, pp. 44 – 51, Washington, D.C.

Alungbe, G. D.; Tia, M. (1994) *Effects of coefficient of thermal expansion and modulus of elasticity on concrete pavement performance*. Proceedings of the 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, CROW – PIARC – CEMBUREAU, pp. 187 –202, Krumbach.

American Association of State Highway Officials (1962) *The AASHO Road Test - Report 5 - Pavement Research*. Highway Research Board Special Report 61E, Publication nº. 954, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C.

- Ardnt, W. J. (1943) *Temperature changes and duration of high and low temperatures in concrete pavements*. Proceedings of the 23rd Annual Meeting, Highway Research Board, pp. 273 – 278, Washington, D.C.
- Armaghani, J.M.; Larsen, T. J.; Smith, L. (1987) *Temperature response of concrete pavement*. Transportation Research Record 1121, Transportation Research Board, pp. 23 – 33, Washington, D.C.
- Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Prefeitura Municipal de São Paulo. Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo. Disponível em:
http://www.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/meio_ambiente/index.asp.
Acesso em abril de 2.001.
- Balay, J. – M.; Goux, M. – T. (1994) *Numerical analysis of the experiment of concrete pavement on LCPC's fatigue test track*. Proceedings of the 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, CROW – PIARC – CEMBUREAU, pp. 187 –202, Krumbach.
- Balbo, J.T. (1989) *Aplicação do método dos elementos finitos na avaliação estrutural de pavimentos rígidos rodoviários*. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Balbo, J.T. (1996) *Practical considerations for concrete pavement design based on numerical model*. Ponencias del 1er Congreso Interamericano de Pavimentos Rígidos, Federación Interamericana del Cemento, Buenos Aires.
- Balbo, J.T. (2001) *Estudo de gradientes térmicos em placas de concreto de cimento portland para pavimentação*. Relatório Científico Final. Auxílio Individual à Pesquisa processo nº 98/11629-5 – FAPESP. São Paulo.

- Balbo, J.T. (2002) *Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Simples*. XVII Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes – ANPET. No prelo e também disponível em: www.ptr.usp.br/lmp.
- Barber, E. S. (1957) *Calculation of maximum pavements temperature from weather reports*. Bulletin 168, Highway Research Board. National Research Council, pp. 1 – 8, Washington, D.C.
- Barenberg, E.; Zollinger, D. G. (1990) *Validation of concrete pavements responses using instrumental pavements*. Transportation Research Record 1286, Transportation Research Board, pp. 67 – 77, Washington, D.C.
- Bradbury, R. D. (1938) *Reinforced concrete pavements*. Wire Reinforced Institute, Washington, D.C.
- Bright, J. K.; Mays, J. R. (1997) *Temperature effects on cellular rigid pavement compared to flat slabs*. Journal of Transportation Engineering. American Society Civil Engineers. Vol. 123, n. 02, pp. 142 – 147.
- Choubane, B.; Tia, M. (1992) *Nonlinear temperature gradient effect on maximum warping stresses in rigid pavements*. Transportation Research Record 1370, Transportation Research Board, pp. 11 – 19, Washington, D.C.
- Choubane, B.; Tia, M. (1995) *Analysis and verification of thermal – gradients effects on concrete pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 121, n. 01, pp. 75 – 81.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1976) *Classificação climática de Wladimir Köppen*. Reimpressão, Rio de Janeiro.

- Faraggi, V.; Jofre, C.; Kramer, C. (1986) *Combined effect of traffic loads and thermal gradients on concrete pavement design*. Proceedings of the Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, CROW – PIARC – CEMBUREAU, Epen.
- Faraggi, V.; Jofre, C.; Kramer, C. (1987) *Combined effect of traffic loads and thermal gradients on concrete pavement design*. Transportation Research Record 1136, Transportation Research Board, pp. 108 – 118, Washington, D.C.
- Harik, E.; Jianping, H.; Allen, D. (1994) *Temperature effects on rigid pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 120, n. 01, pp. 127 – 143.
- Huang, Y. H. (1993) *Pavement analysis and design*. Prentice – Hall, Inc., pp. 168 – 173, New Jersey.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1998) *Brasil em números*. Volume 6, Rio de Janeiro.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Climatologia. Disponível em: www.inmet.gov.br/cliamto/. Acesso em Dezembro de 2.000.
- Ioannides, A.M.; Korovesis, G.T. (1992) *Analysis and Design of Doweled Slab-On-Grade Pavement Systems*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, Nov./Dec., pp. 745-768.
- Khazanovich, L.; Ioannides, A.M. (1993) *Finite Element Analysis of Slabs-On-Grade Using Improved Subgrade Soil Models*. Proceedings, ASCE Specialty Conference Airport Pavement Innovations-Theory to Practice, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, September 8-10, pp.16-30.

- Kuo, C. M. (1998) *Effective temperature differential in concrete pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 124, n. 02, pp. 112 – 116.
- Liang, R. Y.; Niu, Y. Z. (1998) *Temperature curling stress in concrete pavements: analytical solutions*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 124, n. 01, pp. 91 – 100.
- Masad, E.; Taha, R.; Muhunthan, B. (1996) *Finite – elements analysis of temperature effects on plain – jointed concrete pavements*. Journal of Transportation Engineering, American Society Civil Engineers, Vol. 122, n. 05, pp. 388 – 398.
- Mirambell, E. (1990) *Temperature and stress distribution in plain concrete pavements under thermal and mechanical loads*. Proceedings of the 2nd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements. CROW – PIARC - CEMBUREAU, pp. 121 – 135, Sigüenza.
- Mohamed, A.; Hansen, W. (1998) *Effects of nonlinear temperature gradient on curling concrete pavements*. Transportation Research Record 1568, Transportation Research Board, pp. 65 – 71, Washington, D.C.
- Nishizawa, T.; Fukuda, T. (1994) *Warping stress equation of transverse joint edge of concrete pavement slab based on FEM analysis*. Proceedings of the 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, CROW – PIARC – CEMBUREAU, pp.175 – 186, Krumbach.
- Nishizawa, T.; Fukuda, T.; Matsuno S.; Himeno K. (1996) *Curling stress equation for transverse joint edge of a concrete pavement slab based on finite - element method analysis*. Transportation Research Record 1525, Transportation Research Board, pp. 35 – 43, Washington, D.C.

- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995) *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Editora Vilibor, São Paulo.
- Older, C. (1924) *Highway research in Illinois*. Transactions of the American Society of Civil Engineers – ASCE, vol. 87, pp. 1181 – 1224.
- Packard, R. G. (1984) *Thickness design for concrete highway and street pavements*. EB 109.01P. Portland Cement Association – PCA, Illinois.
- Packard, R. G.; Tayabji, S. D. (1985) *New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements*. Proceedings of the 3th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, pp. 225 – 236, West Lafayette.
- Pitta, M. R. (1996) *Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84*. 2 ed., São Paulo, ABCP, 91 p., ET – 97.
- Poblete, M.; Salsilli, R.; Valenzuela, A.; Bull, A.; Sprats, P. (1988). *Field evaluation of thermal deformations in undowelled portland cement concrete pavements slabs*. Transportation Research Record 1207, Transportation Research Board, pp. 217 – 228. Washington, D.C.
- Richardson, J. M.; Armaghani, J. M. (1987) *Stress caused by temperature gradient in portland cement concrete*. Transportation Research Record 1121, Transportation Research Board, pp. 7 – 13, Washington, D.C.
- Rodolfo, M. P. (2001) *Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos*. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Rodolfo, M. P.; Balbo, J. T. (2002) *Modelagem de tensões em pavimentos de concreto submetidos a gradientes térmicos e cargas rodoviárias*. in: Transporte em Transformação 5, MAKRON Books e Confederação Nacional de Transporte, ISBN: 85-346-1413-x, Cap. 7, pp 104 a 117.
- Setzer, J. (1966) *Atlas climatológico e ecológico do Estado de São Paulo*. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai. CESP, São Paulo.
- Severi, A.A.(1997) *Considerações sobre os custos de pavimentos rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC-USP, São Carlos.
- Swanberg, J. H. (1945) *Temperature variation in a concrete pavement and underlying subgrade*. Proceedings of the 26th Annual Meeting, Highway Research Board, pp. 169 – 180, Washington, D.C.
- Tarifa, J. R.; Armani, G. (2.000) *Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo (1ª Aproximação)*. Atlas Ambiental do Município de São Paulo – Fase I: Diagnósticos e Bases para a Definição de Políticas Públicas para as Áreas Verdes no Município de São Paulo. Laboratório de Climatologia do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. 74p.
- Teller, L. W.; Suterland, E. C. (1935) *The structural design of concrete pavements part 1, 2 and 3*. The Division of tests, Bureau of Public Roads, vol. 08, pp. 145 – 158, vol. 09, pp. 169 – 197, vol. 10, pp. 201 – 221.
- Thompson, M.R.; Dempsey, B. J.; Hill, H.; Vogel, J. (1987) *Characterizing temperature effects for pavement analysis and design*. Transportation Research Record 1121, Transportation Research Board, pp. 14 – 22, Washington, D.C.

Tia, M.; Armaghani, J. -M; Wu, C.-L.; Toyne, K. L. (1987) *FEACONS III computed program for analysis of jointed concrete pavements*. Transportation Research Record 1136, Transportation Research Board, pp. 12 – 22, Washington, D.C.

Westergaard, H. M. (1926) *Computation of stresses in concrete roads*. Proceedings of the 5th Annual Meeting of the Highway Research Board, pp. 90 – 118, Washington, D.C.

Westergaard, H. M. (1927) a *Analysis of stresses in concrete pavement due variations of temperature*. Proceedings of the 6th Annual Meeting, Highway Research Board. National research Council. pp. 201 - 215, Washington, D.C.

Westergaard, H. M. (1927) b *Analysis of stresses in concrete roads caused by variations of temperature*. Journal of Highway Research, Bureau of Public Roads, vol. 8, n. 3, pp. 54 - 60.

Anexo I

Controle Tecnológico do Concreto Empregado na Pista Experimental EPUSP

I.1 Ensaios de Resistência à Compressão Simples

I.1.1 Concreto Compactado com Rolo (CCR)

Tabela I.1 Resistência à compressão simples e módulo de deformação

Corpo de Prova	fci (MPa)	Módulo Secante (GPa)
CP 1	23,07	25,65
CP 2	22,04	26,41
CP 3	22,00	25,00
média	22,37	25,69
Desvio padrão	0,61	0,71
Coeficiente de variação	2,7%	2,7%

I.1.2 Concreto de Cimento Portland

Tabela I.2 Resistência à compressão simples da Seção A aos 7 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP A1c	30,46
CP A1d	30,59
CP A2c	37,94
CP A2d	37,17
média	34,04
desvio padrão	4,07
coeficiente de variação	12%

Tabela I.3 Resistência à compressão simples da Seção A aos 28 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)	Módulo Secante (GPa)
CP A1a	36,46	28,77
CP A1b	33,88	-
CP A2a	38,38	23,82
CP A2b	41,54	-
Média	37,56	26,29
desvio padrão	3,23	3,50
coeficiente de variação	9%	13%

Tabela I.4 Resistência à compressão simples da Seção B aos 7 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP B1a	36,38
CP B2a	34,95
Média	35,66
Desvio padrão	1,01
coeficiente de variação	3%

Tabela I.5 Resistência à compressão simples da Seção B aos 68 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP B1	30,70
CP B2	35,06
CP B3	31,48
Média	32,41
desvio padrão	1,90
coeficiente de variação	5,86 %

Tabela I.6 Resistência à compressão simples da Seção C aos 55 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP C1	33,08
CP C2	37,92
CP C3	27,60
CP C4	33,63
CP C5	36,80
Média	33,81
desvio padrão	3,60
coeficiente de variação	10,66 %

Tabela I.7 Resistência à compressão simples da Seção D aos 7 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP D1d	23,67
CP D2d	36,25
CP D3d	24,86
Média	28,26
desvio padrão	6,95
coeficiente de variação	25%

Tabela I.8 Resistência à compressão simples da Seção D aos 41 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)	Módulo Secante (GPa)
CP D1a	24,06*	-
CP D1b	37,03	-
CP D1c	35,39	-
CP D2a	46,87	-
CP D2b	45,07	-
CP D2c	45,39	39,80
CP D3a	43,98	-
CP D3b	47,03	-
CP D3c	37,92	38,70
Média	42,335	39,25
desvio padrão	4,75	0,78
coeficiente de variação	11%	2%

* valor desprezado na estatística

Tabela I.9 Resistência à compressão simples da Seção E aos 8 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)
CP E1d	37,14
CP E2d	28,14
CP E3d	30,26
média	31,85
desvio padrão	4,71
coeficiente de variação	15%

Tabela I.10 Resistência à compressão simples da Seção E aos 28 dias

Corpo de Prova	fci (MPa)	Módulo Secante (GPa)
CP E1a	36,31	-
CP E1b	35,03	-
CP E1c	32,73	54,48*
CP E2a	38,17	-
CP E2b	38,11	-
CP E2c	39,40	28,71
CP E3a	43,36	-
CP E3b	41,75	-
CP E3c	39,01	32,83
média	38,21	30,77
desvio padrão	3,26	2,91
coeficiente de variação	9%	9%

* valor desprezado na estatística

I.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão do Concreto de Cimento Portland

Tabela I.11 Resistência à tração na flexão da Seção A aos 27 dias

Corpo de Prova	E (MPa)	f _{ctm} (MPa)
CP A1a	24.997	5,16
CP A1b	23.381	4,83
CP A2a	17.510*	5,42*
CP A2b	20.720	4,28
média	23.652	4,76
desvio padrão	2.160	0,44
coeficiente de variação	9,4%	9,24%

