

Deividi da Silva Pereira

Engenheiro Civil, UFSM, 1998

**ESTUDO DE GRADIENTES TÉRMICOS E DEFORMAÇÕES
EM *WHITETOPPING* ULTRADELGADO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
José Tadeu Balbo



São Paulo
2001

***“A cada passo dado devemos nos lembrar
que este é fruto do efeito sinérgico de
todos os músculos do nosso corpo.”***

A Deus, por ter me colocado à frente de grandes desafios e provas que tanto contribuíram para meu crescimento pessoal, grande legado deste trabalho. Também agradeço a Ele, por ter me oferecido o convívio de seres humanos fantásticos, sem os quais jamais teria conseguido dar este primeiro passo para uma futura carreira docente.

A minha família, *José Valmir, Neuza, Deise e Carla*, que apesar da distância física, sempre se mostraram presentes nesta e em outras etapas da minha vida, oferecendo-me a dose exata de amor e compreensão de que tanto necessitava. Vocês são a fonte da minha força e vontade de superar os obstáculos. Devo a vocês tudo o que consegui e serei eternamente grato a Deus por ter me agraciado com o convívio fraterno de nossa família. Obrigado por muitas vezes terem renegado suas vontades em detrimento das minhas e por me mostrar como uma família com bases sólidas pode ser formada mesmo em meio às mais diversas dificuldades e carências, mas nunca a ausência de amor. Em vocês tenho o referencial para a construção da minha futura família. Amo vocês!

Aos meus *parentes*, sempre presentes na minha vida, pela torcida e carinho dispensados.

A todos meus professores, personificados aqui pela Prof.a “*Tia*” *Tânia*, Prof. *Sílvio*, Prof. *Brondani* e Prof. *Balbo* que, em diferentes tempos da minha vida, mostraram-me a importância do professor no desenvolvimento da sociedade, ensinando-me que o verdadeiro papel do educador é a formação de cidadãos engajados com o mundo que o cerca.

Às famílias *Trindade* e *Peixoto* pelo auxílio oferecido no início da caminhada em Santa Maria, sem o qual a jornada teria sido duplamente difícil.

À família *Dini*, por terem transposto a mim todo carinho que sentiam pelos meus pais na juventude. Pela acolhida fraterna e decisiva para a adaptação de um “*guri*” do interior do Rio Grande do Sul na cidade grande. Pelo ombro amigo, que muitas vezes encharcados de lágrimas, suprimam a ausência física dos meus pais e mostraram-me o caminho, dando-me a força necessária para a continuidade do trabalho.

Aos amigos *Balbo, Angela, André “Deco-leco” e Fabrizia “Princesinha”*, que com seus grandes corações, tornaram-me mais um membro de sua família, alegrando-me com suas companhias regadas de muito carinho, caipirinhas e batidinhas em inúmeros finais de semana que me faziam sentir em casa. Em ti, Prof. Amigo *Balbo*, conheci o novo conceito de professor, desprovido de vaidades, adepto ao trabalho em equipe, preferindo o “*nós*” ao “*eu*”. Também descobri que um professor pode ser amigo, simples, brincalhão, parceiro e, mesmo assim, nunca deixará de ser um exemplo a ser seguido e respeitado, seja pela parte técnica ou, principalmente, pela parte humana.

Aos colegas do LMP, *Alexandre Peres, André Guerreiro, Andréa Severi, Marcos Rodolfo*, e às “*agregadas*” *Ana Carolina e Márcia Aps*, que transformaram o ambiente de trabalho em algo divertido e cativante, muitos dos quais transcenderam o coleguismo, tornando-se verdadeiros e fiéis amigos, tanto nos momentos difíceis quanto naqueles mais descontraídos.

Aos amigos *Alex Carvalho, André Beninni, Daniel Aldigueri e Telmo Deifeld*, pelo apoio e companheirismo.

Em fim, ofereço a todos aqueles que aqui foram lembrados e aqueles que, por ventura, foram esquecidos mas que constituem-se nos “*músculos*” do meu corpo. A vocês, minha eterna gratidão e desejo de retribuir a ajuda recebida.

Sumário

Sumário.....	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Abreviaturas.....	ix
Resumo	x
Abstract	xi
Introdução e Objetivos	1
Capítulo 1 Revisão Bibliográfica.....	3
1.1 Considerações Iniciais	3
1.1.1 <i>Whitetopping</i> Ultradelgado (WTUD)	5
1.1.2 Histórico.....	5
1.1.3 Aspectos Relacionados ao Desempenho.....	6
1.1.3.1 Aderência.....	7
1.1.3.2 Dimensões da Placa	11
1.1.3.3 Espessura de Concreto Asfáltico Remanescente.....	13
1.1.3.4 Integridade do Concreto Asfáltico	14
1.1.3.5 Tráfego.....	15
1.1.3.6 Tipo de Concreto.....	16
1.1.3.7 Gradiente Térmico Presente no WTUD.....	21
1.1.3.8 Execução	26
1.2 Desempenho Observado em Experiências Anteriores	27
1.2.1 Experiência Americana	27
1.2.2 Experiência Mexicana	34
1.2.3 Experiência Canadense	36
1.2.4 Experiência Européia	37
1.2.5 Experiência Brasileira.....	38
1.3 Experiências Instrumentadas.....	42
Capítulo 2 Método de Pesquisa.....	48
2.1 Pista Experimental	48
2.1.1 Projeto Inicial da Pista Experimental de WTUD	48
2.1.2 Projeto Definitivo da Pista Experimental de WTUD.....	48
2.1.3 Execução da Pista Experimental de WTUD.....	50
2.1.4 Controle Tecnológico	54
2.2 Monitoração de Campo	57
2.2.1 Esquema de Coleta de Dados	57
2.2.2 Pesquisa de Dados Climáticos.....	59
2.2.3 Impacto da Insolação nas Leituras	60
2.2.4 Perfil	61
2.2.5 ICP	62
2.2.6 Provas de Carga.....	64

Capítulo 3 Resultados Obtidos.....	68
3.1 Temperaturas.....	68
3.2 Gradientes Térmicos.....	74
3.3 ICP.....	79
3.4 Perfil	79
3.5 Provas de Carga.....	81
Capítulo 4 Análise dos Resultados.....	83
4.1 Temperaturas.....	83
4.1.1 Temperaturas durante o Outono.....	83
4.1.2 Temperaturas durante o Inverno	84
4.1.3 Temperaturas durante a Primavera	84
4.1.4 Temperaturas durante o Verão.....	85
4.2 Gradientes Térmicos.....	86
4.2.1 Análise dos Gradientes de Outono	86
4.2.2 Análise dos Gradientes de Inverno	88
4.2.3 Análise dos Gradientes de Primavera.....	89
4.2.4 Análise dos Gradientes de Verão	90
4.3 Tipificação de Dados Térmicos nas Placas em Estações Climáticas	91
4.4 Deformações devido ao Empenamento.....	97
4.5 ICP.....	98
4.6 Perfil	99
4.7 Provas de Carga.....	99
4.8 Análise de Deflexões	101
Conclusões.....	104
Agradecimentos.....	106
Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1.1 Efeito da Aderência sobre a Posição da Linha Neutra (LN)	9
Figura 1.2 Efeito Bloco Proporcionado por Placas de Pequenas Dimensões	14
Figura 1.3 Empenamento das Placas de Pavimentos Convencionais de CCP	25
Figura 1.4 Detalhes do WTUD executado em <i>Loisville, Kentucky</i>	33
Figura 1.5 Projeto do WTUD utilizado em <i>Ellaville, Flórida</i>	36
Figura 1.6 Esquema de Instrumentação do WTUD experimental no Japão	52
Figura 1.7 Posição dos <i>Strain-Gages</i> nas placas instruentadas em <i>Guasave</i>	53
Figura 1.8 Posições das Cargas na Prova de Carga	54
Figura 2.1 Localização dos Pontos Passíveis de Execução do WTUD	56
Figura 2.2 Bacia de Campo x Bacia Retroanalísada	57
Figura 2.3 Projeto Geométrico das Placas de WTUD	60
Figura 2.4 Planta da Localização aproximada dos Instrumentos	61
Figura 2.5 Localização dos PT-100 em Perfil	61
Figura 2.6 Localização dos <i>Strain-Gages</i> em Perfil	62
Figura 2.7 Distribuição Gráfica da Temperatura e Umidade Relativa durante a Concretagem	64
Figura 2.8 Variação da Temperatura do CCP no Topo e no Fundo durante a Concretagem	67
Figura 2.9 Detalhe das “quedas” de gradientes térmicos	68
Figura 2.10 Posição Solar da Pista Experimental de WTUD	69
Figura 2.11 <i>Dipstick</i> medindo a Irregularidade Longitudinal no WTUD	70
Figura 2.12 Deformações de Canto nas placas da Seção A entre os dias 15 e 22/06/2000	73
Figura 2.13 Esquema do Posicionamento dos ESRS e ESRD nas Provas de Carga	75
Figura 3.1 Perfil Longitudinal da Seção A	85
Figura 3.2 Perfil Longitudinal da Seção B	89
Figura 4.1 Variação Típica da Temperatura no Outono	92
Figura 4.2 Variação Típica da Temperatura em um dia frio de Inverno	93
Figura 4.3 Evolução das Temperaturas de Topo e Fundo na Primavera	94
Figura 4.4 Elevação e Decréscimo das Temperaturas durante o Verão	95
Figura 4.5 Variação Típica do Gradiente Térmico no Outono	97
Figura 4.6 Variação do Gradiente Térmico no dia mais frio de Inverno	99
Figura 4.7 Variação do Gradiente Térmico durante a Primavera	100
Figura 4.8 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Frio	105
Figura 4.9 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Quente	106
Figura 4.10 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Sem Oscilação Térmica	106
Figura 4.11 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante uma Chuva Tropical	106
Figura 4.12 Pico de Deformação coincidente com o Pico da Temperatura de Topo	108
Figura 4.13 Pico de Deformação ocorrendo antes do Pico da Temperatura de Fundo	109
Figura 4.14 Pico de Deformação ocorrendo antes do Pico de Gradiente Térmico	109
Figura 4.15 Posição aproximada das Rodas na Prova de Carga Dinâmica da placa A27	112
Figura 4.16 Linhas de Influência dos Eixos sobre a Deformação nos <i>strain-gages</i> da placa A27	113
Figura 4.17 Linha de Influência Longitudinal da Carga	114

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Uso de pavimentos em CCP no mundo	4
Tabela 1.2 Concreto aplicado na Flórida, em <i>Gainesville</i>	21
Tabela 1.3 Características do concreto empregado na I-10 Flórida	22
Tabela 1.4 Traço volumétrico do CCP utilizado na <i>Iowa Highway 21</i>	22
Tabela 1.5 CCP utilizado em <i>Missouri</i> (Fonte: Mack et al, 1997)	23
Tabela 1.6 Concreto empregado na <i>Swedish National Road 255</i> , Suécia, em 1993	23
Tabela 1.7 Características do CCP empregado na <i>Virginia</i> , EUA	24
Tabela 1.8 Consumo de Fibra e Resistência para o surgimento da primeira fissura no CP	24
Tabela 1.9 Tensão (MPa) devido ao Gradiente Térmico	29
Tabela 1.10 Características das Pistas em <i>Gainesville</i>	34
Tabela 1.11 Percentagem de Placas Defeituosas, em novembro de 1996, na <i>Iowa Highway</i>	38
Tabela 1.12 Configuração das Placas em <i>Tijuana</i>	40
Tabela 1.13 Características Geométricas das Placas de WTUD empregas na Castelo Branco	45
Tabela 1.14 Resistências Médias obtidas para o CCP empregado na Castelo Branco	46
Tabela 1.15 Total de Dias decorridos para o surgimento dos índices de fissuração do Trecho 1	47
Tabela 1.16 Total de Dias decorridos para o surgimento dos índices de fissuração do Trecho 2	47
Tabela 1.17 Recomendações de apoio à decisão de emprego de WTUD	49
Tabela 1.18 Condições de juntas das placas instrumentadas em <i>St. Louis, Missouri</i>	51
Tabela 2.1 Matriz Decisória para Implantação do WTUD	57
Tabela 2.2 Características do Concreto empregado no Experimento	58
Tabela 2.3 Condições de Temperatura e Umidade Relativa durante a Concretagem	63
Tabela 2.4 Resistência à Compressão Simples do Concreto aos 7 dias	64
Tabela 2.5 Resistência à Compressão Simples do Concreto aos 25 dias	65
Tabela 2.6 Resistência à Tração na Flexão do Concreto aos 7 dias	65
Tabela 2.7 Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade do Concreto aos 29 dias	65
Tabela 2.8 Quantitativos de Instrumentos por Placas	66
Tabela 2.9 Síntese dos levantamentos realizados para obtenção do ICP nos EUA	72
Tabela 2.10 Classificação do estado da via de acordo com o ICP	72
Tabela 2.11 Coordenadas do Centro da Roda Externa dos Eixos nas Provas de Carga	74
Tabela 3.1 Temperaturas de Outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)	76
Tabela 3.2 Temperaturas de Outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)	77
Tabela 3.3 Temperaturas de Inverno no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)	78
Tabela 3.4 Temperaturas de Inverno no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)	79
Tabela 3.5 Temperaturas de Primavera no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)	80
Tabela 3.6 Temperaturas de Primavera no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)	81
Tabela 3.7 Temperaturas de Verão no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)	81
Tabela 3.8 Temperaturas de Verão no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)	82
Tabela 3.9 Gradientes de Outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A	82
Tabela 3.10 Gradientes de Outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B	83
Tabela 3.11 Gradientes de Inverno no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A	84
Tabela 3.12 Gradientes de Inverno no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B	85
Tabela 3.13 Gradientes de Primavera no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A	86
Tabela 3.14 Gradientes de Primavera no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B	87
Tabela 3.15 Gradientes de Verão no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A	87
Tabela 3.16 Gradientes de Verão no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B	88
Tabela 3.17 Tabela Comparativa entre Tensões Simuladas e Medidas em Campo	91
Tabela 4.1 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Outono - Seção A	96
Tabela 4.2 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Outono - Seção B	97
Tabela 4.3 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Inverno - Seção A	98
Tabela 4.4 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Inverno - Seção B	98
Tabela 4.5 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Primavera - Seção A	100
Tabela 4.6 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Primavera - Seção B	100
Tabela 4.7 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Princípio do Verão - Seção A	101
Tabela 4.8 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Princípio do Verão - Seção B	101
Tabela 4.9 Temperaturas e Gradientes Térmicos nas Seções A e B medidos ao mesmo Tempo	102
Tabela 4.10 Frequências de Ocorrência das Faixas de Gradientes Térmicos – Seção A e B –	102
Tabela 4.11 Temperaturas e Gradientes Térmicos durante Dias Típicos de cada estação	103

Lista de Abreviaturas

2-D	Modelo em duas dimensões
3-D	Modelo em três dimensões
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACPA	<i>American Concrete Pavement Association</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CCP	Concreto de Cimento Portland
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ESRS	Eixo Simples de Rodas Simples
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
EUA	Estados Unidos da América
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDOT	<i>Florida Department of Transportation</i>
Iowa DOT	<i>Iowa Department of Transportation</i>
KRMCA	<i>Kentucky Ready-Mix Concrete Association</i>
LMP-EPUSP	Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da USP
LN	Linha Neutra
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PCO	Prefeitura da Cidade Universitária
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
QI	Quociente de Irregularidade
USACE	United States Army Corps of Engineers
USP	Universidade de São Paulo
WT	<i>Whitetopping</i> Convencional
WTUD	<i>Whitetopping</i> Ultradelgado

Resumo

Propiciado pela construção de uma pista experimental inteiramente instrumentada com medidores de deformação e de temperatura na Cidade Universitária, este trabalho buscou o entendimento de inúmeros fatores intervenientes no desempenho do *whitetopping* ultradelgado, recente técnica de manutenção de pavimentos asfálticos com a utilização de delgadas placas de concreto, sob tráfego característico urbano, em condições tipicamente tropicais de uso, sobre uma pequena espessura de concreto asfáltico remanescente de fresagem.

Com o intuito de nortear o problema em questão, além da revisão bibliográfica, foram realizados levantamentos periódicos das condições estruturais e funcionais deste pavimento; leituras contínuas de temperaturas e deformações obtidas por meio de um sistema automatizado de captação de dados junto aos instrumentos colocados no interior das placas; caracterização dos gradientes térmicos presentes nas placas durante as diferentes estações climáticas do ano.

Foram realizadas provas de carga, estáticas e dinâmicas, com intuito de verificar os reais níveis de deformação aos quais as placas estariam sujeitas quando da interação com o tráfego; posteriormente, realizou-se modelagem numérica por meio de um programa de elementos finitos objetivando uma comparação com os dados obtidos nas provas de carga, analisando inclusive o posicionamento da linha neutra neste pavimento composto. Por fim, em uma sucinta abordagem sobre as deflexões antes e depois da execução do *whitetopping* ultradelgado, observou-se o tipo de comportamento estrutural do pavimento nas condições em que o experimento foi realizado.

Ao término da pesquisa, inferiu-se que os gradientes térmicos dependem de vários fatores climáticos que não somente a temperatura ambiente, importando também a irradiação solar, o número de horas de sol, a velocidade de crescimento e decréscimo da temperatura ambiente; os gradientes térmicos encontrados não são importantes para o acréscimo nos níveis de tensões nas placas, não alterando assim a vida à fadiga do *whitetopping* ultradelgado, considerada a magnitude destes gradientes, as diminutas dimensões das placas e ainda a presença de aderência na interface concreto e concreto asfáltico. Em provas de carga, concluiu-se que os valores de tensões obtidos em campo mantêm grandezas semelhantes com os provenientes de modelos numéricos e ainda observou-se o vasto potencial de utilização das provas dinâmicas.

Dado o excelente desempenho observado nas condições do experimento, mesmo com as placas aderidas a uma delgada camada asfáltica, fator que diferentemente do relatado no exterior não comprometeu o desempenho, não foi possível fazer uma avaliação em termos funcionais do desempenho deste tipo de pavimento. Verificou-se a significativa redução nas deflexões após a execução das placas, visualizando inclusive a transferência de cargas entre sucessivas placas, quando mantida a integridade estrutural das demais camadas do pavimento.

Abstract

In this work, several factors affecting behavior and performance of ultra-thin whitetopping were evaluated taking advantage of a full scale experimental pavement, restored by applying such technique.

Temperatures and thermal gradients in concrete thin slabs were evaluated by almost one year, comprising all the seasons. Load tests were carried out to allow strains measurements on concrete as well to define the deflection basins on whitetopped pavements.

The experimental research has permitted to verify the dependence of thermal gradients on air temperature and solar radiation among other factors.

It was observed that the thermal gradients practically do not affect behavior of the thin slabs. Stresses received from load tests compared to finite element generated stresses shown to maintain a good and closed relation.

Due to good performance observed along the experiment it became not possible to establish patterns of functional performance.

Expressive decrease of deflection level was observed over concrete overlays allowing to infer some load transfer on joints when the slabs are to be laid over non distressed old asphalt pavements.

Introdução e Objetivos

Durante a última década, a restauração de pavimentos asfálticos com a utilização de concreto de cimento Portland teve seu uso ampliado com o advento da técnica de *Whitetopping* Ultradelado, que trata-se da execução de uma delgada camada de concreto de cimento Portland sobreposta à camada asfáltica fresada, de forma a garantir a aderência entre as placas do *whitetopping* ultradelgado e o concreto asfáltico, reduzindo assim as tensões atuantes nas placas.

Com o sucesso de inúmeros trechos experimentais nos Estados Unidos executados na década de 90, a técnica teve seu uso largamente expandido neste país em vias urbanas. No México também ocorreu uma farta utilização destas placas ultradelgadas de concreto aderidas à base de concreto asfáltico. Outros países, de forma não intensa, fizeram uso desta técnica, como é o caso da Áustria e Suécia.

Em 1997, um experimento polêmico marcou a primeira utilização do *whitetopping* ultradelgado no Brasil. Contudo, este trecho experimental possibilitou a avaliação desta técnica sob o ponto de vista de seu desempenho sob condições excepcionais de emprego.

Do monitoramento do desempenho desta experiência pioneira no Brasil, restaram algumas dúvidas sobre a presença e manutenção da aderência ao longo da vida de serviço do *whitetopping* ultradelgado, do efeito da umidade na redução da vida de serviço, da eventual necessidade de consideração do empenamento devido ao gradiente térmico, do tipo de comportamento estrutural e das deformações reais impostas às placas pelo tráfego.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do WTUD nas condições tropicais de uso, em uma via urbana sujeita ao tráfego de ônibus, visto que não são encontrados relatos sobre este assunto nestas condições climáticas, conforme recolheu-se na revisão literária realizada. Também é dada especial atenção ao seu comportamento estrutural e, não menos importante, análise do gradiente térmico a que possam estar submetidas estas placas, correlacionando o eventual efeito de seu empenamento a deformações e tensões surgidas no interior do CCP.

A posição da linha neutra também recebeu atenção pois este posicionamento pode ser relacionado com a perda de aderência e conseqüente desfiguração do comportamento composto do WTUD quando, em futuras pesquisas, tal análise for possível; além disto, para uma típica via urbana brasileira, com pequena espessura de revestimento asfáltico, qual seria o resultado desta condição no deslocamento da linha neutra.

Para tanto, foram realizadas campanhas metódicas de avaliação do desempenho do pavimento executado, incluindo leituras de temperaturas e deformações ocorridas *in situ*, conforme projeto de pesquisa financiado pela FAPESP, sob os cuidados do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica. Tais campanhas possuíram como principais objetivos conhecer os seguintes elementos essenciais ao projeto deste tipo de pavimento composto:

- Estudo da influência de condições climáticas (gradiente térmico em placas de CCP) nas deformações sofridas pelas placas de WTUD, associando-as ao tráfego de ônibus urbanos;

- Estudo do desempenho das placas de concreto durante o período de duração desta pesquisa, com definição das principais patologias que, porventura, surgissem e de como estas comprometeriam o comportamento estrutural e funcional da via, através da determinação periódica de irregularidade no perfil, com emprego *dipstick*;
- Avaliar a eventual perda de aderência na interface CCP/CA, para este pavimento colocado sob tráfego tipicamente urbano, correlacionando-a com o desempenho obtido em campo, caso tal perda de aderência configure-se como ocorreu no primeiro experimento no Brasil,
- Comparar, ainda que de modo preliminar, tensões induzidas nas placas pelo tráfego com valores numericamente esperados.

Capítulo 1

Revisão Bibliográfica

1.1 Considerações Iniciais

O Brasil passou vários anos com uma política rodoviária voltada para a construção de novas rodovias. Através desta forma de administração, pensava-se que executar estradas era promover desenvolvimento. Tal afirmação está de todo correta. Através destas vias, torna-se possível o crescimento de uma região pois sobre ela, a tecnologia e o desenvolvimento trafegam, levando importante incremento na qualidade de vida da população beneficiada com a pavimentação.

Durante o período da construção das grandes rodovias, o Concreto de Cimento Portland (CCP) teve seu uso restringido a pátios de portos e aeroportos e pavimentos industriais, sendo que poucas vezes fez-se uso dos pavimentos em CCP, mesmo naquelas rodovias de tráfego intenso. O emprego deste material teve sua utilização limitada com o uso difundido do Concreto Asfáltico (CA), em parte devido ao alto custo inicial praticado na época, de acordo com Fortes e Balbo (2000).