* valor desprezado na estatística

Tabela I.12 Resistência à tração na flexão da Seção B aos 68 dias

Corpo de Prova	E (MPa)	f _{ctm} (MPa)
CP B1	41.750	5,62
CP B2	57.473*	5,19*
CP B3	43.331	5,82
CP B4	-	5,99
Média	42.540	5,81
Desvio padrão	1.118	0,19
Coeficiente de variação	2,6 %	3,19 %

* valor desprezado na estatística

Tabela I.13 Resistência à tração na flexão da Seção C aos 55 dias

Corpo de Prova	E (MPa)	f _{ctm} (MPa)
CP C1	28.536	5,12
CP C2	23.239	5,24
CP C3	44.221	6,00
CP C4	58.346*	5,27*
Média	31.999	5,45
Desvio padrão	10.911	0,48
Coeficiente de variação	34,1 %	8,82 %

* valor desprezado na estatística

Tabela I.14 Resistência à tração na flexão da Seção D aos 27 dias

Corpo de Prova	E (MPa)	f _{ctm} (MPa)
CP D1a	17.095	4,84
CP D1b	16.264	5,22
CP D2a	19.799	5,24
CP D2b	17.164	4,86
CP D3a	24.192	5,03
CP D3b	14.618*	5,66*
Média	18.903	5,04
Desvio padrão	3.242	0,19
Coeficiente de variação	17,1%	3,78%

* valor desprezado na estatística

Tabela I.15 Resistência à tração na flexão da Seção E aos 28 dias

Corpo de Prova	E (MPa)	f_{ctm} (MPa)
CP E1a	24.538	5,26
CP E1b	25.460	5,72
CP E2a	34.439*	5,28*
CP E2b	25.029	5,11
CP E3a	26.957	4,96
CP E3b	26.821	5,48
Média	25.761	5,31
Desvio padrão	1.081	0,30
Coefficiente de variação	4,2%	5,66%