Com o passar do tempo e a manutenção da referida mentalidade administrativa, obras novas de pavimentação foram sendo executadas em detrimento da recuperação da malha existente. Esta situação é constatada tanto a nível rodoviário quanto em sistemas viários urbanos.

Hoje temos uma nova realidade proporcionada, em parte, pelas concessões rodoviárias. Sem entrar na discussão política e social envolvida neste processo, as concessionárias estão atentas a novas tecnologias, tanto de processo quanto de materiais. Em relação a custos, tais órgãos estão procurando novas formas de minimizar a manutenção durante o período concessionado e assim elevar os lucros com o serviço prestado.

Em relação ao fator econômico, ao contrário de antes, os custos iniciais para a construção de pavimentos em CCP têm sido reduzidos para o caso de rodovias de elevado volume de tráfego, tornando-o competitivo, ainda mais se observados os baixos custos de manutenção necessários durante sua vida de serviço. Parte da redução do valor inicial¹ dos pavimentos de CCP deve-se a importação de equipamentos de pavimentação, por parte da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em parceria com empresas do ramo rodoviário, que acabaram por possibilitar uma grande produtividade e melhor qualidade de acabamento. A Tabela 1.1 mostra a evolução da utilização de pavimentos em CCP em vários países.

Tabela 1.1 Uso de pavimentos em CCP no mundo²

País	% de Rodovias em CCP construídas a partir de 1995	% da Rede Viária Principal em CCP
Bélgica	20,0	41,0
França	4,0	8,0

¹ Exemplos reais e recentes da redução do custo inicial dos pavimentos em CCP são as pistas marginais da Castello Branco e a duplicação da SP-79 que apresentaram custo inicial idêntico aquele oriundo da aplicação de concreto asfáltico.

² Fonte: *World Road Association Technical Committee on Concrete Roads. "First analysis of the questionnaire – Pavement Design Methods of Cement Concrete Pavements"*. Abril, 1998, Florence

Alemanha	40,0	28,0
Grã-Bretanha	20,0	6,0
Japão	5,0	5,0
Malásia	30,0	Sem dados
Romênia	12,0	13,5
Estados Unidos da América	15,0	34,0
Brasil	5,0	Sem dados

Chambon et al (1998) é enfático ao referir-se às grandes vantagens do emprego do CCP na pavimentação, destacando seu excelente desempenho quando submetido a tráfego pesado e ao baixo nível de manutenção requerido.

Outro fator pode ser mencionado em relação ao uso deste material. O concreto de cimento Portland possui uma característica muito rara entre outros materiais de construção utilizados na engenharia civil. Ele consegue aliar qualidade ao emprego de parte dos subprodutos de outras indústrias, tais como a cinza volante (subproduto da combustão do carvão pulverizado em usinas termoeletricas), escória de alto-forno (oriundo da produção de ferro fundido) e a microssilica (material obtido na indústria de silício metálico e ligas de ferro-silício) que poderiam estar comprometendo o meio ambiente.

No entanto, grande parte da malha rodoviária nacional está carente de uma intervenção a fim de elevar suas condições de serventia pretendidas durante a fase de projeto. Com o passar do tempo e a falta de manutenção, os pavimentos rodoviários foram sofrendo um processo de deterioração tanto da sua capacidade estrutural quanto funcional.

Neste processo de degradação das rodovias, a falta de manutenção não é a única causa contribuinte. Conforme constatações feitas por Salcedo (1998) em pavimentos mexicanos, houve um grande aumento não só do volume de tráfego nas principais rodovias daquele país, muitas vezes de difícil previsão, como também das cargas transferidas diretamente ao pavimento. Esta realidade mexicana em nada difere das encontradas em outros países, como é o caso do Brasil.

Um dos problemas comuns em pavimentos com fluxo canalizado de veículos comerciais é o surgimento cumulativo de deformações visco-plásticas nos pavimentos de concreto asfáltico ao longo do tempo. De acordo com Balbo et al (1998), este acúmulo de deformações configuram-se em patologias funcionais do pavimento, acabando por gerar irregularidades na superfície do pavimento com conseqüente desconforto ao rolamento.

Surgiu então a idéia de utilizar o CCP como material de recuperação dos pavimentos asfálticos alternativamente às misturas asfálticas em algumas situações específicas. Tal premissa fundamentou-se em razão do comportamento elástico do concreto de cimento Portland, nos níveis de tensão geralmente empregados, não estando sujeito à formação de trilhas de roda. Soma-se a esta vantagem, o fato das placas de concreto distribuírem mais uniformemente as tensões, solicitando de forma mais amena as demais camadas do pavimento e o fato de o CCP apresentar comportamento à fadiga melhor definido experimentalmente, conforme ressaltam Balbo (1999a).

Na realidade, o emprego do CCP como material de recuperação de pavimentos asfálticos vem sendo feito desde 1918, quando pela primeira vez executou-se o *whitetopping* (WT). Cole et al (1998) comentam que este uso empreendedor ocorreu na rua *South 7th*, em *Terre Haute*, cidade do estado americano de *Indiana*, tendo seu uso realmente difundido a partir da metade da década de 1970. Em *Iowa*, tais placas possuíam espessuras variando entre 100 e 200 mm.

Cole et al (1998) acrescentam que nesta ocasião foi empregado o chamado WT convencional, definido como sendo uma camada de CCP, com mais de 100 mm de espessura, sobreposto ao pavimento asfáltico existente.

Pode-se adicionar a esta definição o fato de seu comportamento estrutural não contemplar a aderência entre o CCP e o CA, aspecto que torna possível a aplicação das equações clássicas de Westergaard no seu dimensionamento.

Cole et al (1998) ressaltam ainda que o espaçamento entre juntas transversais do WT não pode exceder em 21 vezes a espessura da placa, de acordo com a *American Concrete Pavement Association* (ACPA).

Mack et al (1993) relatam o emprego do mesmo tipo de reforço no ano de 1944 em um aeroporto da Base Aérea Norte Americana em *Offut, Nebraska*.

Com sucessivos sucessos encontrados no emprego do WT, concebeu-se um novo tipo de revestimento em CCP, baseando nos princípios do *whitetopping* convencional, aliado à consideração da contribuição da aderência na interface CCP/CA e ao emprego de concretos de alta resistência. A este tipo de pavimento sobreposto, que também tinha por finalidade recuperar as condições de rolamento de vias em concreto asfáltico, deu-se o nome de *whitetopping* ultradelgado (WTUD).

1.1.1 Whitetopping Ultradelgado (WTUD)

Cole (1997) define *whitetopping* ultradelgado (WTUD) como um pavimento de concreto de espessura entre 50 e 100 mm, com dimensões reduzidas de placas, sobreposto ao revestimento asfáltico, trabalhando aderido a este.

Balbo (1999a) acrescenta que a denominação *whitetopping* refere-se a cor do novo revestimento que será colocada sobre, o até então, revestimento negro constituído de CA.

A reduzida espessura de WTUD pode ser atribuída à alta resistência dos concretos empregados em tal técnica, às dimensões reduzidas das placas e, principalmente, à aderência existente entre o CCP e o CA.

A possibilidade de uso do WTUD está atrelada a vários fatores que vão desde a geometria da placa, passando pelas condições da superfície do revestimento asfáltico bem como o não comprometimento da capacidade de suporte do pavimento, até a possibilidade de uso, *in situ*, de concretos de alta resistência à tração na flexão.

Estes e outros fatores serão comentados nos itens seguintes, bem como um breve histórico de seu uso.

1.1.2 Histórico

Num estudo sobre a história da aplicação dos WT e WTUD nos Estados Unidos da América, Cole et al (1998) afirmam que o primeiro *whitetopping* ultradelgado foi executado em setembro de 1991, próximo a um depósito de lixo na cidade de *Louisville*, em *Kentucky*.

O experimento ocorrido em *Kentucky* também é tido como pioneiro por diversos outros autores, como é o caso de Risser et al (1993), Armaghani e Tu (1997) e Balbo (1999a).

Risser et al (1993) comentam que o experimento foi desenvolvido pela Associação das Concreteiras de *Kentucky*, em parceria com a *American Concrete Pavement Association* (ACPA), numa rodovia que apresentava as condições necessárias à avaliação acelerada do desempenho do WTUD. O projeto teve início em 1990 e sua execução ocorreu em 1991. Para o trabalho de pavimentação até a liberação ao tráfego haviam, aproximadamente, 40h. Desta forma, o teste realizado em *Louisville*

estaria representando as condições que de fato este pavimento teria que se sujeitar em campo, para uma difusa utilização.

Em um ano de experimento, o WTUD já dava provas de estar apto a ser utilizados em vias de baixo volume de tráfego, visto o excelente desempenho observado na pesquisa. Tal desempenho, por estar sujeito a um tráfego intenso, corresponderia a 20 anos de uso em rodovias com baixo volume, de acordo com Risser et al (1993).

Após o sucesso do experimento realizado em 1991, Cole (1997) lista mais de 89.000 m² de WTUD construídos entre 1992 e 1995, em 32 locais de 12 estados americanos. A maioria destes pavimentos de concreto sobrepostos ao concreto asfáltico possuíam espessuras de placa de CCP variando entre 50 e 90 mm.

Até 1997, mais de 70 projetos de WTUD já haviam sido executados em 18 estados dos Estados Unidos da América. Armaghani e Tu (1997) mencionam ainda que a maioria destes projetos foram construídos em pavimentos deteriorados de ruas urbanas, interseções, em postos de pesagem de caminhões e em estradas de baixo e médio volume de tráfego.

No entanto, o emprego destas placas ultradelgadas não limitou-se às fronteiras dos Estados Unidos da América. México, Canadá, Suécia, Áustria, França e Brasil fizeram uso desta técnica, conforme relatam Salcedo (1996), Sturm e Morris (1998), Silfwerbrand (1997), Steigenberger (1998), Chambon et al (1998) e Balbo (1999a), respectivamente.

Chambon et al (1998) referem-se ao emprego do WTUD, conhecido na França como VTBCC (*Very Thin Bonded Cement Concrete*), com grande euforia, mesmo face ao alto nível de exigência por parte de usuários e órgãos governamentais franceses sobre os níveis de serviço oferecido pelas vias, questões de segurança e aderência pneu/pavimento, inclusive no que refere-se a nível de ruídos.

Mack et al (1998) comentam que o WTUD tem se mostrado uma alternativa factível na solução de problemas de trilhas de roda e ondulações no revestimento asfáltico, aumentando inclusive a durabilidade quanto ao desgaste superficial, desde que tenha um correto dimensionamento e aplicação em via de baixo volume de tráfego.

Detalhes sobre experiências de utilização do WTUD encontrados na literatura, bem como o desempenho observado em cada caso, serão descritos a posteriori. Antes, no entanto, serão comentados os principais aspectos que afetam diretamente o desempenho do WTUD quando de sua utilização em campo.

1.1.3 Aspectos Relacionados ao Desempenho

Toda técnica construtiva, seja rodoviária ou não, possui alguns aspectos que podem alterar o desempenho da estrutura em serviço de uma forma mais ou menos intensa. No caso do WTUD não poderia ser diferente.

Para o emprego racional de um processo ou técnica rodoviária, faz-se necessário o completo entendimento das variáveis em questão a fim, de num primeiro momento, indicar ou não o uso desta, para só então fazer as avaliações necessárias quanto ao custo-benefício de seu emprego. Ainda em relação ao custo-benefício, é fundamental a disponibilidade de modelos de previsão de desempenho perfeitamente ajustados às condições em que se estará aplicando uma determinada prática construtiva.

Armaghani e Tu (1997) mencionam uma correspondência enviada por *Lawrence W. Cole* em setembro de 1997, relatando a importância das condições de superfície do pavimento flexível (asfáltico) na previsão do desempenho do WTUD. Este documento lista ainda outros parâmetros que

podem interferir no desempenho da técnica em questão; são eles: espessura e dimensão da placa, espessura da camada de CA existente quando da concretagem das placas de CCP, rigidez da base (neste caso tomada como sendo a camada asfáltica) e aderência entre o concreto asfáltico e o concreto de cimento. Por fim, salienta a questão do concreto de cimento Portland a ser utilizado, referendando ao uso ou não de fibras, e às técnicas executivas.

Antes de passar a analisar algumas observações encontradas na literatura assim como alguns valores assumidos em projetos, cabe um rápido relato sobre uma análise paramétrica realizada por Gucunski et al (1999). A modelagem numérica tridimensional realizada com auxílio do programa SAP2000, capaz de calcular deformações e tensões numa dada estrutura por meio de elementos finitos, mostrou que o aumento da espessura do WTUD e/ou do CA reflete-se em redução das tensões máximas atuantes no pavimento, para o caso de aderência plena. Já no quesito tensões devido ao gradiente térmico, estas mostraram-se pouco influenciáveis pelas espessuras de CCP e CA. O módulo de elasticidade da camada asfáltica também influencia em muito as tensões máximas surgidas no pavimento composto. No entanto, outros parâmetros como juntas fissuradas até o fundo da placa, módulo elástico da sub-base e módulo de reação do subleito pareceram interferir menos nas tensões em estudo.

1.1.3.1 Aderência

Toda a concepção da técnica do WTUD está fundamentada numa premissa básica: a aderência. Esta característica é tida como a principal causa de sucesso do emprego do WTUD por inúmeros autores, podendo-se citar Risser et al (1993), Mack et al (1993) e Balbo (1999a).

A aderência entre o concreto de cimento Portland e a camada asfáltica é fundamental ao WTUD por permitir que o comportamento estrutural do pavimento seja do tipo composto, ou seja, trabalho conjunto entre CCP e CA como uma única camada. A aderência permite esta forma de trabalho por igualar as deformações induzidas pelo carregamento ou efeito térmico na interface mencionada. Uma observação importante refere-se ao fato de haver tensões diferentes nos dois materiais nesta interface visto que seus módulos de elasticidade são diferentes.

Balbo (1999a), analisando o experimento pioneiro com WTUD no Brasil, foi taxativo em afirmar que o processo de deterioração deu-se de modo muito acelerado, sendo um dos fatores desencadeantes o fato do CA apresentar “trincas em pele de crocodilo”, escrevendo:

“... A presença de fissuras de classe 2, qualquer que seja, como se procurou apresentar no trabalho, trata-se de um fator impeditivo do emprego de WTUD...” Balbo (1999a), página 145.

O comportamento composto do pavimento reduz significativamente as tensões críticas de tração no CCP e no CA. Esta redução de tensão no WTUD permite ao concreto resistir aos esforços solicitantes, mesmo com a pequena espessura da placa, que conciliada ao emprego de concretos de alta resistência, garante uma vida à fadiga considerável. Tais considerações foram embasadas por um estudo numérico apresentado por Mack et al (1993).

A redução das tensões referidas anteriormente, deve-se ao deslocamento descendente da linha neutra (LN).

Mack et al (1998) e Balbo e Rodolfo (1998a) constataram por meio de modelagem numérica que a posição da carga no canto da placa confere maiores tensões de tração no concreto de cimento Portland, sendo estas localizadas na parte superior da placa.

Sabe-se que esta tensão é diretamente proporcional ao momento fletor surgido na placa e à distância da LN à fibra mais tracionada que neste caso encontra-se na parte superior do CCP, sendo inversamente proporcional à rigidez relativa do conjunto CCP/CA devido ao comportamento composto do pavimento.

No caso de um pavimento de CCP aderido ao CA, uma única linha neutra governa o seu comportamento estrutural e sua posição encontra-se abaixo do plano médio da placa de CCP, podendo situar-se no próprio concreto (maioria dos casos), solicitando o concreto à tração e compressão e o CA à compressão sem que grandes riscos de fadiga sejam observados nesta camada; ou a LN poderá estar na camada asfáltica no caso de haver uma grande espessura de CA, o que levará o CCP a uma situação de tração plena e o CA com os dois esforços, tração e compressão. É importante observar que o nível de tensão de tração encontrado na camada asfáltica, no caso da linha neutra encontrar-se nesta camada, é muito inferior ao encontrado quando da solicitação direta das cargas de tráfego sobre o CA, prolongando em muito sua vida útil.

Duas considerações fazem-se necessárias neste momento para o WTUD. Primeiramente, o deslocamento da LN para baixo tenderia a um aumento da tensão de tração no topo da fibra de CCP devido ao aumento da distância entre este plano de tensões nulas e a fibra mais tracionada, isto considerando o caso crítico de tensões. Em segundo lugar, o trabalho conjunto CCP/CA proporcionado pela aderência, promove uma maior rigidez ao esforço fletor atuante, fato que concorre para a redução das tensões de tração no topo do WTUD.

Tem-se assim, para uma mesma espessura de camada asfáltica, uma espessura de CCP na qual acima desta a tensão de tração no concreto de cimento Portland não mais aumentaria, pelo contrário, decresceria. Advém deste comportamento conjugado a importância da aderência e a escolha conveniente da geometria da placa dada uma espessura de CA preexistente. Em relação ao CA, o nível de tensão com o emprego do WTUD reduz-se significativamente, fato que contribui para o incremento de sua vida de serviço. A Figura 1.1 procura ilustrar a influência da aderência sobre a LN.

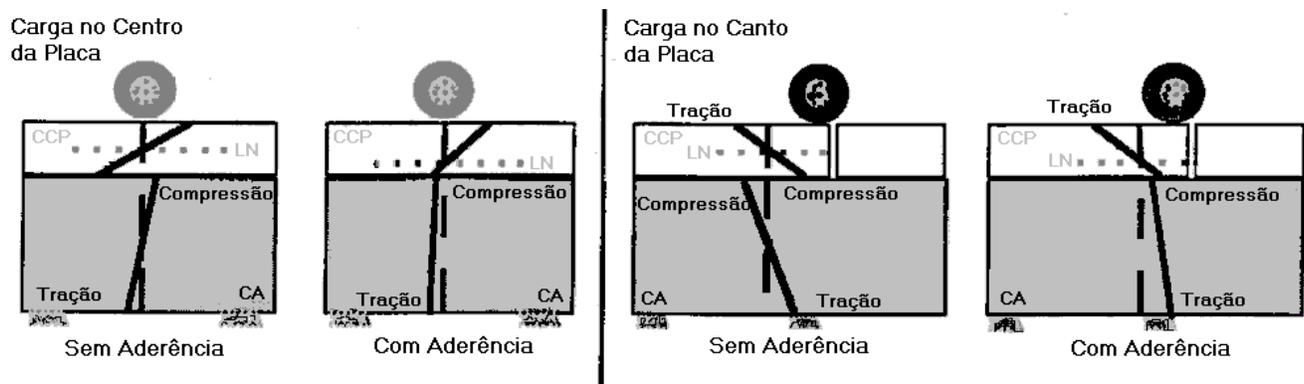


Figura 1.1 Efeito da Aderência sobre a Posição da Linha Neutra (LN) (Fonte: Mack et al, 1998)

Grove et al (1993) relatam uma experiência realizada em 1991 com o intuito de determinar uma técnica executiva capaz de aumentar a aderência CCP/CA, oferecendo assim subsídios ao projeto de WT. Cinco tipos de preparo da superfície do CA foram empregados:

- Vassouramento enérgico;
- Vassouramento enérgico seguido de jateamento de ar comprimido;
- Nata de cimento;
- Fresagem;
- Emulsão adesiva.

Grove et al (1993) concluem que as seções em que foram utilizadas fresagem da superfície de CA obtiveram as maiores resistências ao cisalhamento por contribuir para o aumento da rugosidade e exposição do agregado. As seções que utilizaram emulsão adesivas sobre a superfície varrida de CA apresentaram os piores resultados quanto à aderência.

A mesma conclusão foi retirada de ensaios comentados em Steigenberger (1998) em que interfaces CCP/CA preparadas com o uso de produtos especiais para promover aderência foi desaprovado, sendo considerado suficiente a fresagem do CA a fim de proporcionar profundidade e largura suficiente para o encaixe do agregado graúdo do concreto e exposição do agregado do concreto asfáltico para uma boa aderência.

A aderência surge, em linhas gerais, da cristalização dos silicatos de cálcio hidratados, provenientes da hidratação do cimento Portland, nos poros superficiais do agregado graúdo, formando uma espécie de ancoragem neste. Advém daí a importância da exposição do agregado presente no CA. A cristalização dos silicatos de cálcio hidratados conciliada ao intertravamento dos agregados graúdos do CCP nas ranhuras provenientes da fresagem, configuram-se nos dois processos principais de aderência, conforme constatado por Grove et al (1993) e Steigenberger (1998)

Alguns resultados de resistência ao cisalhamento, indicados por Grove et al (1993) em alguns WT convencionais, em *Boone County*, na R18, tiveram seus valores superiores a 1,30 MPa. Duas rodovias estaduais em *Dallas* apresentaram esta resistência média igual a 0,69 MPa. Os autores justificam o excelente desempenho observado nestes pavimentos pela presença da aderência, mesmo da sua não consideração quando do dimensionamento.

Em concordância a Grove et al (1993), Armaghani e Tu (1997) relacionam o sucesso do WTUD à aderência que pode ser aumentada tratando-se convivamente a superfície de CA. Acrescenta ainda que tal processo, além de retirar as irregularidades proporcionadas pelas trilhas de roda, acaba por minimizar a presença de resíduos de óleo que poderiam causar problemas para a aderência. No caso de superfícies asfálticas que já apresentem textura rugosa e afundamentos na trilha inferiores a 3 mm, recomenda apenas a limpeza desta.

Salcedo (1996) relaciona a reduzida aderência encontrada em *Tijuana*, México, à não execução de fresagem na superfície de CA.

Cable et al (1997) observaram um aumento da possibilidade de perda de aderência em WTUD executados sobre superfícies de CA que haviam sofrido reparos localizados (geralmente chamados de remendos). A mesma possibilidade foi observada sobre a camada asfáltica recentemente reciclada. A primeira é endossada por Balbo (1999a).

Um relato interessante sobre a aderência é apresentado por Mack et al (1997) fundamentada em dados obtidos em pistas experimentais na *Georgia* e *Tennessee* em 1995. Comprovou-se experimentalmente que a aderência é apenas parcial, e não total como assumido na maioria das análises numéricas. Ao comparar as deformações no topo e no fundo da placa, observou-se uma significativa diferença, o que concorre para o fato de haver contribuição do CA na absorção dos esforços fletores e, que as deformações no fundo da placa e no topo da camada asfáltica também diferiam, apontando para a resposta de um pavimento composto parcialmente aderido. Webb e Delatte (2000) enfatizam também a necessidade de um estudo mais profundo na geração de modelos de dimensionamento de WTUD.

Baseado nesta constatação, Mack et al (1997) modelaram um pavimento do tipo WTUD em um programa de elementos finitos em 3-D (três dimensões) com vários níveis de aderência CCP/CA. Ao se reduzir a aderência de uma condição de total aderência para uma parcial, constatou-se uma brusca elevação da tensão no WTUD e uma certa constância nos valores de tensão no CA.

Em um trecho experimental construído no estado de *Virginia*, nos EUA em 1995, encontraram-se resistências ao cisalhamento variando entre 1,0 e 1,5 MPa e no ensaio de tração direta, muito mais severo, valores próximos a 0,8 MPa, de acordo com relatos feitos por Sprinkel et al (1997).