* valor desprezado na estatística

Anexo II

Dados Coletados na Pista Experimental EPUSP para as Seções A, C e D

Tabela II.2 Todas as leituras da seção A - Placa A2

Data	Seção A - Placa A2																			NH								
	Temperatura Topo mínima				Inversão manhã				Fundo min				Temperatura Topo Máxima				Inversão Tarde				Fundo máxima				axas Elevação PCH		axas de Decréscimo PCH	
	hora	T, min	T f cor	DT min	hora	T inv.	hora	T, min	hora	T, máx	T f cor	DT máx	hora	T inv.	hora	T, máx	axas	Elevação	PCH		axas	Decréscimo	PCH	NH				
18/03/99	-	-	-	-	-	-	-	-	18,0	32,5	27,5	5,0	18,0	38,5	18,0	38,5	-	-	-	-	-	-	2,8					
19/03/99	7,5	22,0	22,5	-0,5	9,0	22,5	9,0	22,5	12,0	24,5	24,0	0,5	13,5	24,5	13,5	24,5	0,99	0,44	0,00	-0,22	0,00	0,0						
20/03/99	7,0	20,0	21,0	-1,0	8,0	20,5	8,0	20,5	15,0	25,5	23,0	2,5	16,0	24,0	16,0	24,0	0,89	0,26	-0,80	-0,20	0,0	0,0						
21/03/99	6,0	20,0	21,0	-1,0	9,0	21,0	9,0	21,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7						
28/01/99	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	42,0	36,5	5,5	17,5	38,0	17,5	38,0	-	-	-	-	-	-	9,9					
30/01/99	7,0	25,0	25,5	-0,5	7,5	25,5	7,5	25,5	14,5	38,0	32,5	5,5	17,5	33,0	17,5	33,0	1,71	0,75	-1,67	-0,56	7,1	0,0						
01/02/99	7,5	23,0	25,0	-2,0	8,0	25,0	8,0	25,0	15,0	42,5	34,0	8,5	18,5	35,0	18,5	35,0	2,80	0,95	-2,14	-0,74	8,8	0,0						
02/02/99	7,0	25,0	25,5	-0,5	8,0	25,0	8,0	25,0	15,0	47,5	36,0	11,5	18,5	39,0	18,5	38,0	2,81	1,24	-2,43	-0,81	9,7	0,0						
03/02/99	7,0	25,0	27,0	-2,0	8,0	27,0	8,0	27,0	13,5	45,0	35,0	10,0	17,0	37,0	17,0	37,0	3,08	1,11	-2,29	-0,83	6,0	0,0						
04/02/99	7,0	24,0	24,5	-0,5	8,0	24,5	8,0	24,5	15,0	40,0	32,5	7,5	19,0	33,0	19,0	33,0	2,00	0,77	-1,75	-0,54	sl	0,0						
06/02/99	7,0	24,0	26,0	-2,0	8,0	26,0	8,0	26,0	15,0	47,5	37,5	10,0	19,5	37,5	17,0	39,0	2,94	1,44	-2,22	-0,77	sl	0,0						
06/02/99	7,0	25,0	27,5	-2,5	8,0	27,5	8,0	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,9						
13/03/00	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	40,0	32,0	8,0	18,0	33,0	18,0	33,0	-	-	-	-	-	-	8,0					
14/03/00	6,0	22,0	24,5	-2,5	8,5	24,0	8,5	24,0	14,5	40,0	32,0	8,0	18,0	32,5	18,0	32,5	2,12	0,99	-2,14	-	6,7	0,0						
15/03/00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	36,0	30,0	6,0	17,5	32,0	17,5	32,0	-	-	-	-	-	-	2,7					
16/03/00	7,0	24,5	26,0	-1,5	8,0	26,0	8,0	26,0	13,0	36,0	30,0	6,0	14,0	31,0	14,0	31,0	1,92	0,93	-5,00	-0,32	6,0	0,0						
17/03/00	7,0	23,5	25,0	-1,5	8,5	25,0	8,5	25,0	15,0	37,5	31,0	6,5	18,0	31,5	18,0	31,5	1,75	0,58	-2,00	-0,44	3,6	0,0						
18/03/00	6,0	24,5	25,5	-1,0	7,5	25,5	7,5	25,5	12,0	36,0	28,0	7,0	13,5	29,0	13,5	29,0	1,75	0,58	-4,00	-0,32	sl	0,0						
19/03/00	7,0	22,0	23,0	-1,0	8,5	23,0	8,5	23,0	13,5	32,0	28,0	4,0	16,0	29,0	16,0	29,0	1,54	0,80	-1,20	-	sl	0,0						
20/03/00	6,0	22,0	24,0	-2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4						
18/04/00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	32,0	28,0	4,0	19,5	38,0	19,5	38,0	-	-	-	-	-	-	0,4					
19/04/00	6,0	25,0	25,0	0,0	8,0	25,0	8,0	25,0	15,0	34,0	29,0	5,0	20,0	38,5	15,0	29,0	1,00	0,57	-1,10	-0,33	sl	0,0						
20/04/00	7,0	22,0	23,5	-1,5	9,0	23,0	9,0	23,0	14,0	32,0	29,0	3,0	17,5	30,5	17,5	30,5	2,14	0,88	-1,86	-0,61	sl	0,0						
21/04/00	7,5	19,0	21,0	-2,0	9,0	21,0	9,0	21,0	15,0	36,0	28,0	7,0	17,5	29,0	17,5	29,0	2,13	0,94	-2,40	-0,45	sl	0,0						
22/04/00	6,0	19,5	22,0	-2,5	9,0	22,0	9,0	22,0	15,0	32,5	26,5	6,0	17,0	27,5	17,0	27,5	1,44	0,68	-2,50	-0,34	sl	0,0						
23/04/00	6,0	20,0	22,0	-2,0	9,0	22,0	9,0	22,0	15,0	34,0	27,5	6,5	17,0	27,5	17,0	27,5	1,96	0,68	-3,25	-0,37	sl	0,0						
24/04/00	4,5	19,0	20,5	-1,5	8,0	21,5	8,0	22,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sl	0,0					
12/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	20,5	15,0	22,5	20,0	2,5	19,0	20,5	19,0	20,5	-	-	-	-	-	3,0					
13/05/00	7,5	15,0	17,0	-2,0	9,0	17,0	9,0	17,0	14,0	26,0	20,0	6,0	10,0	21,5	10,0	21,5	1,89	-	-1,13	-0,30	5,1	0,0						
14/05/00	6,0	15,5	17,5	-2,0	9,0	17,5	9,0	17,0	15,0	27,5	21,0	6,5	19,0	21,0	16,5	22,5	1,33	0,73	-1,63	-0,30	7,5	0,0						
15/05/00	7,5	15,5	17,0	-1,5	9,0	17,0	9,0	17,0	14,0	27,0	20,0	7,0	19,0	20,5	16,5	22,0	1,77	0,50	-1,30	-0,30	6,9	0,0						
16/05/00	7,5	15,0	16,5	-1,5	9,0	16,0	9,0	17,0	15,0	27,5	20,5	7,0	19,0	21,5	17,0	22,5	1,67	0,58	-1,50	-0,42	7,5	0,0						
17/05/00	7,5	16,0	17,5	-1,5	8,5	17,0	8,5	16,0	14,0	27,0	20,0	7,0	24,0	20,5	18,0	22,5	1,69	0,58	-0,65	-0,38	sl	0,0						
18/05/00	7,0	16,5	18,0	-1,5	8,5	17,5	8,5	17,0	14,0	26,0	21,0	5,0	19,5	21,0	17,5	22,5	1,36	0,51	-0,91	-0,33	sl	0,0						
19/05/00	6,0	17,5	18,0	-0,5	8,5	17,5	8,5	17,5	14,0	27,5	22,0	5,5	19,5	22,5	16,5	23,0	1,25	0,68	-0,91	-0,33	3,4	0,0						
20/05/00	7,5	17,5	18,0	-0,5	9,0	18,0	9,0	17,5	14,5	27,0	22,0	5,0	20,5	21,5	16,5	23,0	1,36	0,73	-0,92	-0,29	3,2	0,0						
21/05/00	7,5	17,5	18,5	-1,0	10,0	18,5	10,0	18,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	0,0					
05/09/00	-	-	-	-	-	-	-	-	16,5	15,0	26,0	19,0	7,0	18,5	19,5	17,0	20,5	-	-	-	-	-	sl	0,0				
06/09/00	7,0	14,0	15,0	-1,0	8,0	15,0	8,0	-	15,0	27,5	21,0	6,5	20,5	20,5	17,0	22,0	1,89	-	-1,27	-0,50	sl	0,0						
07/09/00	7,0	17,5	17,5	0,0	7,0	17,5	7,0	15,0	15,0	30,0	22,5	7,5	19,0	23,0	17,0	24,0	1,58	0,90	-1,75	-0,42	5,5	0,0						
08/09/00	7,5	16,0	17,5	-1,5	8,5	17,0	8,5	17,5	14,0	30,0	22,5	7,5	18,5	24,0	18,5	24,0	2,15	0,85	-1,23	-0,52	8,5	0,0						
08/09/00	7,5	17,0	17,5	-0,5	8,0	17,5	8,0	17,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	0,0					
02/00/00	-	-	-	-	-	-	-	-	17,5	43,0	34,0	9,0	19,0	33,0	17,0	36,0	-	-	-	-	-	-	8,8	0,0				
03/00/00	7,0	22,5	24,0	-1,5	8,0	23,5	8,0	-	14,0	43,5	36,0	7,5	19,0	34,5	17,0	36,5	3,00	-	-1,80	-0,90	8,2	0,0						
04/00/00	6,5	24,5	26,5	-2,0	7,5	25,5	7,5	23,5	15,0	40,5	32,5	8,0	18,0	33,0	16,5	33,5	1,88	1,11	-2,50	-0,48	4,2	0,0						
05/00/00	7,0	22,0	24,0	-2,0	9,0	24,0	9,0	25,5	12,5	36,0	28,0	8,0	16,0	31,0	16,0	31,0	2,55	0,79	-1,43	-0,38	3,9	0,0						
06/00/00	7,5	22,0	23,0	-1,0	10,5	22,5	10,5	24,0	15,0	32,5	27,5	5,0	18,0	38,0	17,0	29,0	1,40	0,77	-1,50	-0,42	2,6	0,0						
07/00/00	7,0	19,0	22,0	-3,0	8,5	21,5	8,5	22,5	14,0	42,0	33,0	9,0	17,0	34,0	16,0	36,0	3,29	1,67	-2,67	-	sl	0,0						
08/00/00	7,0	22,0	24,0	-2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sl	0,0					
08/01/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,5	37,5	16,5	34,0	-	-	-	-	-	-0,65	sl	0,0			
08/01/00	6,0	23,0	25,5	-2,5	8,0	25,5	8,0	25,5	14,0	47,0	38,5	8,5	17,0	32,0	16,0	40,0	3,00	1,81	-2,67	-0,81	9,4	0,0						
10/01/00	6,5	26,0	28,0	-2,0	7,5	27,5	7,5	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,9	0,0					
04/01/01	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	55,0	40,0	15,0	n	n	16,5	42,0	-	-	-	-	-	-	-0,91	9,7	0,0			
06/01/01	4,5	30,0	28,0	2,0	n	n	8,5	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,8	0,0			
16/01/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,0	0,0		
17/01/01	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	7,6	0,0		
18/01/01	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	9,3	0,0		
19/01/01	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	9,9	0,0		
20/01/01	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	sl	0,0	
Mínimos	4,5	14,0	15,0	-3,0	7,8	19,8	7,8	15,8	12,8	22,5	19,8	9,5	13,5	19,5	13,5	20,5	0,6	0,4	-5,8	-4,9	-	-	-	-	-	0,0		
Máximos	7,5	38,0	20,0	2,0	10,5	27,5	10,5	27,5	16,8	55,0	40,8	15,8	24,8	39,8	19,5	42,8	3,3	1,8	8,8	4,2	-	-	-	-	-	0,0		

Tabela II.3 Todas as leituras da seção A - Placa A3

Data	Seção A - Placa A3																MHI						
	Temperatura Topo mínima				Temperatura Fundo mínima				Temperatura Topo Máxima				Temperatura Fundo máxima					Assas Elevação (°C/h)		Assas de Decréscimo (°C/h)			
	Hora	T (Lm)	T (Fce)	DT min	hora	T Inv.	hora	T F. min	Hora	T Lmáx	T Fce	DT máx	hora	T Inv.	hora	T F. máx		Topo	Fundo	Topo	Fundo		
16/10/99	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	32,0	20,5	11,5	ni	ni	18,0	22,5	-	-	-	-	0,37	2,8	
19/10/99	7,5	22,0	17,5	4,5	ni	ni	7,5	17,5	12,0	24,5	18,0	6,5	ni	ni	15,0	23,5	0,58	0,80	-	-	-0,49	0,0	
20/10/99	7,5	30,5	15,5	5,0	ni	ni	7,5	15,5	12,5	35,5	17,5	8,0	ni	ni	14,0	22,5	1,00	1,08	-	-	-0,47	0,0	
21/10/99	6,0	30,0	15,0	5,0	ni	ni	6,0	15,0	-	-	-	-	ni	ni	-	-	-	-	-	-	-	1,7	
25/11/99	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	43,5	30,5	13,0	-	-	17,0	32,0	-	-	-	-	-	-0,80	9,9
30/11/99	7,0	25,0	20,5	4,5	ni	ni	8,0	20,0	14,5	40,0	27,0	13,0	ni	ni	17,0	28,0	2,00	0,88	-	-	-0,71	7,1	
01/12/99	7,0	23,0	18,0	5,0	ni	ni	7,0	18,0	15,0	44,0	30,0	14,0	ni	ni	17,0	32,0	2,63	1,40	-	-	-0,86	8,8	
02/12/99	7,0	25,0	20,0	5,0	ni	ni	7,0	20,0	15,0	47,5	32,0	15,5	ni	ni	17,0	34,0	2,01	1,40	-	-	-0,85	9,7	
03/12/99	7,0	25,0	22,0	3,0	ni	ni	7,0	22,0	14,0	45,0	31,0	14,0	ni	ni	15,0	32,5	2,86	1,31	-	-	-0,78	6,0	
04/12/99	7,0	24,0	20,0	4,0	ni	ni	7,0	20,0	15,5	40,0	27,0	13,0	ni	ni	18,0	28,0	1,88	0,73	-	-	-0,62	ni	
06/12/99	7,0	24,0	20,0	4,0	ni	ni	7,0	20,0	15,0	47,5	32,5	15,0	ni	ni	18,0	35,0	2,24	1,36	-	-	-1,00	ni	
06/12/99	7,0	25,0	22,0	3,0	ni	ni	7,0	22,0	-	-	-	-	ni	ni	-	-	-	-	-	-	-	5,8	
13/03/00	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	40,0	25,0	15,0	-	-	16,5	27,5	-	-	-	-	-	-0,86	8,0
14/03/00	7,0	22,5	18,0	4,5	ni	ni	7,0	18,0	14,5	40,0	27,0	13,0	ni	ni	16,5	28,0	2,39	1,05	-	-	-	6,7	
15/03/00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	36,0	25,0	11,0	-	-	16,5	26,0	-	-	-	-	-	-0,36	2,7
16/03/00	7,0	25,5	20,5	5,0	ni	ni	9,0	20,0	13,0	36,5	24,5	12,0	ni	ni	14,5	25,5	1,80	1,00	-	-	-0,39	6,0	
17/03/00	7,0	24,0	19,0	5,0	ni	ni	7,0	19,0	15,5	37,0	25,0	12,0	ni	ni	16,5	26,5	1,53	0,79	-	-	-0,48	3,5	
18/03/00	6,0	25,0	20,0	5,0	ni	ni	6,0	20,0	12,0	36,0	22,5	13,5	ni	ni	13,0	24,0	1,89	0,57	-	-	-0,35	ni	
19/03/00	7,5	32,2	17,5	4,7	ni	ni	7,5	17,5	13,5	32,0	22,0	10,0	ni	ni	15,0	22,5	1,63	0,67	-	-	-	ni	
20/03/00	6,0	22,5	17,5	5,0	ni	ni	-	-	-	-	-	-	ni	ni	-	-	-	-	-	-	-	0,4	
18/04/00	-	-	-	-	-	-	-	-	15,5	33,0	24,0	9,0	-	-	16,5	24,5	-	-	-	-	-	-0,30	ni
19/04/00	7,5	25,0	20,0	5,0	ni	ni	7,5	20,0	14,0	35,0	24,0	11,0	ni	ni	16,5	25,0	1,54	0,58	-	-	-0,42	ni	
20/04/00	7,0	22,5	18,5	4,0	ni	ni	9,0	18,0	14,0	39,0	28,0	13,0	ni	ni	18,5	27,5	2,36	1,27	-	-	-0,67	ni	
21/04/00	7,5	30,0	17,0	3,0	ni	ni	9,0	16,5	14,0	37,5	24,5	13,0	ni	ni	16,5	25,0	2,59	1,27	-	-	-0,60	ni	
22/04/00	7,5	21,0	17,0	4,0	ni	ni	7,5	17,0	15,0	33,0	22,0	11,0	ni	ni	16,5	23,0	1,60	0,67	-	-	-0,48	ni	
23/04/00	7,0	30,5	16,0	4,5	ni	ni	7,0	16,0	14,0	37,5	24,0	13,5	ni	ni	16,0	25,0	2,43	1,00	-	-	-0,61	ni	
24/04/00	4,5	30,0	16,5	3,5	ni	ni	7,5	15,5	-	-	-	-	ni	ni	-	-	-	-	-	-	-	ni	
12/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	27,5	16,5	11,0	-	-	15,0	17,5	-	-	-	-	-	-0,30	3,0
13/05/00	7,5	17,0	12,5	4,5	ni	ni	7,5	12,5	14,0	30,0	19,0	11,0	ni	ni	16,5	20,0	2,00	0,83	-	-	-0,50	6,1	
14/05/00	7,5	17,0	12,5	4,5	ni	ni	7,5	12,5	14,5	30,0	19,5	10,5	ni	ni	16,5	20,5	1,86	0,89	-	-	-0,43	7,5	
15/05/00	7,5	17,0	12,5	4,5	ni	ni	7,5	12,5	14,0	31,0	20,0	11,0	ni	ni	15,5	20,5	2,15	1,00	-	-	-0,50	6,9	
16/05/00	7,5	17,0	12,5	4,5	ni	ni	7,5	12,5	14,0	30,5	20,0	10,5	ni	ni	16,5	21,0	2,08	0,84	-	-	-0,52	7,5	
17/05/00	7,5	17,5	13,0	4,5	ni	ni	9,0	12,5	14,0	32,0	20,0	12,0	ni	ni	15,0	20,5	2,23	1,33	-	-	-0,39	ni	
18/05/00	7,0	16,0	14,0	4,0	ni	ni	9,0	13,5	13,0	30,0	18,5	11,5	ni	ni	15,5	20,5	2,00	1,08	-	-	-0,41	ni	
19/05/00	6,0	19,0	14,5	4,5	ni	ni	6,0	14,5	13,5	29,0	18,0	11,0	ni	ni	16,0	20,0	1,20	0,55	-	-	-0,40	3,4	
20/05/00	7,0	18,0	14,0	4,0	ni	ni	7,0	14,0	13,5	29,5	17,5	12,0	ni	ni	16,5	20,0	1,77	0,63	-	-	-0,40	3,2	
21/05/00	7,5	16,0	14,0	4,0	ni	ni	7,5	14,0	14,0	25,0	15,5	9,5	ni	ni	-	-	1,08	-	-	-	-	3,7	
05/08/00	-	-	-	-	-	-	-	-	14,5	28,0	20,0	8,0	17,0	23,0	16,5	23,5	-	-	-	-	-2,00	-0,44	ni
06/08/00	7,0	15,0	17,0	-2,0	5,5	16,0	6,5	15,5	14,0	29,0	23,0	6,0	19,0	24,5	10,0	24,5	2,00	0,84	-1,13	-	-0,34	ni	
07/08/00	7,0	18,0	19,0	-1,0	10,0	19,0	10,0	19,0	15,0	31,0	25,0	6,0	17,0	26,0	17,0	26,0	1,63	1,00	-2,50	-	-0,48	5,5	
08/08/00	7,5	17,0	19,0	-2,0	9,5	19,0	8,5	18,5	14,0	32,5	26,0	6,5	17,0	27,5	17,0	27,5	2,38	1,06	-1,67	-	-0,44	8,5	
09/08/00	7,5	17,5	20,0	-2,5	10,0	20,0	10,0	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	
02/10/00	-	-	-	-	-	-	-	-	14,5	42,5	30,0	12,5	ni	ni	16,0	31,0	-	-	-	-	-	-0,50	0,0
03/10/00	6,0	22,5	22,5	0,0	ni	ni	9,0	21,5	14,0	42,5	30,0	12,5	ni	ni	16,5	32,5	2,50	1,47	-	-	-0,63	8,2	
04/10/00	6,0	24,5	24,0	0,5	ni	ni	6,0	24,0	15,0	40,0	28,0	12,0	20,0	27,5	16,5	30,0	1,72	0,57	-2,50	-	-0,59	4,2	
05/10/00	6,0	22,5	22,0	0,5	ni	ni	6,0	22,0	12,5	37,5	26,5	11,0	ni	ni	15,0	28,0	2,31	0,62	-	-	-0,39	3,8	
06/10/00	6,0	22,0	21,5	0,5	ni	ni	9,0	21,0	15,0	32,5	25,0	7,5	ni	ni	17,0	27,0	1,17	0,75	-	-	-0,57	2,5	
07/10/00	6,5	19,0	19,0	0,0	7,0	19,0	7,0	19,0	14,0	42,0	30,0	12,0	ni	ni	16,5	32,0	3,07	1,37	-	-	-	ni	
08/10/00	7,0	22,0	22,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ni	
08/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,5	34,0	-	-	-	-	-	-0,83	ni
08/11/00	6,0	23,0	22,0	1,0	ni	ni	7,5	21,5	14,0	45,0	33,0	13,0	ni	ni	16,5	34,5	2,88	1,44	-	-	-0,70	9,4	
10/11/00	6,5	26,0	24,0	2,0	ni	ni	7,5	24,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,9	
04/01/01	-	-	-	-	-	-	-	-	15,0	47,5	35,5	12,0	23,0	32,0	17,0	36,0	-	-	-	-	-1,84	-0,79	9,7
05/01/01	6,0	24,5	25,0	-0,2	7,5	24,5	7,5	24,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,8	
16/01/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,0	
17/01/01	7,5	27,5	25,0	2,5	ni	ni	7,5	25,0	14,0	47,0	33,0	14,0	15,0	35,0	15,0	35,0	3,00	1,33	-5,00	-	-0,71	7,6	
18/01/01	6,0	25,0	24,0	1,0	ni	ni	8,0	23,0	14,5	45,0	34,0	11,0	ni	ni	17,0	35,0	2,35	1,33	-	-	-0,69	9,3	
19/01/01	7,5	30,0	25,0	3,0	ni	ni	7,5	25,0	14,0	45,0	34,0	11,0	ni	ni	15,0	35,0	2,82	1,33	-	-	-0,81	9,8	
20/01/01	6,0	27,0	24,8	2,2	ni	ni	7,5	25,0	15,0	45,5	35,5	11,0	-	-	-	-	2,17	-	-	-	-	ni	
Minimos	4,5	15,0	12,5	-2,5	7,0	16,0	6,0	12,5	12,0	24,5	15,5	6,0	16,0	23,0	13,0	17,5	0,6	0,6	-6,0	-	-1,0	-	
Maximos	7,5	28,0	25,0	5,0	18,0	24,5	10,0	25,0	15,5	47,5	35,5	15,5	23,0	35,0	38,0	36,0	3,1	1,5	-1,1	-	0,3	-	