Em testes realizados no *Colorado*, Estados Unidos da América, Mack et al (1997) mencionam uma oscilação da resistência ao cisalhamento entre 0,23 e 0,45 MPa, onde o WTUD foi executado sobre um pavimento asfáltico recente, sem que nenhum tratamento fosse feito, e nenhuma resistência ao cisalhamento foi encontrado quando o CA novo foi fresado, ficando claro que a aderência não é aumentada com a fresagem de pavimentos novos, como complementam Wu et al (1998).

Quando o CA possuir um grau de fissuração não tão intenso a ponto contra-indicar o uso do WTUD pelo comprometimento estrutural do pavimento, uma técnica rotineira no estado da Flórida é indicada e consiste na aplicação de um ligante asfáltico sobre a superfície fissurada (1,5 l/m²), seguido da distribuição de brita com diâmetro máximo de 19 mm e compactação. Este processo foi usado em *Gainesville*, conforme relatos de Armaghani e Tu (1997), indicando razoável aderência.

Armaghani e Tu (1997) e Noda et al (1998) ressaltam que a aderência contribui inclusive para a redução do empenamento e dos esforços surgidos na placa devido ao gradiente térmico. Para que o WTUD possa apresentar um desempenho satisfatório tanto sob o carregamento dos veículos quanto do efeito térmico, o primeiro artigo especifica uma resistência mínima ao cisalhamento de 1,4 MPa baseado no experimento de campo realizado em *Gainesville*, mostrado em detalhes no item 1.2.1. O mesmo limite foi fixado para o WTUD executado num posto de pesagem de caminhões na rodovia I-10, conforme salientam Armaghani e Tu (1998).

Um estudo interessante realizado no Japão e relatado por Noda et al (1998), apontou que a temperatura na camada asfáltica chega até 50^oC. Ensaios de cisalhamento realizados com amostras de CCP aderido ao CA nesta temperatura obtiveram resistência ao cisalhamento 60% inferior a obtida na temperatura de 20^oC.

No Canadá, em experiência realizada na cidade de *Mississauga*, notou-se a inexistência de aderência nas placas onde fissuras surgiram com maior intensidade. Nestas placas, comentam Sturm e Norris (1998), a resistência ao cisalhamento, que é um indicativo da aderência, variou entre 0,48 e 0,78 MPa, bem abaixo do especificado por Armaghani e Tu (1997).

Tal constatação mencionada acima e outras relatadas na literatura convergem para a sentença conclusiva de Balbo (1999a) ao afirmar que o fator preponderante para o bom desempenho do WTUD está na possibilidade de haver aderência ou não entre o CCP e o CA.

Uma vez conseguida a aderência necessária, surge no autor referido anteriormente, a dúvida sobre o comportamento desta ao longo da ação do carregamento e do intemperismo, que deve ser analisado aqui como o fator desencadeante do gradiente térmico a que as placas de WTUD estão submetidas.

A fim de tentar esclarecer um pouco mais a dúvida levantada por Balbo (1999a) no que refere-se à manutenção da aderência após sucessivas repetições de carga, Fortes (1999), em sua tese de doutorado, apresenta um estudo completo sobre a aderência CCP/CA baseada em ensaios laboratoriais de cunho estático e dinâmico.

No trabalho talvez mais abrangente sobre esta interface, mais precisamente sua aderência, Fortes (1999) apresenta ainda um estudo qualitativo e quantitativo da repercussão de diferentes tratamentos de superfície de CA sobre a aderência. Na metodologia de ensaio desenvolvida pela autora, a resistência ao cisalhamento direto variou de 1,5 a 2,4 MPa.

Contrariando o que foi encontrado em Grove et al (1993) e Steigenberger (1998), substancial acréscimo nesta resistência foi encontrado por Fortes (1999) quando da utilização de resina epóxica. A resistência ao cisalhamento quando da utilização apenas desta resina superou em 36% o valor obtido para o CA fresado com equipamento de obra (máquina fresadora). Utilizando os dois

processos, fresagem e aplicação de resina epóxica, o aumento foi de 40%. Os valores médios de resistência ao cisalhamento obtidos foram de 1,64 MPa (superfície sem tratamento), 1,65 MPa (superfície fresada manualmente), 1,89 MPa (CA fresado com fresadora de obra, modelo 1000C), 2,54 MPa (utilizando-se apenas de resina epóxica) e 2,62 MPa (para superfície fresada e tratada com resina), conforme tabelado em Fortes e Balbo (2000). Uma breve análise econômica desta aplicação é realizada no término do trabalho, evidenciando a inviabilidade econômica do emprego desta resina, que adicionaria R\$ 24,50 por m², valores da época.

Talvez esta discrepância tenha sido antecipada por Grove et al (1993) quando explicou o fraco desempenho encontrado no tratamento da superfície de CA com emulsão adesiva. Este comportamento foi atribuído, na época, à repulsão elétrica entre a emulsão catiônica e o agregado do CCP.

Com o intuito de avaliar o desempenho da aderência ao longo dos ciclos de repetições de carga, Fortes (1999), trabalhando com níveis diferentes de tensões cisalhante e diferentes frequências de carregamento, desenvolveu um ensaio que acabou por mostrar que, conforme suspeitavam Mack et al (1993) e Balbo (1999a), existe de fato uma perda da aderência devido a sucessivos carregamentos. Em qualquer nível de tensão solicitante houve degradação da aderência; obviamente que o número de ciclos aplicados no caso de uma baixa relação (tensão cisalhante solicitante dividido pela resistência a este esforço) foram superiores. Devido ao pequeno número de dados amostrais, não foi possível neste estudo a obtenção de um modelo laboratorial do comportamento à fadiga da aderência.

1.1.3.2 Dimensões da Placa

Balbo e Rodolfo (1998b) e Balbo (1999a) atribuem a escolha das dimensões de placas à dois aspectos. O primeiro, de cunho de dimensionamento, deve procurar enquadrar as placas na Teoria Clássica de Placas Isótropas a fim de considerá-las medianamente espessas para o cálculo de tensões e deformações atuantes. Assim, a relação entre a dimensão da placa e sua espessura deve estar entre 20 e 30. O segundo, de cunho prático, deve atentar-se para a ordem de grandezas das tensões solicitantes do concreto de cimento Portland, compatibilizando-as com o material empregado, sem esquecer da retração do mesmo quando da hidratação do cimento.

Entretanto, Balbo e Rodolfo (1998b) salientam também a importância de atrelar as dimensões das placas à largura da faixa de rolamento e às dimensões dos eixos solicitantes. Para o caso de eixo tandem utilizado no país, o artigo afirma, após uma análise geométrica, que este somente solicitaria a placa de WTUD com um dos seus dois ou três eixos, no caso de dimensões máximas de placas igual a 1,2 m, conforme recomendações encontradas no mesmo artigo. Outra constatação importantíssima refere-se a posição da carga que deverá ser adotada para fins de projeto. Com este intuito, os autores estudaram larguras de faixas de 2,5 a 3,6 m e concluíram que para qualquer uma das configurações de eixos utilizados no Brasil, ao menos uma placa da seção transversal da faixa estaria sendo carregada no seu canto, tornando-se assim obrigatória a consideração de cargas posicionadas no canto da placa para a análise de tensões no WTUD.

Desta forma, o dimensionamento à fadiga do CCP utilizado na técnica em estudo deverá ser feito para uma carga aplicada no canto da placa com apenas um eixo solicitando a placa de WTUD.

Não fica descartada também a análise à fadiga da camada asfáltica visto que ao passar pelo canto da placa, o eixo também solicitará sua borda longitudinal, posição esta que induz tração no CA. Obviamente que as tensões assim surgidas no concreto asfáltico serão de menor magnitude que no caso de carregamento direto sobre sua superfície porém, dependendo do período de vida à fadiga assumido para o CCP, poderá ocorrer ruptura do CA antes do tempo previsto, fato que também levaria o WTUD à ruptura.

Mack et al (1998) afirma que o objetivo do WTUD é absorver a ação do carregamento e repassá-la às camadas subjacentes, compostas de concreto asfáltico, por meio de deslocamentos verticais, conforme ilustra a Figura 1.2. Para que isto ocorra, as placas devem possuir a menor dimensão possível, a fim de reduzir as tensões de tração devido à flexão no CCP impostas pelo tráfego. Além disto, reduzidas dimensões de placas contribuem para a diminuição do empenamento causado pelo gradiente térmico e higroscópico. Bons desempenhos foram observados nos EUA com placas entre 0,6 e 1,5 m, com relação entre dimensão de placa e espessura da mesma variando entre 12 e 15, segundo os mesmos autores.

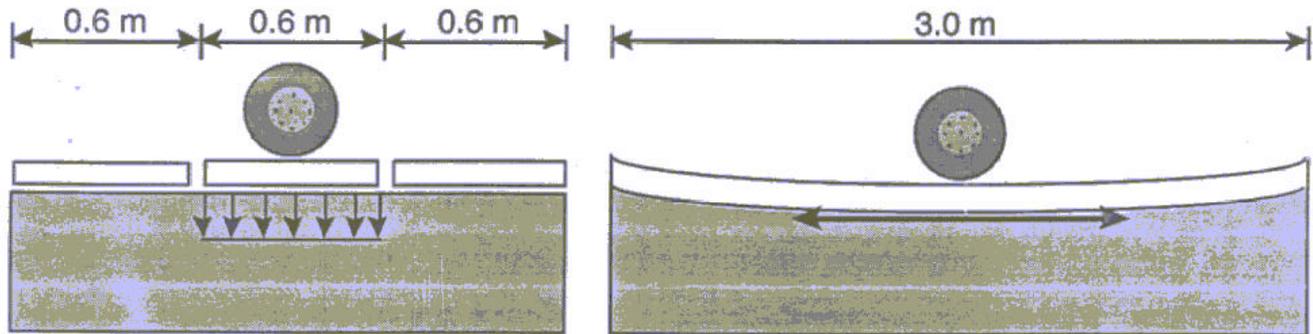


Figura 1.2 Efeito Bloco Proporcionado por Placas de Pequenas Dimensões (Fonte: Mack et al, 1998)

Neste sentido, Balbo et al (1998) chegam a classificar o comportamento do WTUD com reduzidas dimensões de placas como flexível, mantendo-se distante de discussões mais aprofundado deste termo ou expressão.

Balbo e Rodolfo (1998b) apresentam um estudo conclusivo sobre a influência da espessura e do espaçamento entre juntas sobre os fatores de carga equivalente. Ficou evidenciado nesta análise que a “lei de quarta potência” não é válida para as configurações geométricas usuais de WTUD, sendo que este modelo aproxima-se apenas de placas com espessuras superiores a 100 mm.

Risser et al (1993) atribuem o excelente desempenho observado na primeira pista experimental de WTUD ao pequeno espaçamento entre juntas, entre outros fatores. O autor cita que antes mesmo deste experimento, já havia este sentimento por acreditar que menores dimensões horizontais de placas contribuiriam para que o WTUD trabalhasse mais como blocos do que como placas, fazendo com que o CCP esteja sujeito a maiores tensões de compressão que de tração, “calcanhar de Aquiles” do concreto de cimento Portland.

Mack et al (1993) fizeram um estudo de sensibilidade da espessura de WTUD sobre as tensões produzidas no pavimento composto utilizando-se do programa ILLI – SLAB³. Nesta análise, concluíram que o WTUD com 51 mm de espessura possui a linha neutra (LN) mais próxima do CA que o mesmo de espessura de 89 mm, o que leva a uma menor tensão de tração na flexão no CCP no primeiro caso. Porém, com 51 mm, maiores serão estas mesmas tensões na fibra inferior do CA. Argumenta também, que ao aumentar a espessura da placa de CCP chega-se a um ponto em que o efeito do afastamento da linha neutra é compensado pela espessura da placa, acarretando então, uma redução na tensão de tração nas fibras inferiores do CCP.

Na prática, pode-se explicar o exposto anteriormente pelo fato de um pavimento projetado com uma espessura próxima ao referido ponto ter maior probabilidade de sofrer uma ruptura precoce no CCP que um outro dimensionado com espessura maior ou menor que aquela anterior.

³ Programa computacional que permite o cálculo das tensões em diferentes camadas do pavimento baseado em modelagem por elementos finitos.

Mack et al (1993) ainda observam que no caso de haver dúvidas quanto a existência ou não de aderência na interface CCP/CA, deve-se optar pelo uso de placas de dimensões reduzidas, próximo a 0,61 m e espessura de 89 mm, pois neste caso, para uma condição de não aderência, as tensões surgidas no concreto de cimento Portland são de mesma magnitude daquelas encontradas nos pavimentos convencionais de CCP.

Fortes (1999), utilizando modelagem numérica, constatou que para um eixo solicitante de 80 kN, maiores tensões de cisalhamento são encontradas para menores espessuras de *whitetopping* ultradelgado, mantendo a dimensão em planta da placa inalterada. Esta constatação é importante devido ao que foi exposto no item 1.1.3.1.

No primeiro uso de WTUD no México, foram estudadas placas de 0,9; 1,2 e 1,8 m, conforme relatado em Salcedo (1996). No experimento seguinte, ocorrido em 1996, Salcedo (1998) relata o emprego de placas de 1,0 x 1,0 m e espessuras de 89 e 102 mm com ótimo desempenho após a passagem de 335.000 ônibus e 620.000 caminhões.

Em experimentos realizados na Flórida, Armaghani e Tu (1997) mencionam a utilização de placas com espessuras variando de 50 a 100 mm e larguras das placas quadradas entre 0,92 e 3,6 m, informando que esta última dimensão de placa não apresentou desempenho satisfatório, acrescentando que visivelmente, em testes relatados pela literatura, pequenos espaçamentos de juntas como 0,61; 0,92 e 1,22 têm produzido melhores desempenhos.

Nos testes que abriram caminho para a utilização do WTUD nas principais rodovias do estado de *Iowa*, foram utilizadas placas de CCP com 0,6; 1,2 e 1,8 m com espessuras de 50 e 100 mm. Neste estudo, Cable et al (1997) mencionam ainda que foram utilizadas placas mais espessas com e sem barras de transferência de carga, fugindo da aplicação da técnica em estudo.

Na análise de mais de 10 trechos, realizadas em 1995 e 1996, construídos nos EUA, Cole (1997) relata que placas com menos de 1,5 m² apresentaram menor número de fissuras visíveis.

Mack et al (1997) informam a utilização de placas de 1,27 m de CCP e espessura de 89 mm nas placas instrumentadas em *St. Louis* que forneceram dados para a elaboração de um procedimento de dimensionamento de WTUD.

Baseado em desempenho de campo de WTUD na Suécia, Silfwerbrand (1997) indica o uso de placas com espessura mínima de 70 mm e relação entre dimensão e espessura da placa superiores a 20, para o caso de volume moderado de tráfego. Para um volume intenso, o mesmo recomenda espessuras superiores a 80 mm.

1.1.3.3 Espessura de Concreto Asfáltico Remanescente

Cole et al (1998) e Mack et al (1998) afirmam que quanto maior for a espessura de CA aderido ao concreto de cimento Portland, menores serão as tensões críticas no CCP e menores serão também as deformações no fundo da camada asfáltica, conforme complementam Webb e Delatte (2000). Desta constatação advém a importância da espessura de camada asfáltica aderida ao concreto que, para Mack et al (1998), tem sido utilizado 75 mm como mínimo nos Estados Unidos da América.

Mack et al (1993) informam a existência de uma espessura de CA, remanescente da fresagem, da ordem de 100 mm, em *Louisville* no estado de *Kentucky*.

Em *Tijuana*, Salcedo (1996) menciona a existência de 50 mm de concreto asfáltico sob o WTUD. Esta espessura era original, haja vista a inexistência de referência quanto à fresagem prévia do CA para a concretagem. Também sem fresagem, devido à exposição do agregado, foi executado um outro experimento no México em que, segundo Salcedo (1998), o WTUD foi executado sobre uma camada asfáltica de 100 mm cuja base granular tinha espessura de 130 mm e sub-base de 185 mm.

O desempenho relatado neste último experimento foi considerado excelente após um ano de observações sobre um tráfego intenso.

Nos testes realizados em *Gainesville*, Armaghani e Tu (1997) informam ter sido utilizado WTUD sobre 25 e 38 mm de CA.

No segundo experimento realizado na Flórida, na I-10, também descrito pelos autores acima mencionados, porém em 1998, na publicação Armaghani e Tu (1998), o CA não apresentava uma constância de espessura, motivada em grande parte pelos constantes recapeamentos executados, visto à rápida formação de trilhas de roda. Esta espessura oscilava entre 80 e 175 mm, sendo que foram executadas fresagens com 40 mm de profundidade nas faixas de rolamento.

Cable et al (1997) informam que nos trechos testados na *Iowa Highway 21*, a espessura de CA remanescente do preparo executado nesta camada foi de 75 mm.

Em 1995 e 1996, levantamentos a fim de obter o Índice de Condição do Pavimento (ICP) de vários WTUD construídos nos EUA, levou a obtenção do maior valor deste índice a um pavimento que, contrariamente ao que se pensava, possuía o maior volume de tráfego. Cole (1997) relacionou este fato à grande espessura de CA existente sob o CCP, com mais de 200 mm de camada asfáltica.

Em placas instrumentadas de um aeroporto em *Missouri*, o concreto asfáltico possuía uma espessura variando entre 79 e 81 mm depois da fresagem, de acordo com Mack et al (1997).

Steigenberger (1998) recomenda o uso do WTUD sobre uma camada asfáltica de 120 mm; no caso desta espessura ser de 100 mm, limita a máxima dimensão da placa de WTUD em 1,2 m.

1.1.3.4 Integridade do Concreto Asfáltico

A ACPA em seu guia de dimensionamento de WTUD, ACPA(1998), indica o uso desta técnica aos locais onde os problemas encontrados no pavimento asfáltico restrinjam-se a trilhas de roda, ondulações e desgaste superficial, sem que estes tenham sido originados por falhas estruturais em qualquer uma das camadas constituintes do pavimento.

Fortes (1999), em análise de sensibilidade realizada em seu trabalho, mostrou que quanto menor o módulo resiliente do concreto asfáltico maiores serão as tensões de cisalhamento atuantes na interface CCP/CA.

Esta constatação é importante uma vez que a integridade da camada asfáltica pode ser quantificada pelo seu maior ou menor valor de módulo resiliente, o que leva a concluir que concretos asfálticos que possuam problemas do tipo fissuração classe 2 ou 3, por exemplo, que portanto tenham menores módulos, darão origem a WTUD que, quando solicitado pelo tráfego, terão a interface CA/CCP submetida a uma tensão de cisalhamento maior, contribuindo para perda antecipada de aderência e conseqüente degradação do comportamento mecânico de pavimento composto, expondo-o a um sério risco de ruptura precoce visto que, perdida a aderência, as tensões de tração na flexão nas placas de CCP seriam bastante superiores ao caso aderido.

No experimento precursor com WTUD em *Kentucky* em 1991, o concreto asfáltico existente apresentava uniformidade de condições, com algumas deformações superficiais e trilhas de roda suaves. Não foram mencionadas falhas estruturais neste pavimento em Mack et al (1993).

No experimento mexicano relatado por Salcedo (1996), a camada asfáltica estava num greide com 5% de inclinação, apresentando áreas com afundamento na trilha de roda e zonas onde a água já havia deteriorado o pavimento.

Próximo à cidade mexicana de *Guasave*, Salcedo (1998) descreve um outro experimento utilizando-se de WTUD sobre um CA que apresentava fissuras longitudinais e transversais isoladas, trilhas de rodas entre 15 e 25 mm e áreas discretas com fissuras classe 3. Porém estes defeitos não prejudicaram o desempenho deste tipo de pavimento, talvez motivado pelo fato destas anomalias não terem afetado estruturalmente o mesmo.

Armaghani e Tu (1997) fazem referência à integridade da camada asfáltica ao afirmar a importância da rigidez desta camada para a tomada de decisão da utilização do WTUD como método de reabilitação de pavimentos asfálticos. Armaghani e Tu (1998) acrescentam que o WTUD deve ser utilizado sobre camadas asfálticas que em nada influenciaram, estruturalmente, a necessidade de reparo da via, de acordo com a opinião de Silfwerbrand (1997) que afirma que o WTUD somente aumenta a resistência do pavimento quanto à deformação na trilha de roda, sem elevar sua capacidade portante.

Na estação de pesagem de caminhões, às margens da rodovia I-10, no noroeste da Flórida, o CA apresentava sérios afundamentos na trilha e poucas fissuras significantes, de acordo com o informado em Armaghani e Tu (1998). Os afundamentos variavam de 9 a 45 mm, causados preponderantemente pela ação de aceleração e desaceleração dos pesados caminhões que trafegavam no acesso à balança, sob um regime de fluxo canalizado.

Em testes preliminares sobre a superfície asfáltica, Armaghani e Tu (1998) relatam que as deformações encontradas em *Ellaville* eram 60% menores que as obtidas em *Gainesville*, indicando uma adequada rigidez desta camada, que em nada contribuiu para o surgimento das deformações plásticas observadas.

1.1.3.5 Tráfego

O tráfego torna-se importante uma vez que não consegue-se alcançar resistências de concreto próximas a 9,0 e 10,0 MPa à tração na flexão, já que as tensões no CCP são altas. Desta fora limita-se o emprego do WTUD a baixos e médios volumes de tráfego, preferencialmente urbano, para que possam ter uma vida à fadiga condizente com as expectativas.

Chambon et al (1998) potencializam o uso do WTUD na França em corredores de ônibus, áreas específicas de circulação de veículos comerciais, estacionamentos e em pequenos aeroportos nas áreas de taxiamento de pequenas aeronaves.

Mack et al (1993), ao referirem-se à primeira utilização do WTUD, ocorrida em *Kentucky* no ano de 1991, relatam que o tráfego solicitante era de 400 a 600 caminhões de lixo por dia, durante 5,5 dias por semana. Em um ano, o número de solicitações do eixo-padrão estimado seria de 5×10^5 . Cabe ressaltar que este volume é alto, visto que este local foi escolhido por oferecer a oportunidade de realização de um estudo acelerado de desempenho.

Em *Tijuana*, o tráfego era de 2.100 veículos típicos de zona urbana, por dia, segundo informações retiradas de Salcedo (1996). No segundo WTUD construído neste país e relatado por Salcedo (1998), o tráfego era composto de 27% de caminhões, 6% de ônibus e 67% de automóveis, na rodovia *Mexico-Nogales*, cujo volume médio diário foi estimado em 16.400 veículos.

Durante 18 meses, um tráfego de 6×10^4 foi estimado por Armaghani e Tu (1997), tendo o WTUD apresentado um ótimo desempenho. Nesta ocasião, o WTUD foi aberto ao tráfego uma semana após a concretagem.

No posto de pesagem em *Ellaville*, o tráfego solicitante foi de 1.500 caminhões por dia, segundo Armaghani e Tu (1998).

Na *Iowa Highway 21*, o volume médio diário era de 1.350 veículos, sendo que 13% destes era de caminhões, conforme estimativa de Cable et al (1997), num total de $2,8 \times 10^4$ solicitações do eixo-padrão, somando-se o volume dos dois sentidos de tráfego, entre julho de 1994 e fevereiro de 1997.

1.1.3.6 Tipo de Concreto

Sommer et al (1998) relatam a experiência austríaca na execução de concretos do tipo *fast-track*. Neste país onde muitas vezes o pavimento necessita ser aberto ao tráfego após 48 h, e não rara são as vezes que este é liberado em até 24 h, alguns fatores são importantes na consideração do emprego deste tipo de concreto de cimento Portland. Os autores relatam a influência benéfica do uso de superplastificantes nos concretos de alta resistência inicial, visto que uma trabalhabilidade adequada para estes concretos com baixa relação água/cimento se faz necessária para agilizar o processo executivo, sem comprometimento da qualidade final do pavimento. Entretanto, ressaltam Sommer et al (1998), estes superplastificantes podem aumentar o tempo de endurecimento do concreto, indo de encontro à necessidade de liberação rápida do pavimento. Observa ainda que o uso de superplastificantes a base de melanina invertem esta tendência.

Para Sommer et al (1998) o agregado também interfere na aquisição rápida de resistência. Este deve estar limpo para garantir a rápida aderência pasta/agregado, fator que garante até mesmo uma maior resistência à tração.

O emprego de microssílica também é salientado no artigo, numa taxa aproximada de 5% do consumo de cimento. Este aditivo colocado no concreto aumenta a resistência final do concreto, com conseqüente incremento de sua resistência inicial. Tal fato ocorre devido, em primeira instância, ao efeito de filler produzido pela microssílica, que otimiza a distribuição granulométrica do concreto. Num segundo momento, o emprego deste material, que possui uma ação pozolânica, faz com que as sílicas amorfas presentes neste reajam com o hidróxido de cálcio formando os silicatos hidratados de cálcio, grandes responsáveis pela ação resistiva do cimento Portland. Quanto mais rápida for a formação de hidróxido de cálcio, mais rápida será a formação destes compostos cimentantes (silicatos de cálcio hidratados), fato muito observado com a utilização de cimento do tipo V, classificados pela norma brasileira como de alta resistência inicial. Outro fator que age como catalisador neste processo é a alta superfície específica da microssílica.

Altas resistências são importantes por aumentar a vida útil do pavimento. Marcas impressionantes foram atingidas na Áustria, conforme Steigenberger (1998), com o uso de concretos com consumo de 430 kg/m^3 de cimento pozolânico, fator a/c de 0,34 e pasta de microssílica, na razão água-pó de 1/1, com consumo total de 43 kg/m^3 . Na compressão o concreto suportou 56 MPa após 24 h e 94 MPa aos 28 dias, na tração à flexão estes valores foram de 8,4 e 12,2 MPa, respectivamente nas mesmas idades.

Balbo e Rodolfo (1998a) utilizaram-se de modelagem numérica para determinar resistências do concreto de cimento Portland necessárias ao emprego do WTUD. Para tanto serviram-se do programa computacional FEACONS 4.1 SI⁴, cuja malha de elementos finitos foi cuidadosamente discretizada para uma maior confiabilidade dos resultados. Este estudo concluiu que a posição crítica da carga encontra-se no canto das placas de WTUD.

Em estudo semelhante, agora com vista à resistência do concreto a ser utilizado, Balbo (1999b) chega à conclusão, utilizando-se de equações de fadiga presentes no método da PCA/1984 para um número de repetições de carga do eixo-padrão de 100 kN variando de 10^6 a 10^8 , para espessuras de concreto asfáltico remanescente entre 70 e 120 mm e de placa de WTUD variando entre 80 e 100

⁴ Versão para o Sistema Internacional de Unidades do programa FEACONS, em duas dimensões (2-D), desenvolvido pelo Prof. Mang Tia da Universidade da Flórida, com apoio do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP), em 1997.

mm com dimensão de placas de 1,2 x 1,2 m, que o emprego desta técnica requer a utilização de concretos com resistência entre 2,9 e 8,3 MPa.

Torna-se evidente a necessidade não só do uso de concretos com alta resistência à tração na flexão como também que esta seja adquirida em um curto espaço de tempo, visto que o WTUD predispõe-se a reabilitar pavimentos em uso, sendo quase que uma obrigatoriedade sua liberação rápida ao tráfego.

No que refere-se ao emprego de fibras no CCP, Balbo e Rodolfo (1998a) citam ainda um estudo realizado por S. P. Shah indicando que para haver um ganho substancial de resistência à tração no concreto, o consumo destas devem ser superiores a 2% do volume de concreto. Tal fato acaba por inviabilizar economicamente seu emprego e tecnicamente pois com um consumo tão elevado, as fibras acabariam por dificultar a mistura e o manuseio deste concreto, trazendo problemas indesejáveis ao concreto endurecido.

Contudo, o emprego de fibras é indicado apenas para melhorar a tenacidade do concreto e também o seu comportamento pós-fissuração das placas de WTUD. Uma ressalva faz-se necessária neste momento; tal comportamento somente será melhorado se o módulo de elasticidade da fibra for superior ao do concreto, caso contrário, no momento da ruptura do concreto, as fibras já estariam rompidas, não podendo contribuir para a melhoria do desempenho das placas após este estágio.

Webb e Delatte (2000) discorrem ainda sobre a necessidade de um estudo conclusivo sobre os reais benefícios do emprego de fibras no WTUD uma vez que nenhum parecer definitivo foi alcançado até o momento.

No experimento precursor da técnica de reforço de pavimentos asfálticos com camadas aderidas ultradelgadas de CCP, o concreto utilizado, conforme relatado por Mack et al (1993), era de alta resistência inicial (especificado 27,59 MPa em 18h), utilizando-se de fibras de polipropileno. O consumo dos materiais foram de, em kg/m³, 474,4; 1.068,8 e 948,2; de cimento, agregado graúdo e miúdo, respectivamente. O teor de ar incorporado foi de 4 a 6%. O consumo de fibra de polipropileno foi de 1,78 kg/m³ e possuía o intuito de aumentar a tenacidade e integridade do CCP após fissuração, conforme relato encontrado em Risser et al (1993). Já a taxa de utilização do superplastificante foi de 4,33 l/m³.

Nesta ocasião, o módulo de elasticidade do concreto foi de 34,47 GPa, resistência à compressão de 23,6 MPa em 24 h e 51,07 MPa em 28 dias. A resistência à tração na flexão foi de 5,23 e 7,07 MPa, nas mesmas idades, respectivamente.

No primeiro WTUD construído no México, o concreto possuía um diâmetro máximo de agregado igual a 9,5 mm, 0,9 kg/m³ de fibras de polietileno, sendo o módulo de ruptura especificado em 5,0 MPa segundo Salcedo (1996). O módulo de elasticidade do concreto foi determinado experimentalmente, com o uso de *strain-gages*, chegando ao valor de 23 GPa aos 12 dias, quando sua resistência à tração na flexão era de 2,94 MPa.

Armaghani e Tu (1997) descrevem a composição do concreto utilizado nas três pistas construídas na Flórida, que contou inclusive com cinza volante. A Tabela 1.2 mostra a dosagem dos concretos de cada uma das pistas.

Tabela 1.2 Concreto aplicado na Flórida, em *Gainesville* (Fonte: Armaghani e Tu, 1997)

	Pista 1	Pista 2	Pista 3
Cimento I (kg/m³)⁵		444,75	
Cimento II (kg/m³)⁶	349,87		450,68

⁵ Cimento I é classificado como Cimento Portland Comum pelas normas americanas.

⁶ Cimento II é classificado como Cimento Portland com Moderada Resistência a Sulfatos, pelas mesmas normas.

Cinza Volante (kg/m³)	88,95		
Ag. Graúdo D_{max} = 25 mm (kg/m³)		1.067,40	
Ag. Graúdo D_{max} = 19 mm (kg/m³)	1.037,75		
Ag. Graúdo D_{max} = 9 mm (kg/m³)			913,22
Ag. Miúdo (kg/m³)	598,93	634,51	830,20
Superplastificante (l/m³)	3,55	3,55	4,05
Fibra de Polipropileno (kg/m³)	1,78	1,78	
Fibra de Poliolefina⁷ (kg/m³)			11,86
Fator a/(cim + cinza)	0,38	0,38	0,39
Aditivo Incorp. De Ar (l/m³)	0,62	0,12	0,02
Plastificante (l/m³)	0,68	0,15	0,44
Resist Compressão (MPa)	52,24	57,23	51,68
Resist Tração Pura (MPa)	4,36	4,64	4,36
Resist Tração Flexão (MPa)	7,03	5,62	6,33
Mód Elasticidade (GPa)	34,45	33,04	29,53

Na primeira utilização do WTUD em estradas da Flórida, tendo em vista que o primeiro experimento foi realizado no pátio do *Florida Department of Transportation* (FDOT), Armaghani e Tu (1998) indicam o concreto utilizado, especificado com uma resistência à compressão de 17,5 e 40 MPa, para 24 h e 28 dias. A Tabela 1.3 revela o consumo dos materiais empregados bem com outras informações pertinentes.

⁷ Poliolefina é um fibra sintética que difere da fibra de polipropileno por apresentar um módulo de elasticidade três a quatro vezes maior.

Tabela 1.3 Características do concreto empregado na I-10 Flórida (Fonte: Armaghani e Tu, 1998)

		Concreto Com Fibra	Concreto Sem Fibra
Cimento I (kg/m³)		362	364
Ag. Miúdo (kg/m³)		792	802
Ag. Graúdo (kg/m³)		984	991
Superplastificante (l/m³)		1,39	1,39
Fibra de Polipropileno Fibrilada⁸ (kg/m³)		1,8	
Fator a/c		0,39	0,39
Ar Incorp. (ml/m³)		73	116
Resist Compressão (MPa)	24 h	19	31
	28 dias	47	57
Resist Tração Flexão (MPa)	7 dias	6	7
	28 dias	6	8
Resist ao Cisalhamento (MPa)	28 dias	1,53	2,27
Mód Elasticidade (GPa)	28 dias	33,53	37,95

Na pista experimental construída em 1994, na *Iowa Highway 21*, o concreto utilizado, conforme mencionado em Cable et al (1997), não foi do tipo *fast-track* e possuía, nas seções em que as fibras de polipropileno (monofiladas⁹ ou fibriladas) foram utilizadas, um consumo de 1,8 kg/m³, conforme utilizado em Kentucky no primeiro experimento com WTUD. A Tabela 1.4 descreve as demais propriedades do concreto utilizado.

Tabela 1.4 Traço volumétrico do CCP utilizado na *Iowa Highway 21* (Fonte: Cable et al, 1997)

	Tipo de Concreto	
	C-3WR-C	C-3WR
Cimento (m³/m³)	0,092	0,108
Cinza Volante (m³/m³)	0,019	
Ag. Miúdo (m³/m³)	0,307	0,309
Ag. Graúdo (m³/m³)	0,375	0,377
Água (m³/m³)	0,147	0,146
Fator a/c	0,43	0,43
Índice	0,48	0,48
Máximo Ar Incorporado (%)	6	6

Em apenas dois anos de observações, Cable et al (1997) ressaltam que o desempenho das placas mais delgadas de CCP que utilizaram-se de concreto com fibras foi melhor que aquelas que não foram reforçadas com este tipo de material. Porém, contra-argumentam a necessidade de maior tempo para um parecer conclusivo sobre o assunto.

Em um aeroporto da cidade americana de *St. Louis, Missouri*, que tiveram placas de WTUD instrumentadas como objetivo de fornecer parâmetros para o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de WTUD, o concreto de cimento Portland utilizado possuía a dosagem e características apresentadas na Tabela 1.5.

Tabela 1.5 CCP utilizado em *Missouri* (Fonte: Mack et al, 1997)

⁸ Fibras de Polipropileno Fibriladas são fibras sintéticas que, ao serem aplicadas no concreto, abrem-se formando um conjunto de malhas constituídas de fibras interligadas, semelhante à uma rede de pescaria, porém de diâmetro muito menor e presente em grande número na massa de concreto.

⁹ Fibras de Polipropileno Monofiladas são aquelas fibras normalmente utilizadas no concreto, em que seus filamentos não agem de forma interligadas, mas de forma individual.

Materiais ou Propriedades	Quantidades ou Valores
Cimento	303,6 kg/m ³
Cinza Volante	47,6 kg/m ³
Ag. Miúdo	751,8 kg/m ³
Ag. Graúdo	1.118,5 kg/m ³
Fator a/c	0,37
Ar incorporado	0,084 ml/kg de cimento
Plastificante	0,261 ml/kg de cimento
Fibra de Polipropileno	1,79 kg/m ³
Resist. Tração na Flexão aos 28 dias - Especificada	4,65 MPa
Resist. Tração na Flexão aos 28 dias – Laboratório	6,90 MPa
Resist. Tração na Flexão aos 28 dias - Pista	4,24 MPa

No experimento relatado por Silfwerbrand (1997) na Suécia, uma resistência à compressão de 80 MPa, aos 28 dias, foi especificada ao concreto que foi aplicado com e sem fibras de aço.

Tabela 1.6 Concreto empregado na *Swedish National Road 255*, Suécia, em 1993 (Fonte: Silfwerbrand, 1997)

Materiais ou Resistência	Concreto Convencional	Concreto Reforç. com Fibras de Aço
Cimento (kg/m³)	480	480
Microssílica (kg/m³)	15	15
Ag. Miúdo (kg/m³)	840	840
Ag. Graúdo (kg/m³)	910	910
Fator a/(cim + micross)	0,3	0,3
Fibra de Aço (kg/m³)		40 a 50
Resist Compressão (MPa, 28d)	94	86
Resist Tração Flexão (MPa, 28d)	8,1	7,2

Um fato interessante no uso de fibras de aço no WTUD na Suécia foi o desgaste superficial surgido nas placas motivado pela incorreta homogeneização e trabalhabilidade adquirida pelo concreto com este uso, conforme Silfwerbrand (1997). Outra observação pertinente decorre das baixas temperaturas encontradas no inverno sueco que retardaram em muito o tempo de pega do cimento, fator que deve ser considerado no emprego de WTUD que exija uma rápida liberação ao tráfego. Uma solução apontado pelo autor é o pré-aquecimento do CA, momentos antes da concretagem.

Seções de WTUD executadas na *Virginia* utilizaram-se de concretos com e sem fibras, porém sempre utilizando-se de escória de alto-forno. Os dados contidos nas Tabelas 1.7 e 1.8 foram retirados de Sprinkel et al (1997) e melhor definem o concreto empregado em 1995.

Tabela 1.7 Características do CCP empregado na *Virginia*, EUA (Fonte: Sprinkel et al, 1997)

	Seção C *	Seção C ₁ **
Cimento (kg/m³)	251	226
Escória de Alto-Forno (kg/m³)	167	151
Ag. Miúdo (kg/m³)	792	758
Ag. Graúdo (kg/m³)	880	1.051
Fator a/(cim + escória)	0,45	0,41
Ar Incorp (%)	6 +/- 2	6 +/- 2
Plastificante (l/m³)	0,77	0,77
Slump (mm)	76	51

* Seção com WTUD de 51 mm de espessura, que empregou agregado de diâmetro máximo de 13 mm;

** Seção com WTUD com espessura de 76 e 102 mm, com agregado máximo de 25 mm.

Tabela 1.8 Consumo de Fibra e Resistência para o surgimento da primeira fissura no CP (Fonte: Sprinkel et al, 1997)

Tipo de Fibra	Consumo (kg/m ³)	Resist. Tração na Flexão (MPa)
Sem Fibra – Seção C		4,94
Sem Fibra – Seção C₁		4,67
Polioléfina	11,9	4,86
Polipropileno – Monofilado	3,0	4,83
Aço	39,7 – 44,5	5,12 – 5,5

Segundo Sprinkel et al (1997), as fibras foram utilizadas para aumentar a tenacidade do concreto e controlar o surgimento de fissuras.

1.1.3.7 Gradiente Térmico Presente no WTUD

Antes de analisar o efeito do gradiente térmico sobre as placas de WTUD, serão apresentadas algumas considerações relacionadas a este efeito sobre placas de pavimento de concreto de cimento Portland convencional, visto que o empenamento, tanto devido ao gradiente térmico quanto higroscópico, foi primeiramente observado neste tipo de pavimento. Depois de entendido o mecanismo envolto nesta problemática, serão mencionados alguns relatos encontrados na literatura a respeito deste efeito sobre o WTUD.

Durante o dia, a parte superior da placa de concreto está sujeita a uma temperatura maior que a parte inferior da mesma, tendendo a expandir o topo e contrair as fibras inferiores da placa. Contudo, esse movimento é restringido pelo peso próprio do elemento. Desta forma, surgem tensões de compressão nas fibras superiores e de tração na parte inferior da placa. Durante a noite ocorre o inverso.

Outra maneira de explicar o efeito do gradiente térmico sobre as placas de concreto utiliza-se da teoria de Westergaard, assumindo a hipótese de Winkler, na qual considera a estrutura de fundação das placas como sendo um líquido denso, representado por um conjunto de molas.

Assumindo tal teoria, durante o dia ter-se-ia um empenamento conforme mostrado pela Figura 1.3, devido aos efeitos de distensão e contração das fibras superiores e inferiores, respectivamente. Com a estrutura de suporte da placa trabalhando como molas ligadas à placa, o movimento de empenamento induz uma compressão nas molas situadas nas extremidades da placa, como reação, estas molas tentam levantar a placa nestes pontos. Na região interna ocorre o processo inverso, as molas são distendidas e tentam baixar a placa nestes locais. Conciliando estes dois efeitos, tem-se compressão nas fibras superiores e tração nas fibras inferiores.

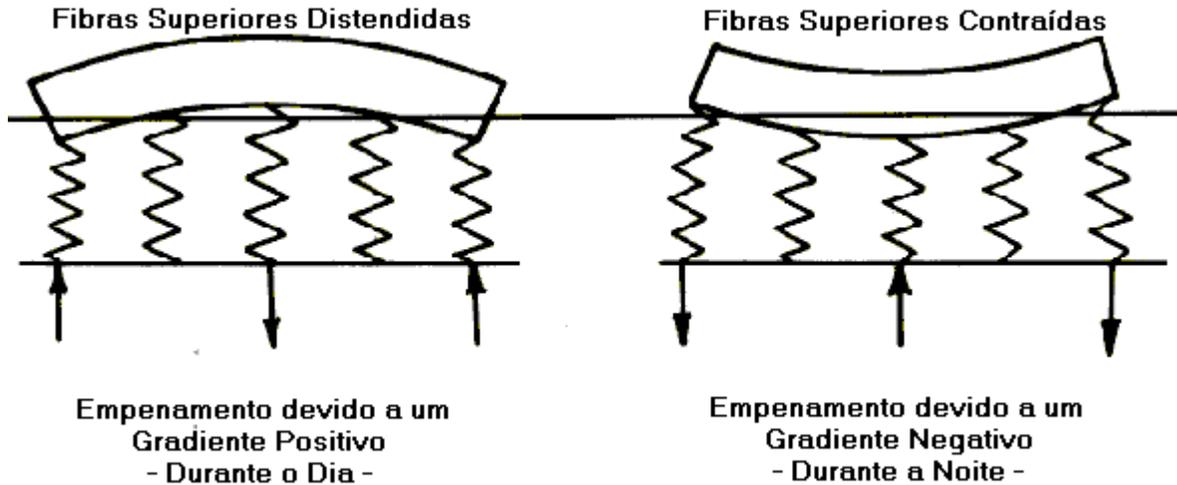


Figura 1.3 Empenamento das Placas de Pavimentos Convencionais de CCP (Fonte: Huang, 1993)

No que diz respeito aos pavimentos de concreto normalmente utilizados, o efeito de empenamento da placa é de grande importância por induzir tensões na placa, tensões estas muitas vezes desconsideradas nos métodos de dimensionamento normalmente utilizados. Tanto o método de da PCA como da AASHTO, não fazem referência ao cálculo das tensões induzidas no pavimento por este efeito. Com os efeitos de temperatura e carregamento proveniente de veículos, tem-se um nível de tensão superior àquele previsto em projeto, o que poderá proporcionar um desempenho indesejado do pavimento dimensionado.

O método da PCA/84 menciona ainda que o efeito causado pelo empenamento sobre as placas deve ser controlado pelo projetista através da escolha correta da largura e comprimento das mesmas, podendo este lançar mão inclusive de armadura distribuída descontínua.

A PCA deixa claro ainda a dificuldade em se considerar tal efeito no dimensionamento, evidenciando a importância de modelagem numérica acompanhada de calibração de campo.

Desde a década de 20, o problema de empenamento vem despertando o interesse de muitos pesquisadores. As primeiras observações relativas a este problema foi realizado por Older (1924), em uma pista experimental na cidade de *Bates*, no estado de *Illinois*. Older (1924), fundamentado por suas observações de campo, concluiu que as variações térmicas do ar rapidamente afetavam a temperatura superficial da placa e que a temperatura nas partes mais internas da placa necessitam de um maior tempo para sofrerem uma modificação perceptível. No final de seu estudo, conclui ser importante o efeito do gradiente térmico pelo qual as placas estarão submetidas visto que tal efeito induz tensões, mesmo que não tenha conseguido mensurá-las.

Em 1930, iniciou-se o *Arlington Experimental Farm.*, que tinha entre outros objetivos, estudar os efeitos das condições climáticas sobre as placas de concreto de cimento Portland. Neste experimento, Teller e Sutherland (1935) observaram pela primeira vez a não-linearidade do gradiente térmico, concluindo que a linearidade deste gradiente levaria a uma condição mais desfavorável. Ao final do experimento, os autores relataram a existência de uma variação de temperatura média do pavimento durante o ano de $26,7^{\circ}\text{C}$ e uma tensão de tração longitudinal de $2,5\text{ MPa}$ devido ao efeito térmico.

Em 1940 foi construído um pavimento de concreto no estado americano de *Minnesota*, com placas de $0,18\text{ m}$ de espessura, $4,95\text{ m}$ de largura e $5,10\text{ m}$ de comprimento, assente em subleito bem drenado de areia fina argilosa. Durante cinco anos foram feitas leituras periódicas, obtendo as seguintes temperaturas máximas: $42,2^{\circ}\text{C}$ no centro da placa; 50°C no topo da placa e $36,4^{\circ}\text{C}$ do ar. Swanberg (1945) justifica a importância de se obter as informações anuais de diferenciais térmicos

para que se possa saber o número anual de repetições de carga em que o pavimento estará sujeito a uma condição desfavorável de ação combinada tráfego/gradiente térmico.

Dois anos após o término do experimento em *Bates, Illinois*, Westergaard (1926) realizou um estudo teórico sobre placas de concreto de cimento Portland, assumindo uma série de suposições, assim descritas:

- Tamanho de placa infinito;
- Total contato entre a placa e o subleito, sem a existência de um gradiente térmico na placa;
- Placa analisada isoladamente, sem transferência de carga;
- Fundação semi-infinita;
- Roda simples solicitante.

Um ano após, Westergaard (1927) complementou o trabalho anterior adicionando mais algumas considerações em seu estudo:

- Peso próprio da placa;
- Fez valer a superposição de efeitos para as cargas e efeito térmico;
- Linearidade de distribuição térmica ao longo da espessura da placa;
- Comportamento noturno da placa inverso do comportamento diurno.

Pioneiro na análise das tensões oriundas dos gradientes térmicos nas placas, Westergaard (1927) analisou tais tensões sob duas maneiras. A primeira para pavimentos novos, sem que a resistência de projeto tivesse sido atingida, não aberto ao tráfego, visto que algumas observações mencionavam o surgimento de fissuras em pavimentos nestas condições. A segunda para o pavimento sujeito ao tráfego e com a resistência de projeto.