Tabela II.7 Todas as leituras da seção D – Placa D2d

Data	Seção D - Placa D2 - Posição d												T. elevação (C/N)	Taxa de Decréscimo (C/N)	HH	C/DH							
	Temperatura Topo mínima			Inversão manhã			Temperatura Topo Máxima			Inversão tarde							T. elevação	Fundo	Taxa de Decréscimo (C/N)	HH	C/DH		
	Hora	T. (mín)	T. (c/n)	DT (mín)	Hora	T. (mín)	Hora	T. (c/n)	DT (mín)	Hora	T. (mín)	Hora										T. (c/n)	DT (mín)
03/11/99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
04/11/99	7,0	22,5	27,0	-4,5	9,0	25,5	9,0	26,5	13,5	39,5	29,0	11,5	19,0	30,0	19,0	21,0	2,82	0,55	-1,36	-0,29	9,8		
05/11/99	7,0	25,0	29,0	-3,0	10,5	27,5	10,5	27,5	14,5	39,0	29,0	5,0	15,0	29,0	16,0	29,0	1,07	0,27	-2,67	-0,26	6,0		
06/11/99	7,0	19,5	26,0	-5,5	11,5	24,0	11,5	26,0	15,0	30,0	27,0	3,0	15,0	27,5	18,0	27,5	1,31	0,54	-0,63	-0,26	al		
07/11/99	6,0	17,0	24,0	-7,0	5,5	23,5	9,5	23,5	14,5	37,0	27,5	9,5	19,5	30,0	18,5	30,0	2,35	0,72	-1,75	-0,39	al		
08/11/99	7,0	19,0	25,0	-6,0	9,5	25,0	9,5	25,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,2		
13/12/99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,2	
14/12/99	6,0	19,0	21,0	-2,0	9,0	21,0	9,0	21,0	15,0	30,0	24,0	6,0	15,0	25,0	19,0	25,0	1,22	0,40	-1,25	-0,14	2,6		
15/12/99	6,0	20,0	23,0	-3,0	9,0	23,0	9,0	23,0	15,5	34,0	27,5	5,5	15,5	29,0	21,0	29,5	1,32	0,54	-1,67	-0,42	9,9		
16/12/99	7,5	20,0	24,5	-4,5	9,0	24,5	9,0	24,5	15,0	39,0	29,0	10,0	19,5	32,5	21,0	33,0	2,53	0,71	-1,44	-0,45	10,1		
17/12/99	7,5	22,0	27,0	-5,0	9,5	27,0	9,5	27,0	15,0	40,0	31,0	9,0	-	-	-	2,40	-	-	-	-	10,1		
27/03/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9	
28/03/00	7,0	22,5	26,5	-3,0	9,0	26,0	9,0	26,0	13,5	38,0	28,5	3,5	15,5	27,5	18,5	27,5	1,15	0,33	-0,83	-0,29	0,4		
29/03/00	6,0	20,5	24,0	-3,5	9,0	24,0	9,0	24,0	12,0	22,5	23,0	0,5	9,0	16,0	23,5	0,33	0,13	-	-	-	5,0		
30/03/00	6,0	18,0	22,5	-3,5	9,5	22,5	9,5	22,5	14,0	28,5	24,0	4,5	17,5	25,0	18,5	26,5	1,15	0,44	-0,71	-0,21	0,0		
31/03/00	6,0	20,0	24,0	-4,0	9,0	23,5	9,0	23,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,8		
01/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	12,0	33,0	25,0	8,0	15,0	27,0	19,0	27,5	-	-	-1,90	-	al		
04/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	al		
14/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	14,5	30,0	22,5	7,5	15,0	25,0	18,0	25,0	-	-	-1,43	-0,25	al		
16/05/00	7,0	17,5	21,5	-4,0	10,0	21,0	10,0	21,0	13,0	30,0	22,0	9,0	15,0	25,0	18,0	25,0	2,09	0,60	-1,00	-0,19	al		
17/05/00	3,5	21,5	27,0	-1,5	7,5	22,5	10,5	22,0	14,5	27,5	23,0	4,5	17,5	24,0	17,5	24,0	0,99	0,29	-1,17	-0,29	al		
18/05/00	8,0	15,0	20,0	-5,0	10,0	19,5	10,0	19,5	14,0	30,0	22,0	6,0	17,0	24,0	17,0	24,0	2,50	0,64	-2,00	-0,22	al		
19/05/00	7,5	16,5	20,0	-3,5	11,0	20,0	11,0	20,0	13,5	27,0	21,0	6,0	16,5	22,5	16,5	22,5	1,75	0,46	-1,50	-0,17	al		
20/05/00	7,0	17,0	20,0	-3,0	12,0	20,0	10,5	19,5	15,5	23,0	21,0	3,0	17,0	22,0	17,0	22,0	0,71	0,39	-0,67	-0,18	al		
21/05/00	7,0	16,5	19,0	-2,5	9,5	19,0	9,5	19,0	13,5	26,0	21,0	5,0	17,0	22,0	18,0	22,5	1,46	0,41	-1,14	0,09	al		
22/05/00	7,5	14,5	23,5	-9,0	9,5	23,0	9,5	23,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	al		
29/05/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	
20/07/00	8,0	8,0	14,0	-8,0	10,0	13,5	10,0	13,5	14,0	22,5	16,0	6,5	17,0	18,0	17,0	18,0	2,42	0,64	-1,50	-0,26	8,1		
21/07/00	8,0	6,5	13,0	-6,5	10,0	12,5	10,0	13,5	15,5	22,5	15,5	6,0	17,5	18,0	17,5	18,0	2,13	0,60	-2,26	-0,14	7,2		
22/07/00	7,5	12,5	18,0	-3,5	11,0	15,5	11,0	15,5	15,0	21,0	17,5	3,5	17,5	19,0	17,5	19,0	1,13	0,54	-0,80	-	al		
05/09/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	