Para o primeiro caso foi analisado apenas o efeito da variação térmica e o segundo foi analisado o efeito combinado da carga e da temperatura. A análise de Westergaard (1927) foi realizada para cargas de canto, bordo e centro, combinados com variações sazonais e diárias de temperatura. O autor conclui que a variação térmica sobre as placas tende a expandi-la ou contraí-la, e que tal tendência será combatida pelo atrito existente entre a placa e o subleito.

Barber (1957) contribuiu muito para o entendimento do assunto tentando equacionar as temperaturas pelas quais as placas estariam submetidas, chegando a várias conclusões de grande valia, entre elas:

- Indicou a possibilidade de correlacionar temperaturas de superfície com os valores informados pelas agências de tempo a fim de universalizar tais temperaturas da placa;
- Possibilitou o cálculo da temperatura tanto da superfície quanto de qualquer outra profundidade da placa, bastando para isto o conhecimento dos valores exatos de suas propriedades térmicas e das condições ambientais.

A análise por meio de modelagem numérica pode simular uma variação rápida de temperatura, proporcionando precisão nos valores obtidos como resposta e reduzindo o tempo do experimento de campo. Obviamente que os resultados devem ser cuidadosamente analisados e de preferência calibrados com dados obtidos em campo.

Lee e Darter (1994) apresentaram um trabalho que se utilizava de modelagem por elementos finitos para o estudo, individual e combinado, do efeito do carregamento e do empenamento sobre as tensões no bordo de um pavimento de concreto de cimento Portland.

Mirambell (1990) utilizou-se de modelagem numérica para concluir que as tensões causadas por efeito térmico são da mesma magnitude das causadas pelo tráfego. O autor ainda comenta que a

distribuição não-linear das temperaturas na espessura da placa conduz a valores máximos de tensões combinadas.

Mohamed e Hansen (1998) desenvolveram um modelo para estimar as tensões de empenamento devido à variação não-linear dos gradientes térmicos, concluindo que a linearidade deste gradiente poderia subestimar a tensão de tração no fundo da placa de um fator de 3, para as primeiras horas da manhã.

Faraggi et al (1987) apresentaram um método para a determinação da frequência e variação dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto a partir de parâmetros climáticos, tais como variação de temperatura e insolação medidos em campo na Espanha. Ao final de seus estudos, os autores concluíram que o efeito da ação simultânea das cargas do tráfego e do gradiente térmico não corresponde à soma das tensões causadas pelo tráfego e pelo efeito térmico.

No Chile, Poplete et al (1988) estudaram a influência das condições climáticas em pavimentos de concreto simples sem barras de transferência. O experimento estendeu-se durante os anos de 1986 e 1987. Os autores acabam concluindo que a situação de empenamento mais crítica acontece quando ocorre o contato parcial entre a placa e sua fundação nos bordos, situação diferente da consideração da maioria das análises (que supõem contato pleno entre a placa e sua fundação). Sendo assim, surgem tensões de tração na superfície do pavimento, que podem ser causadoras das fissuras transversais no centro da placa de pavimentos novos.

A experiência relatada por Richardson e Armaghani (1987) mostrou que a máxima tensão de compressão devido a uma distribuição não-linear do gradiente térmico, foi de 0,8 MPa às 13h. Este valor é insignificante comparado aos 35 MPa de resistência à compressão do concreto das placas instrumentadas. A máxima tensão de tração encontrada foi de 0,8 MPa às 18h, valor considerado insignificante quando comparado com os 4,7 MPa de resistência à tração verificada para o concreto utilizado. Porém, a última observação apontada pelos autores acima mencionado pode ser questionada uma vez que, conciliada com o tráfego, as tensões poderiam elevar significativamente a relação de tensões, reduzindo a vida à fadiga do material.

Choubane e Tia (1992) monitoraram a temperatura, no estado da Flórida, no interior de placas de concreto. Pretendiam visualizar como se distribuía a temperatura ao longo da espessura da placa. Os autores dividiram a temperatura no interior da placa em três componentes: componente que causa deslocamentos axiais (de tração ou compressão); componente que causa empenamento (linear) e componente não-linear.

Os autores anteriormente mencionados realizaram uma análise comparativa dos dados coletados de campo e daqueles obtidos a partir do programa FEACONS e também pelas equações de Bradbury. Pelas equações de Bradbury concluiu-se que a máxima tensão de empenamento ocorre no interior da placa e ao longo do eixo longitudinal, sendo tais tensões um pouco mais altas do que aquelas obtidas pelo FEACONS durante o período do dia, e muito próximas daquelas referentes ao período da noite.

Alguns fatores exercem forte influência sobre as tensões induzidas no CCP devido ao empenamento. Um destes fatores é a rigidez da base sobre a qual as placas de concreto estão apoiadas, sendo que as tais tensões apresentam uma proporcionalidade em relação à rigidez do substrato. Quanto menor for a rigidez da base na qual o pavimento estiver assentado, menores serão as tensões devido ao empenamento que surgirão na mesma. A experiência tem mostrado que espessuras delgadas de concreto construídas acima de placas existentes podem fissurar rapidamente. Uma forma de impedir estas fissuras nestes casos é empregar camadas relativamente espessas ou aderi-la à placa já existente.

Balbo (1996) apresenta uma análise do efeito térmico sobre as tensões máximas de tração induzidas na borda transversal de uma placa com espessura de 0,21 m, para três gradientes diferentes, calculadas pelos modelos propostos por Keller e Westergaard, e por Nishizawa e Fukuda. O módulo

de reação do subleito também variou na análise, tornando-se evidente a importância desta característica elástica sobre o efeito em estudo. A Tabela 1.9 mostra os resultados obtidos.

Tabela 1.9 Tensão (MPa) devido ao Gradiente Térmico (Fonte: Balbo, 1996)

k (MPa/m)	$\Delta\theta$ (°C)	Tensão por Kelley e Westergaard	Tensão por Nishizawa e Fukuda
27,5	4,4	0,42	0,61
27,5	8,7	0,84	0,97
27,5	13,1	1,26	1,27
64,7	7,4	0,52	0,89
64,7	8,7	1,04	1,41
64,7	13,1	1,55	1,85
98,1	4,4	0,55	1,07
98,1	8,7	1,10	1,70
98,1	13,1	1,65	2,22

De acordo com o que foi exposto até então sobre o efeito do gradiente térmico, nota-se de maneira clara a importância da consideração do gradiente térmico no dimensionamento de pavimentos de concreto simples.

A questão da distribuição não-linear da temperatura, que poderia parecer desprezível, tornou-se importante visto que este tipo de distribuição conduz aos níveis de tensão mais desfavoráveis. É importante salientar que o *Arlington Experimental Farm* levou a conclusões inversas talvez motivado pela falta de condições tecnológicas adequadas para esta perfeita determinação, visto que o experimento foi realizado na década de 30.

Porém, permanece a dúvida sobre a possibilidade ou não da superposição de efeitos (tráfego e gradiente térmico) no cálculo das tensões de projeto.

Estas dúvidas surgidas na análise do gradiente térmico sobre placas de concreto de pavimentos convencionais podem ser expandidas às placas de WTUD visto que esta técnica ainda carece de pesquisas capazes de fornecer diretrizes mais precisas sobre o tema. Entretanto, alguns estudos tiveram este intuito e chegaram à conclusões importantes, conforme será visto a seguir.

Armaghani e Tu (1997) observam que o empenamento oriundo do gradiente térmico existente nas placas de WTUD, tende a elevar tais placas, com conseqüente aumento nas tensões máximas de tração no concreto, o que, dependendo da combinação com a carga originada pelo tráfego, pode levar o CCP à ruptura.

Em medições *in situ*, Mack et al (1997) relatam a existência de um gradiente térmico de 7,2°C entre o topo e o fundo da placa de concreto de 89 mm de espessura e 1,27 m de comprimento. Entre o topo do CCP e o fundo do CA (camada com 79 mm, em média), notou-se um gradiente de 11,2°C.

Segundo Wu et al (1998), placas instrumentadas na faixa sul/norte da *Santa Fe Drive*, localizada em *Denver, Colorado*, apresentaram máximos gradientes nas placas de WTUD, com 102 mm de espessura, de -5°C às 6h e 12°C às 14h. O valor total máximo encontrado desde o topo do CCP e o fundo do CA foi de 17°C, sendo que dois terços deste valor atuava no concreto de cimento Portland. Na rodovia *State Road 119*, em *Longmont* também no *Colorado*, o máximo gradiente térmico total foi

de 12^oC, sendo 11^oC atuantes apenas no concreto, sendo a variação do gradiente térmico no CA oscilante entre -1^oC e 1^oC.

Em testes realizados no Japão, Noda et al (1998) relatam que o maior gradiente térmico encontrado em placas de 77 e 88 mm de espessura sobre 150 mm de CA foi de 9^oC, sendo que em 50% do período observado, este valor variou entre +/- 1^oC.

Neste mesmo experimento, observou-se um deslocamento do centro da placa para cima e da periferia do WTUD para baixo, para um gradiente positivo, isto é, temperatura nas fibras superiores maior que nas inferiores, em concordância ao foi observado para as placas de pavimento do concreto simples, visto na Figura 1.3. Movimentação contrária ocorreu para gradientes negativos, segundo Noda et al (1998). Constatou-se também que a perda de aderência contribuiu para um significativo aumento do empenamento.

Nishizawa et al (1999) modelaram um pavimento composto do tipo WTUD considerando o efeito do gradiente térmico sobre este, chegando à conclusão de que para um gradiente negativo, em que a temperatura no fundo do CCP é superior a do topo, a separação das placas de concreto de cimento Portland do concreto asfáltico é superior do que aquela provocada pelo gradiente positivo, sendo que esta separação aumentou com o decréscimo da resistência de cisalhamento na interface CCP/CA.

Com esta sucinta descrição do problema empenamento, percebe-se, com igual ênfase, a importância de um estudo de campo conciliado à uma análise numérica a fim de se obter subsídios técnicos para a análise desta problemática no dimensionamento de placas de concreto para pavimentos, seja este convencional ou do tipo WTUD. Contudo, por se tratar de condições específicas a uma determinada região, tal estudo deveria ser realizado em várias regiões do país e seus resultados teriam sua validade restrita à região onde foram elaborados. Esta importância aumenta ainda mais, uma vez que não encontra-se referenciado na literatura, estudos de campo em regiões de clima tropical.

1.1.3.8 Execução

Com a revisão bibliográfica realizada, notou-se a importância de uma execução cuidadosa no desempenho das placas de concreto de cimento Portland ultradelgadas aderidas à camada asfáltica.

Durante o processo executivo, alguns detalhes se forem atendidos, podem alcançar uma melhor qualidade final do emprego desta técnica. Vários destes detalhes serão novamente vistos nos itens 1.2 e 1.3 deste trabalho.

Primeiramente, citar-se-ia a execução da fresagem que tanto influencia a aderência CCP/CA. Esta deve expor o agregado da camada asfáltica de maneira que seja possível sua aderência com a pasta de cimento presente no concreto de cimento Portland.

Quanto à dosagem do concreto, aconselha-se a adição de fibras somente após a colocação do superplastificante a fim de facilitar a mistura dos materiais porém, o clima quente encontrado nas regiões tropicais pode encurtar a vida útil do superplastificante, restando pouco tempo para a operação de concretagem propriamente dita, sendo necessário uma análise mais cuidadosa neste caso. Quando tratar-se de adicionar a microssílica, esta deve ser dosada e misturada antes da colocação do superplastificante e, de preferência, logo após a colocação do cimento Portland.

O controle do abatimento especificado para o concreto é de suma importância uma vez que um abatimento superior ao especificado pode, no caso de ser promovido pelo excesso de água, trazer problemas de resistência e retração por hidratação do concreto.

Apesar de relatos contrários feitos por Cable et al (1997), parece ser conveniente o umedecimento da superfície de CA, momentos antes da concretagem, com a intenção de evitar a perda de água

presente no CCP para a camada asfáltica, segundo preconizam Risser et al (1993) e os artigos publicados por Armaghani e Tu em 1997, 1998 e 1999.

A serragem “verde” das juntas deve ser realizada, de acordo com Armaghani e Tu (1998), sobretudo em regiões quentes, a fim de evitar o surgimento de fissuras por retração térmica durante o processo de pega do cimento Portland, fato que torna-se ainda mais importante visto o alto consumo de cimento requerido nos concretos empregados em WTUD e à perda mais rápida de água presente no CCP, por evaporação, uma vez que estas placas possuem maior área por unidade de volume, conforme relatam Mack et al (1998).

Outro fator importante relacionado a serragem das juntas, é que estas devem ser serradas à uma profundidade suficiente para evitar que as placas trabalhem unidas na flexão e, até mesmo, para evitar problemas ainda maiores em relação ao empenamento destas.

Dado o alto número de juntas existentes no WTUD aliado ao tipo de CCP empregado, Webb e Delatte (2000) recomendam cuidados especiais na hora de dimensionar a equipe e os equipamentos necessários nesta fase construtiva.

A cura também é um fator preponderante no desempenho desta técnica, sendo ideal aplicar o dobro da quantidade de solução de cura química geralmente aplicada em pavimentos convencionais de CCP, conforme indica a ACPA (1998). A cura por via úmida combinada com o emprego de mantas especiais, capazes de reter a água e liberá-la aos poucos para o CCP, configura-se numa ótima alternativa quando da disponibilidade de água no local.

A maioria dos fatores relacionados ao desempenho de WTUD, comentados até então, fizeram parte de um estudo mecanicista realizado em 1998, contando com a parceria entre a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP). Este estudo contou com a modelagem, por elementos finitos, de diversas configurações de estruturas de pavimentos do tipo WTUD, com suas propriedades variando dentro de limites encontrados na prática. Para tanto foram discretizadas malhas no programa FEACONS 4.1 SI, já comentado anteriormente, a fim de obter maior exatidão nos valores de tensões, deslocamentos e deformações.

Este estudo acabou por fornecer subsídios para o dimensionamento de WTUD. Todas as análises comparativas apresentadas até então estão de acordo com o relatório conclusivo deste projeto, LMP e ABCP (1998), sendo ressaltado ainda que o projeto estrutural de WTUD somente poderá ser assegurado quando forem conhecidas, com perfeição, todas as condições de interação carga-estrutura, evidenciando a importância de uma pesquisa de campo, instrumentada, a fim de consolidar a análise apresentada, conforme ressalva já realizada.

1.2 Desempenho Observado em Experiências Anteriores

1.2.1 Experiência Americana

Louisville, Kentucky

O primeiro experimento noticiado da utilização de WTUD ocorreu em setembro de 1991, em *Kentucky*, na cidade de *Louisville*, próximo a um depósito de lixo desta cidade. Mack et al (1993) e Risser et al (1993) descrevem este experimento que contou com duas seções de teste.

Conforme Risser et al (1993), este experimento foi realizado pela *American Concrete Pavement Association* (ACPA) em parceria com a Associação das Concreteiras do estado de *Kentucky*

(KRMCA), tendo estas instituições escolhido o local de realização do experimento por apresentar condições de realização acelerada da pesquisa. O projeto é datado de 1990 e sua execução foi realizada em 1991. Comentam ainda que a avaliação do desempenho foi realizada através de sondagens do solo e do CA antes da construção do WTUD, medidas de deformações¹⁰, com auxílio do FWD¹¹ antes e depois do WTUD, e por medidas de deformações obtidas por strain-gages¹².

Risser et al (1993) informa que antes da concretagem foi executada a fresagem do CA com dupla finalidade. Primeiro, tornar plana a superfície e garantir uniformidade de espessura, e em segundo lugar, tornar rugosa a superfície do CA a fim de permitir uma melhor aderência entre as duas camadas em questão. No momento da concretagem, tomou-se o cuidado de molhar o CA para que este não absorvesse muita água de amassamento do concreto. A cura foi realizada por via química.

A primeira seção possuía placas quadradas de CCP de 1,83 m de largura e 89 mm de espessura. A segunda tinha 51 mm de altura e duas dimensões de placas diferentes, 0,61 e 1,83 m. Todas as placas estavam assentes em 100 mm de camada asfáltica fresada. As juntas foram serradas após três horas da concretagem e não foram seladas. Cada seção possuía uma extensão total de 83 m. A Figura 1.4 ilustra melhor o projeto do primeiro WTUD executado.

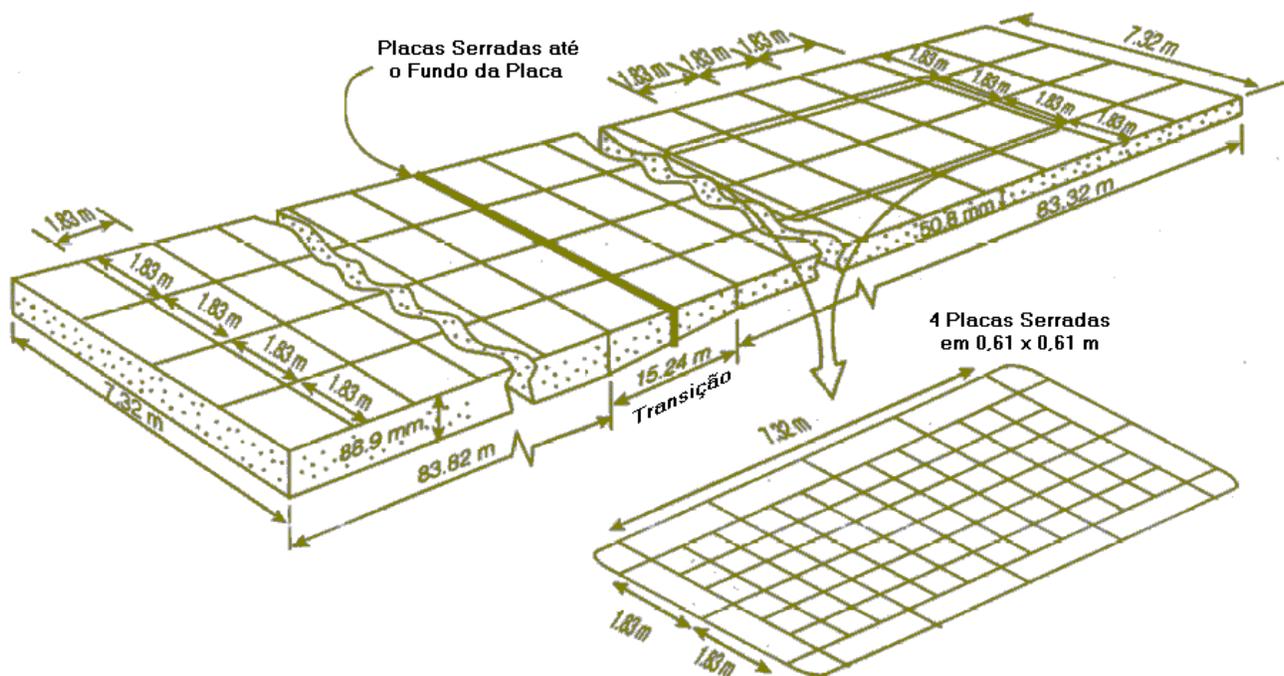


Figura 1.4 Detalhes do WTUD executado em *Loisville, Kentucky* (Fonte: Mack, 1993)

Para execução do WTUD e liberação da via ao tráfego, Risser et al (1993) relatam a existência de apenas 41,5 h, fato que condicionava o uso de concreto de alta resistência inicial. Para tanto, uma dosagem especial foi utilizada com as características descritas na seção 1.1.3.6.

Após um número de repetições de carga de um eixo-padrão (constituído de rodas duplas com um peso total de 80 kN) de aproximadamente 5×10^5 , o que ocorreu em um ano, verificou-se 6% de

¹⁰ O termo “deformação” parece ser mais aceito que o termo “deflexão” muitas vezes utilizado no meio rodoviário referindo-se às medidas realizadas por equipamentos próprios para o traçado da bacia de deformação do pavimento, capaz de dar idéia dos módulos de elasticidade das camadas estruturais do mesmo.

¹¹ *Falling Weight Deflectometer* (FWD) – equipamento utilizado na determinação da bacia de deformações de pavimentos.

¹² *Strain-gages* – dispositivo pelo qual mede-se a deformação específica de um material ou estrutura pela variação de sua resistência elétrica.

placas defeituosas, todas possuindo 1,83 m, sendo as fissuras de canto a principal patologia observada. Em nenhuma das placas de 0,61 m notou-se qualquer tipo de fissura.

Conforme Risser et al (1993), o volume de tráfego que solicitou o WTUD em um ano representaria 20 anos de uso em locais de baixo volume de tráfego, tais como ruas urbanas e estacionamentos.

As fissuras surgidas foram atribuídas pelos autores ao maior empenamento das placas de 1,83 m refletido nos elevados deslocamentos específicos encontrados nos cantos destas placas, fatores que contribuíram para a perda de aderência entre o CCP e o CA, elevando assim o nível de tensão de tração nesta região.

Uma análise analítica e numérica a fim determinar as tensões impostas ao concreto foi realizada por Mack et al (1993), acabando por concluir que a teoria clássica introduzida por Westergaard não é adequada a este tipo de pavimento baseado na elevada tensão de tração a que o concreto estaria submetido, bem acima dos valores resistentes encontrados no concreto aplicado, o que vinha de encontro ao desempenho observado. A análise por meio de elementos finitos num sistema de duas camadas mostrou-se coerente na determinação dos esforços de um pavimento de comportamento composto.

A modelagem numérica, referida anteriormente, concluiu também que o valor do módulo de reação do subleito (k_{subleito}) tem pouca influência nas tensões máximas de tração na flexão solicitantes do CCP, porém interfere sensivelmente nas deformações sofridas pelo pavimento, mesma conclusão obtida na publicação LMP e ABCP (1998).

Tido como um sucesso, o experimento acabou por abrir caminhos para a utilização do WTUD em outros países. Risser et al (1993) acrescentam que este experimento mostrou a viabilidade de uso de pavimentadoras convencionais, com fôrmas deslizantes, na execução de WTUD com concretos especiais, enfatizando também a eficiência do uso de fibras de polipropileno e superplastificantes em concretos de alta resistência inicial aplicados em vias que requerem uma rápida liberação ao tráfego (*fast-track*).

Gainesville, Flórida

Armaghani e Tu (1997) descrevem três pistas experimentais construídas na cidade norte-americana de *Gainesville*, na Flórida, no pátio da implementadora do projeto, *Florida Department of Transportation* (FDOT), em 1996, que tinham como objetivo avaliar projeto, execução e desempenho do WTUD. A Tabela 1.10 faz uma síntese das características básicas de cada uma destas pistas.

Tabela 1.10 Características das Pistas em *Gainesville* (Fonte: Armaghani e Tu, 1997)

	Pista 1	Pista 2	Pista 3
Espessura CCP (mm)	100	75 e 100	50
Pavimento Antigo	25 mm de CA; 150 mm base*; subleito natural bem compactado	38 mm de CA; 163 mm de base**; subleito natural bem compactado	38 mm de CA; 163 mm de base**; subleito natural bem compactado
Preparo do CA	Fresagem, vassouramento, reparo das fissuras com CAP ¹³	Fresagem e vassouramento	Fresagem
Dimensões das Placas (m)	1,22 x 1,22 e 1,83 x 1,83	1,22 x 1,22 e 1,83 x 1,83	0,92 x 0,92; 1,22 x 1,22 e 3,6 x 3,6
Tipo de Fibra	Polipropileno	Polipropileno	Polioléfina

* Base por aproveitamento, constituída de um pavimento de CCP preexistente;

** Base estabilizada composta por areia e calcário;

¹³ CAP, Cimento Asfáltico de Petróleo.

Armaghani e Tu (1997) relacionam algumas peculiaridades executivas aplicadas neste experimento. Menciona, por exemplo, que a superfície do CA foi previamente umedecida antes da concretagem, procedimento também adotado em *Louisville*. O adensamento do concreto foi executado com vibradores de imersão e régua vibratórias. O acabamento final foi dado com auxílio de vassouras de aço, a fim de que a superfície de CCP fosse texturizada, proporcionando aderência ao pneu e, principalmente, micro-canais por onde a água possa escoar nos dias de chuva, aumentando a qualidade da drenagem superficial. A cura foi por via química, com a utilização de um pigmento líquido branco e após isto, um lençol plástico foi colocado sobre o concreto que recebeu água durante três dias. A serragem das juntas foi realizada 2 ou 3 horas após a concretagem, com uma serra para o corte em concreto relativamente fresco. No momento do corte, a resistência à compressão do concreto foi obtida em 5,5 MPa. As demais características do concreto estão expostas na Tabela 1.2.

Para as três pistas analisadas, a resistência ao cisalhamento quase sempre superou o valor de 1,4 MPa, fato que conciliado ao desempenho obtido em campo, levaram Armaghani e Tu (1997) a especificar tal valor como mínimo para o projeto de WTUD. As placas que foram aplicadas diretamente sobre a superfície fresada de CA, apresentaram em qualquer fase de uso do WTUD, uma aderência superior aos demais tratamentos da superfície de CA. A espécie de tratamento superficial simples aplicado nos locais onde existiam um grau de fissuração maior, apresentaram os mais baixos valores de aderência, desaconselhando este tipo de tratamento prévio do CA para a construção de placas de WTUD.

Depois de três semestres de experimento e um número de repetições de carga-padrão de um eixo de rodas duplas equivalente a 6×10^4 , o desempenho foi considerado excelente na opinião dos autores. Durante este período, alguns testes utilizando o FWD foram realizados, permitindo algumas conclusões:

- Existe um grande aumento na capacidade estrutural do pavimento após a execução do WTUD, representado pelo sensível decréscimo dos deslocamentos sofridos pelos sensores. Em ensaios realizados antes e depois da construção do WTUD, notou-se uma significativa regeneração da capacidade de suporte do pavimento tendo em vista a redução percentual nos deslocamentos máximos após a execução do referido pavimento. Esta redução foi de 78% para a pista 1, 50% para a pista 2 com 75 mm de WTUD, 78% para a mesma pista com 100 mm de CCP e 44% para a pista 3;
- As placas apresentaram boa aderência e mínimo empenamento visto os baixos deslocamentos medidos pelo FWD durante o período da manhã e tarde.

No que se refere ao surgimento de fissuras, apenas a pista 3 merece referência. Nesta seção, onde haviam placas de 3,6 x 3,6 m, surgiram em cada uma, fissuras longitudinais e transversais que dividiam-nas em quatro sub-placas de 1,83 x 1,83 m. Armaghani e Tu (1997) interpretaram este fenômeno como um indicativo de que as dimensões máximas das placas devam ser de 1,83 m.

Não houve diferença significativa no desempenho relacionadas ao emprego ou não de fibras no concreto, ficando esta análise atrelada a um tempo de observação ainda maior.

No final dos 18 meses, Armaghani e Tu (1997) recomendam o uso de espaçamentos entre juntas de 1,22 a 1,83 m para espessuras de WTUD variando de 75 a 100 mm; caso esta última seja de 50 mm, a dimensão da placa deve ser inferior a 1,22 m.

Interstate (I-10), em Ellaville, Flórida

Entusiasmados com o desempenho em *Gainesville*, a FDOT construiu o primeiro WTUD em rodovia no estado da Flórida. Armaghani e Tu (1998) descrevem algumas peculiaridades deste teste realizado no acesso de uma balança de pesagem de caminhões, na rodovia I-10 em *Ellaville*, no noroeste da Flórida, que teve sua abertura ao tráfego no dia 17 de dezembro de 1997, segundo

Armaghani e Tu (1999). Este local apresentava um CA com sérios problemas de afundamentos nas trilhas de roda e fissuras.

Nos 620 m de extensão, foram executadas faixas com e sem fibra no concreto. Três seções-tipo foram executadas, igualmente dispostas em cada faixa, por sentido. Para as placas com 1,2 x 1,2 m, adotou-se duas espessuras diferentes, 80 e 100 mm. Todas placas de 1,6 x 1,6 m possuíam espessura de 100 mm.

Nos dois sentidos, no início do WTUD, foram executadas placas com dimensões de 1,2 m e 80 mm, devido ao menor tamanho das trilhas existentes, consequência da maior velocidade desenvolvida pelos caminhões. Conforme Armaghani e Tu (1998), próximo às balanças, onde os caminhões tendem a desacelerar e após a pesagem acelerar novamente, as trilhas apresentavam-se mais acentuadas, condicionando a utilização de placas mais espessas, de 100 mm e 1,2 x 1,2 m de lado.

No trecho intermediário, foram executadas seções com 100 mm de espessura e 1,60 m de dimensão horizontal. O acostamento foi executado com 80 mm de espessura, acompanhando as dimensões das placas situadas na faixa de tráfego. A Figura 1.5 permite uma melhor visualização do projeto.

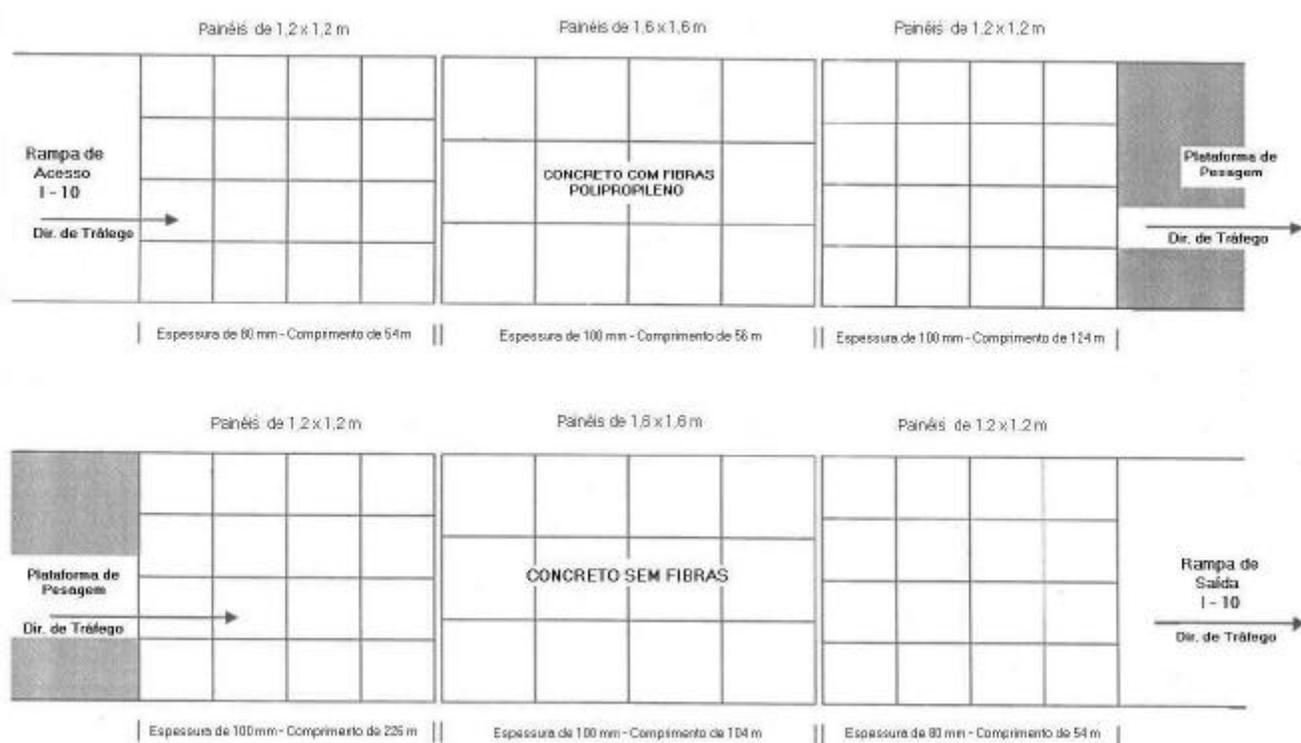


Figura 1.5 Projeto do WTUD utilizado em *Ellaville*, Flórida (Fonte: Armaghani e Tu, 1998)

Antes da concretagem, Armaghani e Tu (1998) mencionam que o CA foi fresado em 40 mm e teve todas as dejetos e poeiras grosseiras removidas, sendo que a espessura desta camada variava entre 88 e 175 mm antes da fresagem. Outro cuidado observado foi a completa separação das placas que possuíam configurações diferentes, proporcionadas pela serragem até o fundo das placas nestes pontos de encontro. Pretendia-se com isto, eliminar possíveis interferências tanto de ordem estrutural quanto funcional.

Armaghani e Tu (1999) indicam ter havido selagem das juntas com silicone no trecho onde não foi feito uso de fibras no concreto. Já em relação à cura, faz-se referência a uma primeira aplicação de produto químico com esta finalidade e, ao contrário do relatado na maioria dos experimentos, não foi usada a molhagem do concreto nas idades posteriores, mas sim uma segunda aplicação deste produto de cura química.

O controle tecnológico foi rígido e baseou-se na resistência à compressão e ao cisalhamento, e também nas condições de trafegabilidade após a abertura do WTUD ao tráfego. Armaghani e Tu (1998) informam que a medida máxima de irregularidade obtida no perfilógrafo, após a concretagem, deveria ser de 110 mm/km. Este valor é considerado restritivo.

Armaghani e Tu (1999) relatam, surpresos, o valor médio de irregularidade encontrado de 45 mm/km, consolidando assim a utilização de máquinas pavimentadoras convencionais na execução de WTUD.

A média das deformações medidas antes da execução do CA era de 31×10^{-2} mm, após a fresagem este valor aumentou em 12%. Logo que houve a abertura ao tráfego, este deslocamento médio foi reduzido em 63% do valor original, sendo igual a 12×10^{-2} mm. Após um semestre, Armaghani e Tu (1999) informam que o deslocamento específico médio era de 13×10^{-2} mm, ainda 56% inferior aquele obtido antes da fresagem do pavimento asfáltico, indicando que o WTUD continua trabalhando com um comportamento composto, capaz ainda de suportar o alto volume de tráfego existente no local.

Até a data da publicação de Armaghani e Tu (1998), nenhuma fissura tinha sido observada devido à ação do tráfego, somente algumas decorrentes de processos executivos falhos, tais como exposição da camada granular por excesso de fresagem e fissuras de retração. Um mês após a abertura ao tráfego do WTUD, 3600 caminhões já haviam sido pesados.

Decorridos seis meses da liberação ao tráfego, quando o número de solicitações do eixo-padrão foi estimado em $6,26 \times 10^5$ por Armaghani e Tu (1999), a maioria das placas fissuradas, que representavam 1% do número total de placas executadas na faixa de rolamento, apresentavam fissuras de canto, sendo considerado um valor aceitável pelos autores do artigo. Os autores acrescentam ainda que o tráfego previsto para um ano, $1,12 \times 10^6$ repetições de carga do eixo-padrão, equivale a 4,8 anos sob um tráfego de médio volume.

Por fim, não houve diferença de comportamento entre placas executadas com ou sem fibras, bem como entre as que tiveram suas juntas seladas e as que não sofreram este tipo de tratamento.

Iowa Highway 21, Iowa

Cable et al (1997) descrevem um experimento executado com a colaboração da *Federal Highway Administration, Iowa Department of Transportation (Iowa DOT)* e *Iowa State University*, realizado em 1994, na *Iowa Highway 21*. Este estudo marcou o início da utilização do WTUD nas principais estradas do estado de *Iowa*.

Segundo Cable et al (1997), o objetivo dos trechos experimentais era avaliar o desempenho desta técnica a longo prazo, sob o enfoque de quatro variáveis principais: espessura e dimensões das placas de CCP, uso de concretos reforçados com fibras e preparação da superfície do CA. Com este intuito, foram realizados levantamentos durante mais de dois anos.

A parte da pista de testes destinada ao WTUD era composta por placas de CCP de 50 e 100 mm, com dimensões de 0,6; 1,2 e 1,8 m, sobrepostas a 75 mm de CA que sofreu três tipos de preparo diferentes: remendo e fresagem superficial, remendo e vassouramento e, por último, reciclagem a frio, *in loco*, dos 75 mm de camada asfáltica existente. Seções idênticas possuíam concreto com ou sem fibras. A dosagem deste concreto encontra-se na Tabela 1.4, vista quando do enfoque da influência do concreto sobre o desempenho do WTUD.

Ao contrário do mencionado nos experimentos anteriormente descritos, Cable et al (1997) relatam que não foi praticada a molhagem da superfície do CA antes da concretagem tendo em vista a consideração de inadequabilidade desta prática.

Após a concretagem, algumas fissuras de retração surgiram no WTUD devido a tardia serragem das juntas.

Cable et al (1997) ao analisarem o desempenho do experimento, atribuíram às condições severas de temperatura a que o WTUD estava submetido, o surgimento de fissuras e demais defeitos observados em 1996, visto que neste ano as temperaturas anuais variaram entre 40 e -30°C . No dia 13 de janeiro deste mesmo ano a temperatura máxima foi de 13°C e no dia 31 deste mês, a temperatura alcançou -29°C . Até antes do primeiro mês de 1996, nenhuma modificação significativa nas condições iniciais do pavimento havia sido observada.

Depois de 2 anos e $2,8 \times 10^4$ solicitações equivalente do eixo-padrão, a totalização dos defeitos observados está apresentada na Tabela 1.11.

Tabela 1.11 Percentagem de Placas Defeituosas, em novembro de 1996, na *Iowa Highway* (Fonte: Cable et al, 1997)

Tipos de Defeitos	Espessura WTUD (mm) / Tamanho das Placas (m)				
	50 / 0,6	50 / 1,2	100 / 0,6	100 / 1,2	100 / 1,8
Fissuras Transversais	0,1	1,8	0,0	0,8	1,7
Fissuras Longitudinais	0,9	1,3	0,0	0,0	0,0
Fissuras de Canto	0,1	2,6	0,0	0,2	0,0
Fissuras Diagonais	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Placas Rompidas	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0

Segundo Cable et al (1997), as fissuras transversais foram atribuídas ao processo construtivo, isto é, à serragem tardia das placas. As fissuras longitudinais, que ocorrem em seções isoladas, não traziam maiores preocupações por serem muito pequenas. Nenhuma das fissuras de canto encontradas estavam sobre o CA fresado, somente onde a preparação da capa asfáltica foi feita com remendo e vassouramento ou reciclagem. Todas placas que foram rompidas com os dois anos de solicitação estavam assentes sobre o CA reciclado. Notou-se também a perda de aderência nas placas de 50 mm, com 0,6 m de dimensão, executadas sobre o CA remendado e varrido e em CCP com mesma espessura, porém com 1,20 m de extensão, onde houve reciclagem do concreto asfáltico.

O uso de fibras foi tido como significativo no melhor desempenho das placas mais delgadas de CCP quando comparadas às de mesma espessura sem o uso destas, conforme Cable et al (1997).

Georgia, Tennessee, Missouri e Colorado

Com o aumento do uso do WTUD nos Estados Unidos da América, a PCA e a ACPA uniram-se, em 1995, para a elaboração de um procedimento para o dimensionamento destas placas. Além de uma revisão bibliográfica, tal estudo contou com levantamentos de desempenho dos WTUD construídos na *Georgia* e *Tennessee*, instrumentação de placas (em *Missouri* e *Colorado*) e modelagem por elementos finitos, inclusive em três dimensões (3-D).

Mack et al (1997) argumentam que as seções levantadas possuíam desempenho contrastantes face às diferentes configurações de camadas e placas. Assim tornou-se possível a análise dos diferentes aspectos relevantes no dimensionamento em questão.

Nas placas instrumentadas em *Missouri*, os máximos deslocamentos relativos medidos entre as placas foram de 0,48 mm (juntas normais), 0,41 mm (juntas serradas até o fim da placa) e 0,63 mm para juntas serradas até o fundo da camada asfáltica, conforme dados de Mack et al (1997). O fato da placa com juntas normais ter apresentado valores maiores de deslocamentos que as serradas até o fim da placa de CCP pode ter sido motivado pela fissuração da placa, devido à retração térmica, até adiante do limite serrado, fazendo com que estas juntas trabalhem igualmente como aquelas que

tiveram sua serragem compreendendo toda a espessura de concreto de cimento Portland. No entanto, por tratar-se de fissuras muito finas, da ordem de 0,5 mm, continua existindo o embricamento entre agregados de placas vizinhas, fato que contribui para a transferência de carga entre placas, o que foi constatado nas provas de carga realizadas nestas placas.

Wu et al (1998) comentam a execução e testes realizados no *Colorado* porém, neste experimento foram utilizadas espessuras de CCP acima dos 100 mm, que parece ser um limite aceito universalmente para WTUD, e ainda com uso de barras de transferência.

Virginia

Testes realizados no verão de 1995 na *Virginia* tiveram como objetivo avaliar a utilização de pavimentos sobrepostos com intuito de prolongar a vida útil de pavimentos comprometidos pela deterioração promovida pelo tráfego, cujo potencial destruidor é aumentado devido a ação do gelo e degelo, tão comum neste estado americano.

Para tanto, Sprinkel et al (1997) relatam a construção de dois trechos de pavimentos de concreto sobreposto a outro revestido com o mesmo material e um de WTUD.

As placas de WTUD foram moldadas com concreto empregando a adição de escória de alto-forno, com e sem uso de fibras; as Tabelas 1.7 e 1.8 fornecem maiores detalhes. Estas possuíam espessuras de 51, 76 e 102 mm. O pavimento antigo continha uma base, por aproveitamento, de 102 mm de concreto asfáltico e um revestimento, também de CA, de 75 mm. Uma fresagem superficial foi realizada antes da concretagem. Sprinkel et al (1997) mencionam ainda o uso de uma pavimentadora convencional, cura por via química à base de uma membrana líquida de coloração branca, sendo que o pavimento foi liberado ao tráfego após seis dias.

Depois de um ano, com o tráfego não mencionado no artigo, Sprinkel et al (1997) cometam o desempenho observado. As placas com espessura de 76 e 102 mm apresentaram poucas fissuras e sem esborcinamento nem escamação do concreto (devido ao gelo e degelo). Porém, as placas com 0,9 x 0,9 e 1,8 x 1,8m, ambas com espessura de 51 mm desenvolveram fissuras de canto, apresentando algumas áreas com esborcinamento, escamação e perda de textura superficial. A abertura das fissuras nas placas de WTUD que utilizaram-se de fibras foram menores que as das placas sem o uso deste material, conforme o esperado.

1.2.2 Experiência Mexicana

Tijuana

Salcedo (1996) comenta um teste realizado na cidade mexicana de *Tijuana*, na primeira metade da década de 1990. O experimento que também foi instrumentado, tinha como objetivo desenvolver tecnologia através de resultados teóricos e práticos, que pudessem munir de informações necessárias, eventuais projetos de recuperação de pavimentos asfálticos com a utilização de WTUD, inclusive analisando seu desempenho à fadiga quando submetido ao tráfego tipicamente urbano.

A espessura de camadas asfáltica era de 50 mm, sem que fosse realizada fresagem. A geometria das placas de cada seção é apresentada na Tabela 1.12.

Tabela 1.12 Configuração das Placas em *Tijuana* (Fonte: Salcedo, 1996)

Seção	Dimensão das Placas (m)	Espessura das Placas (mm)
I	0,90 x 0,90	63,5
II	1,20 x 1,20	88,9
III	1,80 x 1,80	88,9

A superfície de CA foi apenas lavada com água a fim de retirar as partículas de pó e demais dejetos que pudessem afetar a aderência, já que a fresagem não foi executada. Salcedo (1996) informa ainda que as placas foram executadas seguindo as operações convencionais. No entanto, as juntas transversais foram obtidas através da colocação de tiras plásticas, quando ainda o concreto de cimento Portland encontrava-se fresco, tendo estas uma profundidade de 25,4 mm, enquanto que as juntas longitudinais foram serradas somente no dia seguinte à concretagem.

Pretendia-se de início, realizar provas de carga com vários tipos de veículos, porém, com as pequenas deformações medidas pelos *strain-gages*, passou-se a utilizar apenas caminhões conhecidos no México como *Trailer*. Para a seção I, o máximo valor de deformação obtido, para este veículo, foi de 48×10^{-6} mm/mm (48 $\mu\epsilon$), para as seções II e III, estes valores foram, respectivamente, 83×10^{-6} e 70×10^{-6} mm/mm.

Salcedo (1996) apresenta o valor percentual das tensões máximas de tração surgidas nas placas referidas ao módulo de ruptura do concreto, que por motivos de segurança, foi considerado igual a 4,50 MPa, diferente dos 5,0 MPa referidos na seção 1.1.3.6 deste trabalho, a fim de contemplar eventuais falhas na execução da pista. Para o *Trailer*, estas relações foram de 24,5; 41,9 e 35,8 %, para as placas I,II e III, nesta ordem.

Neste teste, o autor acaba fazendo uma conclusão temerária, dizendo que pelo fato de nenhuma placa ter sofrido uma relação de tensão superior a 0,45, conforme preconizam as especificações mais recentes da *Portland Cement Association* (PCA), o WTUD trabalhará sem problemas relacionados à fadiga no CCP, afirmando que tal técnica possui a durabilidade necessária à redução dos custos de manutenção e excelentes condições de serviço. A temeridade da afirmação encontra-se na não consideração de efeitos de empenamento das placas, fadiga no CA e na interface de CCP/CA. Além disto, os modelos de fadiga de concreto utilizado pela PCA não foram desenvolvidos para o tipo de concreto utilizado em WTUD.

Ainda causa estranheza o fato das placas da seção III terem apresentado um valor de deformação inferior ao da seção II uma vez que possuem a mesma espessura e a seção III tem um maior comprimento de placa. Não fica claro qual dos *strain-gages*, em ambos casos, que apresentaram estes valores máximos de deformação.

Guasave

Com o objetivo de aprofundar ainda mais o conhecimento sobre o WTUD bem como as condicionantes que interferem no seu desempenho, Salcedo (1998) comenta um segundo experimento executado no México, em agosto de 1996. Nesta ocasião, uma rodovia próxima a cidade de *Guasave*, no estado de *Sinaloa*, foi escolhida por apresentar similaridade de volume e composição de tráfego, composição das camadas do pavimento, bem como qualidade dos materiais empregados na base e sub-base das principais estradas interestaduais mexicanas.

Assim, relata Salcedo (1998), seria possível com a instrumentação de algumas seções, determinar as tensões críticas solicitantes sob o carregamento de caminhões pesados a fim de estimar sua vida à fadiga e ainda avaliar o desempenho do WTUD, identificando os binômios defeito-causa que por ventura surgissem.