06/09/00	7,5	17,0	19,0	-2,0	12,0	19,0	12,0	19,0	14,5	22,5	19,5	3,0	15,5	20,5	16,5	20,5	0,79	0,33	-1,00	-0,09	9,0		
07/09/00	7,5	16,0	19,0	-3,0	9,5	19,0	9,5	19,0	15,0	29,0	21,0	8,0	17,5	23,5	17,5	23,5	1,73	0,66	-2,20	-0,29	2,0		
08/09/00	4,5	15,0	20,0	-5,0	9,0	19,0	9,0	19,0	13,0	29,0	21,5	7,5	17,5	24,0	17,5	24,0	1,86	0,69	-1,11	-0,29	al		
09/09/00	7,0	17,0	21,0	-4,0	9,0	21,0	9,0	20,5	13,5	31,0	22,5	8,5	17,5	26,0	17,5	26,0	2,15	0,65	-1,26	-0,26	al		
10/09/00	7,0	17,0	21,0	-4,0	9,0	20,5	9,0	20,5	15,0	36,0	25,5	9,5	19,5	28,0	18,5	28,0	2,25	0,79	-2,00	-0,31	al		
11/09/00	7,0	20,0	24,0	-4,0	9,0	23,5	9,0	23,5	14,0	36,5	26,5	10,0	19,5	30,0	18,5	30,0	2,36	0,69	-1,44	-0,34	8,8		
12/09/00	8,0	20,0	25,0	-5,0	13,5	23,5	13,5	23,5	15,5	25,0	24,0	1,0	15,0	24,5	18,0	25,0	0,77	0,37	-0,70	-0,22	0,0		
13/09/00	6,0	17,5	22,0	-4,5	10,0	21,5	10,0	21,5	13,5	29,0	24,0	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	al		
28/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,46	al
29/11/00	7,0	22,5	27,0	-4,5	9,0	26,5	9,0	26,5	14,0	42,0	30,5	11,5	19,0	33,5	19,0	33,5	2,79	0,64	-1,70	-0,46	al		
30/11/00	6,0	22,5	28,0	-5,5	9,0	27,5	9,0	27,5	13,0	37,5	28,0	9,5	14,5	30,0	15,0	30,5	2,14	0,43	-5,00	-0,20	al		
01/12/00	7,0	22,0	27,0	-5,0	13,0	26,0	13,0	26,0	14,5	28,5	26,5	2,0	15,0	27,0	17,5	27,5	0,87	0,37	-1,00	-0,22	al		
02/12/00	8,0	20,0	24,5	-4,5	9,5	24,0	9,5	24,0	14,0	36,5	26,5	9,0	15,5	24,5	18,5	24,5	1,93	0,60	-2,44	-0,11	al		
03/12/00	6,0	23,5	28,5	-3,0	8,5	26,0	8,5	26,0	14,0	44,0	31,0	13,0	15,0	34,0	19,0	34,0	2,56	0,76	-2,00	-0,34	al		
04/12/00	9,0	25,0	29,5	-3,5	12,5	29,0	12,5	29,0	13,5	34,0	30,0	4,0	15,5	29,0	16,5	29,5	2,00	0,38	-2,50	-0,24	al		
05/12/00	6,0	23,0	28,0	-3,0	9,0	26,5	9,0	26,5	14,0	32,0	27,5	4,5	17,5	29,0	17,5	29,0	1,13	0,29	-1,14	-0,19	3,5		
06/12/00	6,0	20,0	25,5	-5,5	9,5	25,0	9,5	25,0	15,0	36,0	28,0	9,0	16,5	30,0	16,5	30,0	1,80	0,56	-2,40	-0,26	6,8		
07/12/00	6,0	20,0	25,5	-5,5	10,5	25,0	10,5	25,0	14,0	42,0	29,0	13,0	15,5	32,5	18,5	32,5	2,79	0,69	-1,69	-0,43	7,3		
08/12/00	6,5	24,0	29,0	-4,0	8,5	27,5	8,5	27,5	13,0	42,5	30,0	12,5	16,0	34,0	18,5	34,0	2,86	0,66	-1,70	-0,43	9,4		
09/12/00	6,0	24,0	29,0	-5,0	9,0	28,0	9,0	28,0	14,0	44,0	32,5	11,5	19,0	35,0	19,0	35,0	2,50	0,64	-1,80	-0,38	al		
10/12/00	6,0	26,0	30,0	-4,0	9,0	29,5	9,0	29,5	11,0	37,5	30,0	7,5	17,5	31,0	17,5	31,0	2,30	0,37	-1,00	-0,22	al		
11/12/00	6,0	21,5	27,5	-6,0	9,0	26,0	9,0	26,0	15,0	41,0	32,0	9,0	19,5	33,5	18,5	33,5	2,17	0,79	-2,14	-0,41	8,9		
12/12/00	7,0	24,0	28,5	-4,5	8,0	28,0	8,0	28,0	13,5	42,5	31,5	11,0	19,0	34,0	18,0	34,0	2,95	0,60	-1,89	-0,36	7,8		
13/12/00	7,0	25,5	29,5	-4,0	8,0	29,0	8,0	29,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0		
05/02/01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	5,2
06/02/01	6,0	23,0	29,0	-6,0	10,0	28,0	10,0	28,0	14,0	40,0	30,0	10,0	17,0	33,0	15,5	33,5	2,13	0,65	-2,33	-0,30	6,5		
07/02/01	8,0	24,5	29,0	-3,5	11,0	28,0	11,0	28,0	18,5	39,0	30,0	3,0	19,5	31,0	18,0	31,0	0,81	0,29	-1,00	-0,20	9,3		
08/02/01	6,0	25,0	29,0	-3,0	9,0	29,0	9,0	29,0	15,0	41,0	32,0	9,0	19,0	34,0	18,5	34,0	1,79	0,32	-1,75	-0,29	al		
09/02/01	6,0	27,5	30,5	-3,0	9,0	30,0	9,0	30,0	10,0	30,0	30,0	0,0	9,0	9,0	21,0	29,0	0,63	0,33	-	-0,10	al		
10/02/01	6,0	24,0	27,5	-3,5	11,5	27,5	11,5	27,5	14,0	36,0	28,0	8,0	17,0	30,0	17,0	30,0	1,80	0,37	-2,00	-0,63	al		
11/02/01	6,0	23,5	27,0	-3,5	11,5	27,0	11,5	27,0	13,0	42,0	32,0	10,0	19,5	34,0	18,5	34,0	2,06	1,14	-2,29	-0,38	al		
12/02/01	6,0	25,0	29,5	-4,5	7,5	29,0	7,5	29,0	13,5	42,5	32,5	10,0	15,0	34,0	17,0	34,5	2,33	0,58	-3,40	-0,28	6,5		
13/02/01	6,0	24,0	28,5	-4,5	10,0	28,0	10,0	28,0	14,0	36,5	30,0	5,5	17,0	32,0	17,0	32,0							

VITA

Andréa Arantes Severi, nascida em 03 de agosto de 1.972, em Brodowski, Estado de São Paulo, é engenheira civil graduada em 1.994 pela Instituição Moura Lacerda de Ribeirão Preto. Obteve o grau de Mestre em Engenharia na Escola de Engenharia de São Carlos em 1.997.

De 1.994 a 1.995 trabalhou na Prefeitura Municipal de Brodowski como fiscal de obras e projetos e em 1.996 acompanhou a obra de execução do pátio de taxiamento do Aeroporto Leite Lopes de Ribeirão Preto.

Ingressou no programa de doutorado em 1.997 da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, engajando-se em um projeto de pesquisa de efeitos do clima tropical sobre pavimentos de concreto de cimento Portland financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) ao Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Nesta pesquisa participou da elaboração do projeto, administração e execução das pistas experimentais e principalmente da fase de coleta e análise de dados. Foi bolsista da CAPES (Coordenação para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) durante quatro anos e realizou neste período um estágio no exterior fomentado por esta fundação no laboratório da *Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton* (TFB), em Wildegg, na Suíça, entre os meses de maio e setembro de 2.000. Ainda durante o doutorado participou do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE).

Atualmente é professora da Universidade Presbiteriana Mackenzie ministrando aulas de Geologia da Engenharia, Estradas I e Estradas II e também trabalha como engenheira de projetos na empresa VETEC Engenharia S/C Ltda, sendo responsável pelas atividades relacionadas à pavimentação, tendo participado do projeto de implantação do Anel Viário Magalhães Teixeira em Campinas, do projeto executivo do Rodoanel Mário Covas em São Paulo, do projeto de pavimentação terminais de ônibus de Campo Limpo e Capão Redondo e do projeto de duplicação da Rodovia Padre Manoel da Nóbrega (SP-55) no trecho Peruíbe e Miracatu.