O WTUD foi executado em locais que o CA apresentava fissuras longitudinais e transversais, trilhas de roda variando entre 15 e 25 mm e, em alguns pontos, fissuras do tipo couro de jacaré. Sua estrutura era composta de 100 mm de concreto asfáltico, 130 mm de base granular e uma sub-base de 185 mm de espessura. O tráfego foi determinado em campo e era formado, segundo Salcedo (1998), por 27% de caminhões, 6% de ônibus e 67% de automóveis, para um volume médio diário de 16.400 veículos.

As placas de WTUD executadas tinham 1,0 x 1,0 m com 102 mm de espessura na seção **TI** e 89 mm na **III**. Antes da execução do WTUD não houve a necessidade de fresagem deste CA devido à exposição do agregado.

O concreto utilizado contou com cimento Portland pozolânico, resistência à compressão especificada em 48 MPa aos 28 dias e, na mesma idade, a resistência à tração na flexão deveria ser de 5,1 MPa. O tráfego foi aberto após 72 h do término da concretagem.

A serragem das juntas foram executadas entre 60 e 90 min após a concretagem sendo que em alguns lugares foram observadas marcas da máquina utilizada no corte sobre o concreto, evidenciando uma prematuridade excessiva na serragem.

Após um ano aberto ao tráfego, Salcedo (1998) informa um excelente desempenho. Com a solicitação de 3.200.000 automóveis, 335.000 ônibus e 620.000 caminhões, o WTUD apresentou apenas algumas fissuras de canto onde houve uma serragem precoce das juntas e excelentes condições de aderência CCP/CA conforme ensaios realizados.

1.2.3 Experiência Canadense

Mississauga, Ontario

A primeira experiência envolvendo o emprego do WTUD no Canadá ocorreu em um cruzamento na cidade de *Mississauga*, estado de *Ontario*, em 1995.

Neste local, Sturm e Morris (1998) relatam intensas deformações nas trilhas de roda, com até 100 mm de elevação, propiciadas pelo alto tráfego de caminhões pesados somado ao efeito de parada e retomada de velocidade a que os caminhões estavam sujeitos neste cruzamento.

Duas faixas foram executadas com concreto reforçado por fibras e outra sem esta adição. Onde foram empregadas fibras sintéticas o consumo foi de 1,6 kg/m³. A resistência mínima exigida para o concreto quando da liberação ao tráfego era de 20 MPa e 30 MPa para o ensaio de compressão aos 28 dias.

O tráfego foi estimado em 1.700 caminhões pesados por dia. O WTUD foi executado com 100 mm de espessura com 1,2 x 1,2 m de dimensões em planta. O CA possuía uma espessura de 180 mm antes da fresagem superficial ser realizada.

Três dias foram destinados para a construção do WTUD até sua liberação.

Depois de um ano, observou-se fissuras na faixa concretada sem fibras, sendo que as fissuras mais severas encontravam-se nos cantos das placas, e nenhuma fissura onde fez-se uso das fibras sintéticas.

Sturm e Morris (1998) observam que ao término do segundo ano de liberação ao tráfego as faixas com fibras não apresentaram fissuras e as que não continham este material apresentaram poucas fissuras adicionais, sempre com aberturas suaves. Já as antigas fissuras de canto, apresentavam leves afundamentos com conseqüente aumento de sua abertura.

Nos locais onde mais intensamente surgiram fissuras, notou-se inexistência de aderência. Ao final de dois anos e meio o desempenho foi considerado bom por Sturm e Morris (1998).

Brampton

Motivado pela constatação da viabilidade de uso do WTUD no Canadá, Sturm e Morris (1998) descrevem seu emprego na cidade de *Brampton* em 1997. As dimensões das placas foram as mesmas utilizadas em *Mississauga*, assim como o concreto empregado. O processo executivo diferiu apenas na antecipação da serragem das juntas, o que não evitou o surgimento de fissuras pela retração do concreto.

Depois de um semestre em uso, o WTUD apresentava algumas fissuras leves nos cantos de algumas placas e outras surgidas quando das reações exotérmicas de hidratação do cimento Portland.

1.2.4 Experiência Européia

Suécia

Silfwerbrand (1997) relata um experimento realizado na Suécia, iniciado em outubro de 1993, na pista sul da *Swedish National Road 225*. Entre várias técnicas de reabilitação de pavimentos estudadas, o WTUD foi assente sobre 145 mm de concreto asfáltico, previamente fresado em aproximadamente 5 mm. Seções de WTUD foram executadas com 70 mm de espessura, com dimensões de placas de 1,25 x 1,25 m e 3,5 x 3,75 m. Foram utilizados concretos com e sem fibras de aço, sendo que as placas de maior dimensão sempre utilizaram-se desta adição. As propriedades do concreto utilizado estão apresentadas na Tabela 1.6, do item 1.1.3.6.

O tráfego diário solicitante deste trecho entre *Märsta* e *Stockholm* era de 2.500 veículos, sendo que 10 a 15% constituído de veículos pesados. As juntas foram serradas após 24 h da concretagem com uma profundidade de 25 mm e largura de 3 mm.

No que refere-se à aderência, Silfwerbrand (1997) menciona não haver dados confiáveis devido a problemas na execução dos ensaios de tração direta. No tocante ao desempenho, placas de 3,5 x 3,75 m apresentaram fissuras transversais motivadas pelas tensões internas de contração, talvez originadas pela retração durante o processo de cura, e por efeito de dilatação e retração térmica. Estas fissuras comprometeram a durabilidade e o conforto ao rolamento do WTUD. O número deste tipo de fissura aumentou com o decorrer do tempo, porém mantinha-se sempre com mesma abertura. Fissuras de canto também surgiram nestas placas devido a grande tensão de tração surgidas nas mesmas ao serem solicitadas pelo tráfego.

O esborcinamento de juntas se fez presente mas não teve um acréscimo significativo ao longo do tempo.

Nas placas onde o concreto reforçado com fibras de aço foi utilizado, notou-se um acentuado desgaste superficial. Silfwerbrand (1997) relaciona este fenômeno à dificuldade de homogeneização e manuseio deste tipo de concreto, acabando por desaconselhar o emprego deste tipo de fibra, mesmo porque seu desempenho, quando desconsiderado este problema, foi abaixo do encontrado com uso de concreto convencional.

França

O primeiro experimento de WTUD na França foi executado em dezembro de 1996, em *Pierrelaye*, próximo à Paris. Chambon et al (1998) comentam que as placas tinha dimensões de 0,87 x 0,87 m com espessura de 40 mm e 1,17 x 1,17 m com 50 mm de espessura. O CCP foi colocado sobre uma camada asfáltica fresada, varrida, lavada e aspirada.

O desempenho observado foi considerado satisfatório tanto no que diz respeito à aderência CCP/CA quanto ao surgimento de fissuras motivadas pelo tráfego. Maiores detalhes quanto à execução e desempenho não são encontrados na referência bibliográfica.

Áustria

Também motivado pelos constantes recapeamentos executados a fim de corrigir problemas de trilhas de roda, foi desenvolvido um projeto para avaliar o emprego do WTUD nas condições austríacas, conforme relatado por Steigenberger (1998). A pista experimental foi construída no verão de 1997, somente após a caracterização de todas as variáveis que poderiam interferir no desempenho desta técnica.

Assim, placas de CCP com 100 mm de espessura e 1,2 m de dimensão foram construídas próximo a um posto de pesagem de caminhões, onde 200 deste tipo de veículos trafegavam diariamente. Depois de 60 h a pista foi aberta ao tráfego. O artigo referido anteriormente não comenta sobre o desempenho do WTUD dado o pouco tempo decorrido desde a execução até a publicação do artigo.

1.2.5 Experiência Brasileira

Com base no uso do WTUD em vários países, sobretudo Estados Unidos da América, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) firmaram uma parceria e construíram o primeiro *whitetopping* ultradelgado em estradas brasileiras. Sua execução teve início em 29 de setembro e término no dia 11 de outubro de 1997. Conforme relatos de Balbo (1999a), o trecho escolhido para o experimento tinha uma extensão total de 546 m, situado próximo ao quilômetro 156 da Rodovia Castello Branco no estado de São Paulo.

As características básicas referentes à geometria das placas de CCP são apresentadas na Tabela 1.13 retirada da Tese de Livre Docência referida acima.

Tabela 1.13 Características Geométricas das Placas de WTUD empregas na Castello Branco (Fonte: Balbo, 1999a)

Trecho	Seção	Espessura Média de WTUD (mm)	Espaçamento entre Juntas (m)
T1	A	79	1,15
	B	75	0,80
	C	82	0,65
T2	A	95	1,62
	B	95	1,15
	C	94	0,80

Balbo (1999a) relata o sentimento de que a escolha das dimensões de placas fundamentou-se de maneira empírica, tendo como padrão comparativo as experiências internacionais.

Com base em observações de relatórios técnicos sobre o projeto, execução e modelagem numérica do WTUD, algumas conclusões foram possíveis de se obter. Entretanto, Balbo (1999a) relata que a estrutura do pavimento existente era composto de 150 mm de CA sobre uma camada de 50 mm de “binder”, 150 mm de base em solo-cimento e sub-base granular de 400 mm, um tanto diferente do que apresentava o relatório técnico. Com referência ao tráfego solicitante, tais relatórios mencionavam um volume médio diário de 3.000 veículos comerciais por dia, por sentido de tráfego, equivalente à um número de $8,0 \times 10^7$ solicitações do eixo-padrão de 80kN, acumulados em dez anos.

O concreto de cimento Portland utilizado contou com um teor de 440 kg/m^3 de cimento de alta resistência inicial, sendo o uso de microssilica estimado em 10% do consumo de cimento Portland. O agregado graúdo foi composto por Brita 1, cujo diâmetro máximo limita-se a 19 mm, numa taxa de 1.194 kg/m^3 ; o consumo de areia foi de 493 kg/m^3 e um fator água/(cimento + microssilica) de 0,36. Balbo (1999a) menciona ainda a utilização de superplastificante, plastificante e incorporador de ar sob um fator de 5,42; 1,65 e $0,12 \text{ l/m}^3$, respectivamente. O abatimento no tronco de cone especificado foi de $80 \pm 10 \text{ mm}$, teor máximo de ar incorporado de 5% e resistência à tração na flexão de 6,5 MPa.

Sobre a execução da pista experimental, faz-se menção à fresagem em toda sua extensão, com espessura suficiente à encaixar perfeitamente o WTUD no pavimento asfáltico existente. Esta etapa foi realizada no dia 29 de setembro de 1997. Já a concretagem, ocorrida entre os dias 2 e 5 de outubro do mesmo ano, foi realizada após uma perfeita limpeza do CA remanescente e teve a adição da microssilica no momento da chegada do caminhão betoneira no local de aplicação do concreto. Inicialmente havia a intenção de colocar fibras de polipropileno à uma taxa de $0,9 \text{ kg/m}^3$, no entanto seu uso foi eliminado devido a problemas de trabalhabilidade encontrados na obra. O superplastificante também teve sua adição no local da concretagem, conforme relata Balbo (1999a).

A cura, num primeiro momento, foi realizada com auxílio de agentes químicos, posteriormente fez-se a pulverização de água. Os corpos de prova destinados ao controle tecnológico do concreto empregado foram submetidos a cura em campo, diferente do preconizado pelas normas vigentes. Balbo (1999a) refere-se de maneira favorável a este tipo de procedimento uma vez que amostras mais próximas a situação de campo estarão sendo ensaiadas. A Tabela 1.14 apresenta os valores médios de resistência obtidos.

Tabela 1.14 Resistências Médias obtidas para o CCP empregado na Castello Branco (Fonte: Balbo, 1999a)

	Idades		
	3 dias	7 dias	28 dias
Resist. à Compressão (MPa)	35,1	43,4	56,1
Resist. à Tração na Flexão (MPa)	3,5	5,0	6,1

Após intensos levantamentos de defeitos realizados em campo, Balbo (1999a) descreve detalhadamente o desempenho obtido pelo experimento. Infelizmente para os preconizadores e interessados em comercializar esta técnica no Brasil, o desempenho deste experimento foi frustrante para esta finalidade devido ao alto grau de fissuração encontrado nas placas em um curto espaço de tempo.

Balbo (1999a) observa que as fissuras de canto, assim como encontrado na literatura estudada até então, configuraram-se no modo de degradação mais significativo. O autor relaciona este tipo de fissura ao processo de fadiga a que estas placas foram expostas, fato que não teria ocorrido caso as tensões que de fato solicitassem as placas fossem iguais àquelas estimadas numericamente pelos órgãos gestores do projeto. Tais tensões não seriam superiores a $2,0 \text{ MPa}$, o que não levaria a um processo de ruptura por fadiga tão precoce visto que a resistência à tração na flexão do CCP empregado foi de $6,1 \text{ MPa}$ aos 28 dias e próximo a $5,0 \text{ MPa}$ no momento de liberação ao tráfego. Alguns fatores podem ter contribuído para a subestimação das tensões atuantes, podendo ser citados a discretização da malha de elementos finitos, os valores assumidos para o módulo de reação do sistema de apoio, posição da carga crítica e também a espessura de CA remanescente.

Em ambos os trechos as placas que possuíam menores dimensões em planta e maiores espessuras de CCP apresentaram um melhor desempenho. Após 160 dias de solicitação intensa do tráfego, o Trecho **T1** apresentava 73% de placas com fissuras de canto e o Trecho **T2** um valor de 27%, valores muito acima dos 10% a 15% tidos como limite máximo. Este limite prende-se ao fato de que após tal taxa de fissuração ser alcançada, estas fissuras surgiriam de forma muito mais rápidas, sendo portanto um limite máximo desejável, conforme relata Balbo (1999a), referendando conversas

informais com o Dr. *Tayabji*, em um *workshop* realizado em Buçaco, Portugal. O autor apresenta ainda um quadro que faz a previsão de quantos dias teriam sido necessários para o surgimento de um dado percentual de fissuras nas seções dos Trechos **T1** e **T2**, mostrados em detalhes nas Tabelas 1.15 e 1.16.

Tabela 1.15 Total de Dias decorridos para o surgimento dos índices de fissuração do Trecho 1 (Fonte: Balbo, 1999a)

Seção de Teste	Posição das Placas	% de Fissuras		
		10	15	25
1A (75 placas)	Externa	32	39	53
	Central	48	61	85
	Interna	69	81	101
1B (115 placas)	Externa	12	14	19
	Central Externa	47	59	80
	Central Interna	126	141	163
	Interna	104	118	142
1C (141 placas)	Externa	16	19	24
	Central Externa	13	16	20
	Central	116	129	150
	Central Interna	127	142	166
	Interna	118	132	153

Tabela 1.16 Total de Dias decorridos para o surgimento dos índices de fissuração do Trecho 2 (Fonte: Balbo, 1999a)

Seção de Teste	Posição das Placas	% de Fissuras		
		10	15	25
2A (57 placas)	Externa	90	105	128
	Interna	98	112	136
2B (80 placas)	Externa	98	112	135
	Central	121	135	156
	Interna	123	137	160
2C (115 placas)	Externa	210	235	276
	Central Externa	121	135	156
	Central Interna	127	140	161
	Interna	94	109	132

No primeiro Trecho, **T1**, 50% das amostras estudadas não apresentavam aderência CCP/CA, este valor foi de 69% para o Trecho **T2**. Em um caso, aponta Balbo (1999a), amostra broqueada no centro da placa de WTUD apresentava aderência e, nesta mesma placa, com a amostragem realizada no seu canto, não apresentou aderência na referida interface.

Ainda em amostras retiradas para verificação de aderência, observou-se pequenas espessuras de CA aderidas à placa de concreto, fato que converge para uma das duas sentenças: ou a espessura

de CA era pequena, ou a espessura de CA remanescente em condições íntegras era de pouca espessura, fato que colabora para o desempenho observado.

Entretanto, mesmo com o relativo fracasso do experimento, muito motivado pela inadequação de uso desta técnica sob um tráfego tão intenso e sobre um concreto asfáltico que aparentemente sofria de fissuração classe 2 e 3, algumas observações e constatações importantes puderam ser obtidas.

Em primeiro lugar, poder-se-ia mencionar a desmistificação da utilização em campo de concretos especiais com altas resistências, ficando claro que tal emprego, um dos fatores limitantes da utilização do WTUD, pode perfeitamente ser aplicado nas condições brasileiras, mostrando que o Brasil já possui tecnologia suficiente para isto, bastando apenas lapidar esta tecnologia, o que de fato só será possível com maiores investimentos em pesquisas tecnológicas.

Em um segundo momento, com base em estudos apresentados por Balbo (1999a), pôde-se chegar a um modelo de desempenho de WTUD.

Para tanto, fizeram-se necessárias intensas pesquisas capazes de obter informações mais precisas sobre o tráfego real existente na via, que foi possível através de pesagem e contagem de campo a fim de melhor discretizar as cargas por eixo bem como sua distribuição; e modelagem numérica que objetivava fazer uma análise mecanicista da problemática em questão, envolvendo até mesmo o desenvolvimento de fatores de equivalência de cargas específicos para o WTUD, uma vez que a “lei da quarta potência” não se aplica a este tipo de pavimento composto. Estes estudos culminaram na construção de um modelo semi-empírico de fadiga do CCP, adequado às condições de contorno envolvidas no experimento relatado. O modelo de fadiga elaborado e apresentado por Balbo (1999a), prevê uma fissuração de 10% como limite máximo aceitável e é expresso matematicamente pela Equação 1.1.

$$N = 29.745 \times (MR/\sigma)^{3,338} \quad [1.1]$$

As seguintes ressalvas foram realizadas pelo autor quanto a este modelo desenvolvido (Balbo, 1999a, página 140):

“No modelo proposto por meio da equação [5.3] estão portanto implícitos os seguintes fatores e elementos de contorno:

- *A distribuição lateral do tráfego resultante de deslocamentos laterais dos eixos ocorrida em uma faixa da Rodovia Castello Branco de aproximadamente 3,3 m de largura;*
- *Os gradientes térmicos ocorridos entre o topo e o fundo de placas de WTUD resultantes do regime climático local (proximidade do km 156 da rodovia) e provavelmente sujeitos às condições de aderência entre WTUD-CA;*
- *As condições de umidade ocorridas ao longo do período de análise considerado, inclusive diferenciais de umidade entre o topo e o fundo de placas.”*

Balbo (1999a) ainda apresenta um quadro-resumo de recomendações de apoio à decisão de emprego do WTUD, colocado na Tabela 1.17.

Tabela 1.17 Recomendações de apoio à decisão de emprego de WTUD (Fonte: Balbo, 1999a)

Condição Técnica de Projeto	Conseqüências para Placas de WTUD	Aplicabilidade do WTUD	Condicionantes Básicos
1. Fissuras interligadas no CA (superficiais ou profundas)	<ul style="list-style-type: none"> A camada de CA pouco contribuiria para o pavimento composto 	NÃO EMPREGAR	
2. Afundamentos em trilhas de roda	<ul style="list-style-type: none"> Se muito profundas resultam em menores espessuras de CA 	➔	<ul style="list-style-type: none"> WTUD mais espessos Resistência elevada do CCP
3. Excesso de buracos e remendos	<ul style="list-style-type: none"> Excessiva deformabilidade Comportamentos diferenciados entre placas 	NÃO EMPREGAR	
4. Pequena espessura de CA remanescente	<ul style="list-style-type: none"> Maiores tensões 	➔	<ul style="list-style-type: none"> WTUD mais espessos Resistência elevada do CCP
5. Excessiva deformabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Maiores tensões CA muito flexível pouco contribui para o pavimento composto 	➔	<ul style="list-style-type: none"> WTUD mais espessos Resistência elevada do CCP
6. Volume elevado de eixos comerciais	<ul style="list-style-type: none"> Maiores tensões Consumo à fadiga acelerado 	➔	<ul style="list-style-type: none"> Excelentes condições quanto aos itens de 1 a 5 Emprego de placas menores Resistência elevada do CCP

1.3 Experiências Instrumentadas

Louisville, Kentucky – EUA

A primeira experiência de instrumentação de WTUD ocorreu logo no primeiro uso desta técnica. Risser et al (1993) não mostram detalhes da instrumentação mas afirmam que todos os dados obtidos por análise numérica por elementos finitos realizadas por Mack et al (1993) foram comprovados, em campo, nas placas de 1,83 m com 51 e 89 mm de espessura que foram instrumentadas. As tensões de tração máximas de borda obtidas na modelagem numérica foram de 2,29 e 3,70 MPa para placas de 51 e 89 mm, respectivamente. Nesta mesma ordem, os valores da mesma tensão obtidos experimentalmente foram de 2,95 e 1,12 MPa.

Apesar dos autores afirmarem que houve uma certa correspondência entre os valores obtidos numericamente e experimentalmente, nota-se uma incoerência entre os dados extraídos por modelagem finita visto que a tensão máxima de tração na flexão apresentou um valor maior para a placa de menor espessura, contrariando todos os relatos encontrados na revisão bibliográfica até então. Tal contraste pode ter sido provocado por uma deficiente discretização da malha de elementos finitos empregada.

Tijuana - México

Outro experimento instrumentado foi realizado na cidade de *Tijuana*, no México, conforme relatos encontrados no artigo Salcedo (1996). As placas foram instrumentadas com *strain-gages* colocados no centro, borda e canto, tanto na parte inferior do CCP como na superior, colados antes da prova de carga. A instrumentação tinha como objetivo estimar os esforços atuantes no WTUD com a solicitação de diferentes veículos comerciais encontrados neste país. A Figura 1.7 que ilustra a instrumentação realizada em *Guasave*, México, fornece uma idéia de como foram posicionados os instrumentos neste experimento em *Tijuana*.

As provas de carga utilizando caminhões do tipo *Trailer* levaram à máximas deformações de 48×10^{-6} , 83×10^{-6} e 70×10^{-6} mm/mm ($70 \mu\epsilon$), para as seções I, II e III, respectivamente.

Missouri e Colorado – EUA

Com o intuito de fornecer dados à calibração dos modelos numéricos desenvolvidos para o dimensionamento de WTUD, PCA e ACPA construíram três pistas experimentais com placas instrumentadas com *strain-gages* e termopares. Segundo Mack et al (1997), a principal seção instrumentada encontrávasse na área de taxiamento do *Spirit of St. Louis Airport, St. Louis, Missouri*, e serviu para o desenvolvimento do modelo de dimensionamento, outras duas, no *Colorado*, foram desenvolvidas para a verificação do modelo depois de pronto.

Neste local, o CA apresentava-se com espessura de 79 mm, depois da fresagem, sobre o qual apoiavam-se placas de CCP com 1,27 m e 89 mm de espessura. O concreto de cimento Portland utilizado apresentava as características encontradas no item 1.1.3.6, na Tabela 1.5. Nesta ocasião, seis placas foram instrumentadas. A configuração das juntas de cada placa instrumentada é mostrada na Tabela 1.18. De acordo com Mack et al (1997), os *strain-gages* foram instalados nas bordas e centro das placas, diretamente sobre a superfície asfáltica e 25 mm acima desta, nas mesmas posições em planta. No topo das placas de CCP, os medidores de deformação foram colados, também nas mesmas posições horizontais, momentos antes da execução das provas de carga. Havia ainda, *strain-gages* no canto das placas, colocados perfiladamente até o centro destas, medindo deformações na direção diagonal. Wu et al (1998) complementam que as placas E e F possuíam *strain-gages* apenas nas bordas longitudinais e no centro da placa.

Tabela 1.18 Condições de juntas das placas instrumentadas em *St. Louis, Missouri* (Fonte: Mack et al, 1997)

Placas	Condições das Juntas
A e B	Juntas normais, sem serrar até o fundo da placa de WTUD
C e D	Juntas serradas numa profundidade igual à espessura de CCP
E e F	Juntas serradas até o fundo da camada asfáltica

Dois conjuntos de termopares foram instalados a fim de medir a temperatura no topo, meio e fundo da placa de WTUD, e à 12 mm do fundo da camada composta por CA.

Mack et al (1997) referem-se às provas de carga realizadas na pista experimental em *St. Louis*, em maio de 1995 com carga de 44,4 kN, e em setembro do mesmo ano, agora com carga de 53,3 kN. As cargas foram aplicadas nas bordas longitudinais e transversais, centro e canto das placas.

Conforme já referido no item 1.1.3.1, este estudo constatou a existência de aderência parcial entre o CCP e o CA, e não integral ou total como comumente assumido nas análises numéricas. No que se refere aos valores máximos de gradiente térmico encontrados, estes foram de 7,2°C entre o topo e o fundo da placa e de 11,2°C entre o topo do CCP e o fundo do CA, sem grandes alterações nos meses de maio e setembro, quando foram tomadas as leituras.

Mack et al (1997) perceberam ainda que as tensões produzidas no concreto são muito menores no caso de juntas serradas até antes do fim da placa. A eficiência na transferência de carga nas placas com juntas serradas da maneira tradicional (até um terço da espessura de CCP) foi de 68% em maio (primavera) e de 39% em setembro (outono), podendo esta redução ser atribuída à baixa temperatura em que se encontravam as placas de WTUD no outono americano, o que provoca a retração das placas com conseqüente afastamento ente os agregados gráudos da interface CCP/CCP.

As diferenças percentuais entre os valores de tensões máximas medidos em campo e os simulados na modelagem finita (3-D), foram de 14% e 2% para as localizadas no topo da placa e com condição de aderência total e parcial, respectivamente. No caso de tensões máxima no fundo do concreto, estes valores foram de 34% e 7%, na mesma ordem.

Apesar das pistas executadas no *Colorado* fugirem da definição de WTUD por possuírem maiores espessuras que o limite de 100 mm e pelo uso de barras de transferência, alguns dados sobre os gradientes térmicos surgidos no pavimento merecem menção. Segundo Wu et al (1998) a pista localizada em *Denver* apresentou máximos gradientes no concreto de -5°C às 6h e 12°C às 14h. O gradiente total máximo encontrado desde o topo do CCP e o fundo do CA foi de 17°C, sendo que dois terços deste valor atuava no WTUD. Já na pista próxima a *Longmont*, na *State Road 119*, o máximo gradiente térmico total foi de 12°C, sendo 11°C atuantes apenas no concreto. Neste local, a variação do gradiente término no CA foi de -1°C a 1°C.

Japão

Noda et al (1998) comentam sobre a execução de pequenos modelos experimentais no Japão a fim de melhor entender o comportamento da interface CCP/CA e a influência da temperatura sobre o comportamento mecânico do WTUD.

Três placas de 1,2 x 1,2 m foram construídas, sendo que as placas A e B possuíam espessura de 88 mm e a C de 77 mm. As duas primeiras placas foram assentes sobre CA fresado de 150 mm de espessura e a última sobre a mesma espessura de CA não fresado.

Strain-gages foram colocados nos quatro cantos e bordas das placas, bem como no centro de cada uma das placas. Os termopares contemplaram o topo, meio e fundo da CCP e o interior da camada asfáltica. Leituras foram retiradas continuamente, inclusive no período de verão.

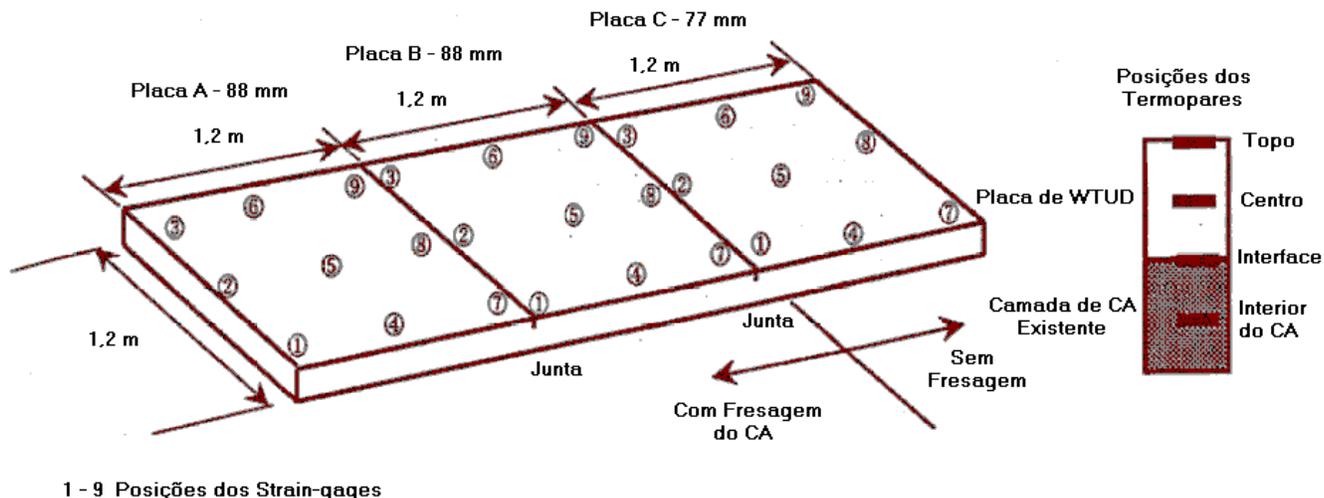


Figura 1.6 Esquema de Instrumentação do WTUD experimental no Japão (Fonte: Noda et al, 1998)

O concreto utilizado no experimento usou cimento de alta resistência inicial e apresentou resistência à tração na flexão de 5,22 MPa no campo e de 7,13 MPa sob cura normal de laboratório, ambas aos 28 dias. Seu módulo de elasticidade girou em torno de 35,9 GPa.

Noda et al (1998) apontaram para a linearidade na distribuição do gradiente térmico no interior da placa, com um gradiente máximo encontrado de 9°C, sendo que o gradiente que apareceu em 50% do período de leituras foi de +/- 1°C.

As maiores temperaturas registradas na camada asfáltica sob as placas de WTUD nunca excederam a 50°C e são cerca de 20% mais baixas que as encontradas no CA que não possuía revestimento em CCP. Na temperatura de 50°C a resistência ao cisalhamento é 60% mais baixa que na temperatura de 20°C. Foi observado também que o empenamento tem um grande aumento quando da perda de aderência CCP/CA.

Uma modelagem numérica realizada por Noda et al (1998) comprovou que, para um gradiente térmico de 9°C e temperatura do CA em torno de 50°C, poucas solicitações de eixos com 100 kN seriam capazes de promover a perda de aderência CCP/CA para o caso de resistência ao cisalhamento igual a 2,15 MPa, máxima encontrada no experimento. Neste caso, a perda de aderência poderia comprometer o sucesso do emprego do WTUD, mesmo que análises de fadiga realizadas demonstrassem não haver problemas deste tipo no CCP e no CA, em até 20 anos sob tráfego do tipo **D** no Japão, classificado como pesado no Brasil.

Guasave – México

Em complemento ao segundo teste de utilização do WTUD no México, numa rodovia próxima a *Guasave*, duas placas de 1,0 x 1,0 m foram instrumentadas, uma com 89 e outra com 102 mm de espessura.

Salcedo (1998) relata a colocação de strain-gages em três posições diferentes, tanto à 10 mm do fundo da placa de CCP quanto no topo desta. As posições, conforme a Figura 1.7, foram assim nomeadas:

- (A) Centro da placa, par de *strain-gages* ortogonalmente dispostos;
- (B,C) Nas bordas, par de *strain-gages*, também ortogonalmente dispostos;
- (D) No canto da placa, com *strain-gages* na direção diagonal da mesma.

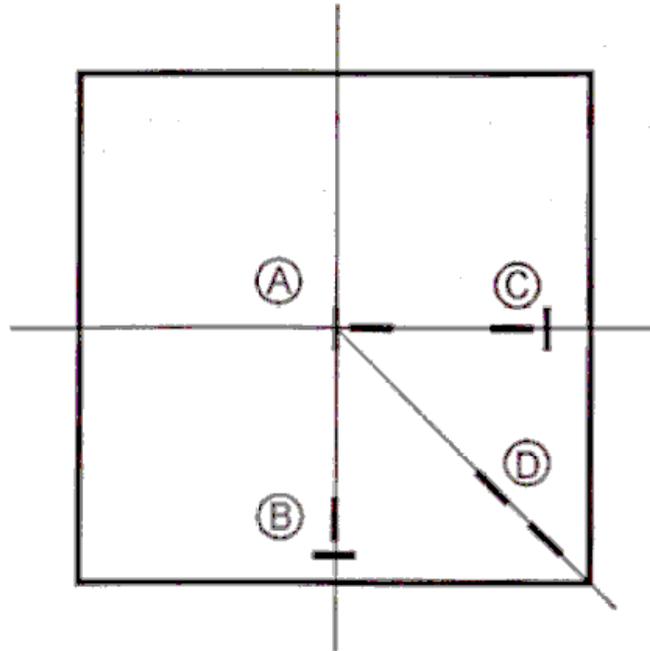


Figura 1.7 Posição dos *Strain-Gages* nas placas instrumentadas em *Guasave* (Fonte: Salcedo, 1998)

A prova de carga executada teve três níveis diferentes de carregamento do semi-eixo de roda dupla utilizado. As cargas deste semi-eixo foram de 30, 50 e 63 kN. Salcedo (1998) retirou algumas conclusões interessantes desta instrumentação. Primeiro, verificou a linearidade de tensão x carga aplicada, sugerindo que as máximas tensões de tração no concreto encontram-se no regime elástico do material e, em segundo lugar, obteve relações percentuais entre tensões máximas nas placas de CCP e o valor de módulo de ruptura assumido para o concreto de 47,3 e 46,6% para placas de 102 e 89 mm, respectivamente, porém não mencionou a posição de carga crítica nem mesmo onde as tensões máximas ocorreram.

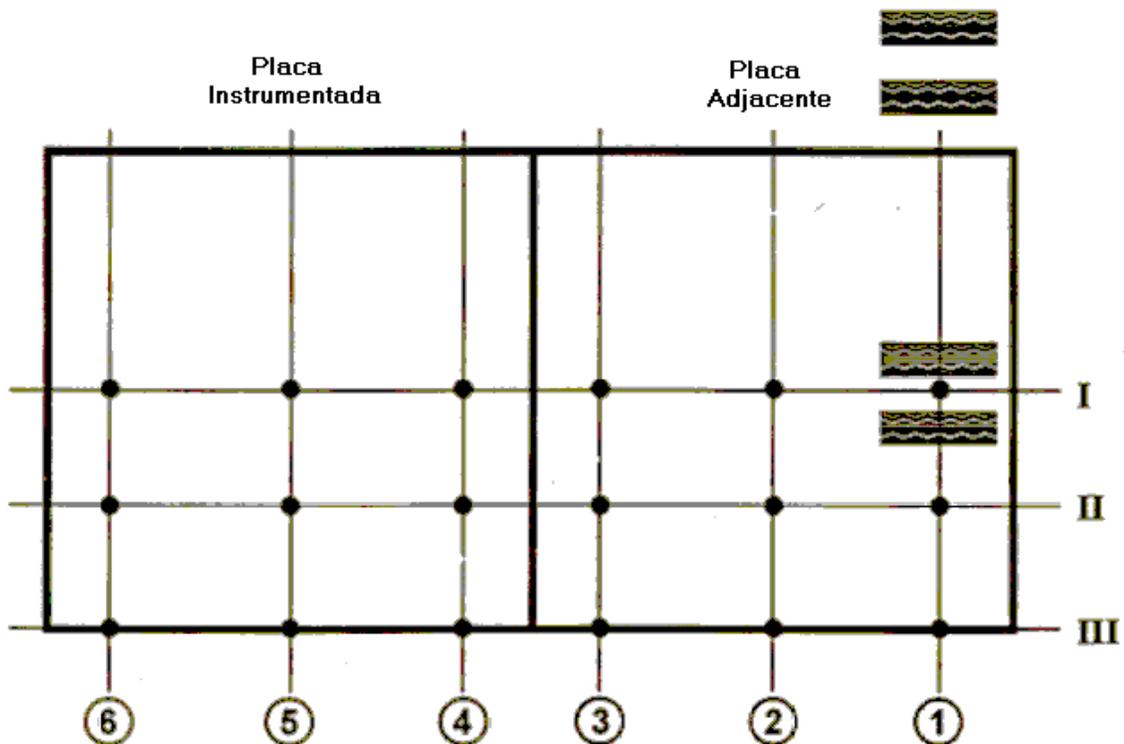


Figura 1.8 Posições das Cargas na Prova de Carga (Fonte: Salcedo, 1998)

Cabe citar uma observação encontrada em Balbo et al (2000) no que refere-se à linearidade da carga aplicada e da tensão solicitante. Em análise numérica realizada pelos autores acima citados, constatou-se a não linearidade mencionada por Salcedo (1998), concluindo que, caso tal linearidade fosse assumida no projeto, os resultados obtidos para estações estariam demasiadamente a favor da segurança, superdimensionando assim o WTUD.

Capítulo 2

Método de Pesquisa

2.1 Pista Experimental

Ciente das dificuldades de transpor resultados provenientes de ensaios laboratoriais realizados em condições muito diferentes das encontradas em campo, o LMP concebeu um projeto de pesquisa junto à FAPESP que tinha como objetivo tornar possível a construção de pavimentos experimentais de concreto de cimento Portland para o estudo da influência dos gradientes térmicos sobre as deformações de placas de CCP convencionais e do tipo WTUD. Para esta análise, as pistas deveriam estar instrumentadas com *strain-gages* e PT-100.

Tal logo deferiu-se o pedido de auxílio individual à pesquisa, concedido ao Prof. José Tadeu Balbo, iniciou-se a fase final de projeto e posterior execução dos referidos pavimentos experimentais.

2.1.1 Projeto Inicial da Pista Experimental de WTUD

Inicialmente, pensava-se executar a pista experimental de WTUD próximo ao Hospital Universitário da USP, dentro da Cidade Universitária, na cidade de São Paulo. O local específico seria na Av. Prof. Lineu Prestes, em frente à Praça do Pôr-do-Sol.

Entretanto, em levantamentos expeditos das condições estruturais da camada asfáltica presente neste local, verificou-se a existência de um processo inicial de formação de fissuras no concreto asfáltico, aliado ao indício de bombeamento de finos do subleito, fatores que poderiam levar à ruptura precoce das placas em questão. Este levantamento aconteceu em agosto de 1999.

Deste momento em diante, descartou-se a hipótese de realização do WTUD neste local, passando-se a um cauteloso estudo de novos locais para implantação deste projeto.

2.1.2 Projeto Definitivo da Pista Experimental de WTUD

Com o intuito de levantar possíveis trechos passíveis de implementação do *whitetopping* ultradelgado, em setembro de 1999, foram observados requisitos básicos que tal área deveria otimizar. Estes fatores foram descritos da seguinte maneira:

1. Conflito operacional gerado pela obra, obviamente que em sua fase executiva;
2. Espessura de concreto asfáltico, já que esta deveria conduzir a valores próximos a 60 mm;
3. Condições da base, afim de verificar sua não contaminação e substancial capacidade de suporte;
4. Alçamento ou cunha, no caso do *whitetopping* ultradelgado sobreposto;
5. Segurança, tanto durante o processo executivo como para posteriores leituras de campo em horários variados;
6. Água para o processo executivo, visto que a cura do concreto configura-se num fator essencial para o desempenho do mesmo;
7. Tráfego, que deveria ser condizente com o objetivo do estudo em questão;

2*	50 mm	50 mm	50 mm	55 mm
3*	$E_{\text{revest}} = 3.500 \text{ MPa}$ $E_{\text{base}} = 60 \text{ MPa}$ $D_{\text{total}} = 40 \times 10^{-2} \text{ mm}$	$E_{\text{revest}} = 3.500 \text{ MPa}$ $E_{\text{base}} = 60 \text{ MPa}$ $D_{\text{total}} = 80 \times 10^{-2} \text{ mm}$	$E_{\text{revest}} = 3.500 \text{ MPa}$ $E_{\text{base}} = 150 \text{ MPa}$ $D_{\text{total}} = 49 \times 10^{-2} \text{ mm}$	$D_{\text{total}} = 40 \times 10^{-2} \text{ mm}$
4*	Sim – 2 faixas	Sim	Sim	Sim – 2 Faixas
5*	Não	Sim	Sim	Sim
6*	Sim	Sim	Sim	Sim
7*	Sim	Sim	Sim	Não
8*	Não	Não	Não	Não

*Requisitos Analisados, conforme já mencionado.

**Locais Analisados, conforme indicado anteriormente.

Confrontando as diversas possibilidades, optou-se pela Rua do Matão em frente ao Bosque e ao Clube dos Funcionários. Tal trecho apresentou a bacia de deformações retroanalísada, representada pela Figura 2.2, com os módulos de resiliência do revestimento asfáltico igual a 3.500 MPa, da base em macadame hidráulico de 150 MPa e o subleito com módulo de 150 MPa. As sondagens rotativas revelaram a existência de 5 cm de CBUQ e 10 cm de macadame hidráulico. No que refere-se ao volume de tráfego que solicita o trecho escolhido, a Prefeitura do Campus Universitário (PCO) através de seus levantamentos, informaram que cerca de 120 ônibus solicitam a faixa, no sentido escolhido, diariamente.

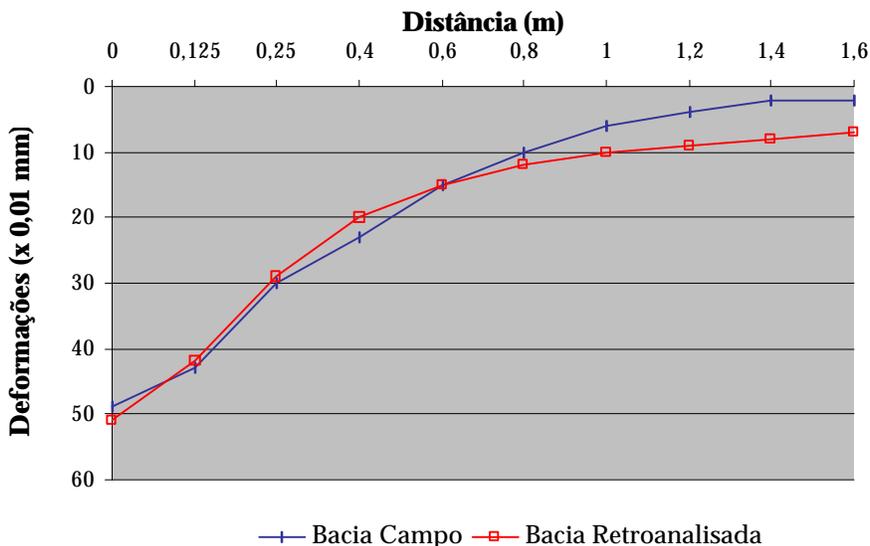


Figura 2.2 Bacia de Campo x Bacia Retroanalísada

2.1.3 Execução da Pista Experimental de WTUD

Antes da execução propriamente dita da pista experimental no local escolhido, foram realizados estudos de dosagem do concreto de cimento Portland a ser utilizado na pista. Esta etapa foi conduzida junto ao laboratório da Lafarge Concreto, na cidade de São Paulo, visto ser esta a fornecedora do concreto que seria empregado. A Tabela 2.2 apresenta detalhes sobre o concreto analisado no dia 5 de outubro de 1999.

Tabela 2.2 Características do Concreto empregado no Experimento

Materiais ou Propriedades	Valores Obtidos
Cimento (kg/m^3)	476,0
Microssílica (kg/m^3)	28,5
Areia (kg/m^3)	642,0

Brita 1 (diâm. máx = 19 mm) (kg/m³)		1.029,0
Fator a/(cim+micross)		0,40
Plastificante (l/m³)		1,43
Superplastificante (l/m³)		2,38
Resist. à Compressão (MPa)	24 horas	22,6
	48 horas	34,2 e 37,8
	6 dias	53,8 e 55,8
Resist. à Tração na Flexão (MPa)	24 horas	3,1 e 3,5
	48 horas	3,9 e 3,9
	6 dias	4,6 e 5,0

Após a definição do traço de concreto a ser utilizado, que deveria possuir a adição de microsilica a fim de alcançar elevadas resistências em curto espaço de tempo, para que o mínimo de interferência fosse causado ao tráfego local e, assim, condicionar o experimento aos aspectos que seriam impostos ao WTUD quando de sua utilização como reforço de pavimentos existentes, passou-se aos trabalhos preparatórios da construção propriamente dita.

A partir do dia 20 de outubro, iniciou-se a execução das fôrmas para a concretagem, uma vez que o sistema a ser utilizado não poderia ser *in lay* pois o pavimento apresentava pouca espessura de concreto asfáltico. Esta etapa contou com o auxílio da Prefeitura da Cidade Universitária (PCO), assim como a instalação da cabine de fibra de vidro, que serviria de estação de controle da instrumentação, e dos tubos de PVC que serviram como condutos para a passagem dos cabos desde a sarjeta até a cabine, por sob a calçada. Esta etapa teve fim no dia 28 de outubro. A PCO ainda executou os suportes de afiação dos *strain-gages* durante este mesmo período.

Entre os dias 25 e 28 deste mês a preparação dos cabos e soldagem dos instrumentos foram realizadas com auxílio do corpo técnico do Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LMP-EPUSP). Também foram executados os suportes para colocação dos medidores de temperatura, chamados de PT-100¹⁴.

Em 28 de outubro de 1999, a empresa FREMIX Engenharia e Comércio Ltda. executou a fresagem do trecho onde seria executado o WTUD. Tal processo contou com a notável experiência e acurácia de tal empresa, sem que ônus algum fossem despendidos nesta etapa. A espessura fresada foi cerca de 10 mm e tinha como objetivo expor o agregado do concreto asfáltico, permitindo a aderência CCP/CA, conforme descrito na revisão bibliográfica.

Todos estes trabalhos foram executados a contento, objetivando a execução e cura das placas durante a semana do feriado do dia 2 de novembro de 1999, semana na qual o movimento no campus universitário estaria reduzido, contribuindo para que menores transtornos fossem levados à comunidade universitária.

Assim sendo, durante o último dia do mês de outubro, foram executados os serviços preparatórios para a concretagem, contemplando a limpeza e lavagem da superfície de CA, colocação de fôrmas e instalação dos suportes e instrumentos de medidas, bem como a condução dos cabos até a cabine de controle, de acordo com o posicionamento constante no projeto de instrumentação, ilustrado nas Figura 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 e no Anexo B. Deste dia até a liberação ao tráfego do trecho experimental, o local ficou sob vigia constante da equipe de segurança da USP.

¹⁴ PT-100 é um instrumento constituído de um filamento de platina envolvido por um material cerâmico, capaz de captar variações de temperatura através de variações da resistência elétrica deste filamento, visto que a temperatura influencia nesta propriedade dos materiais.

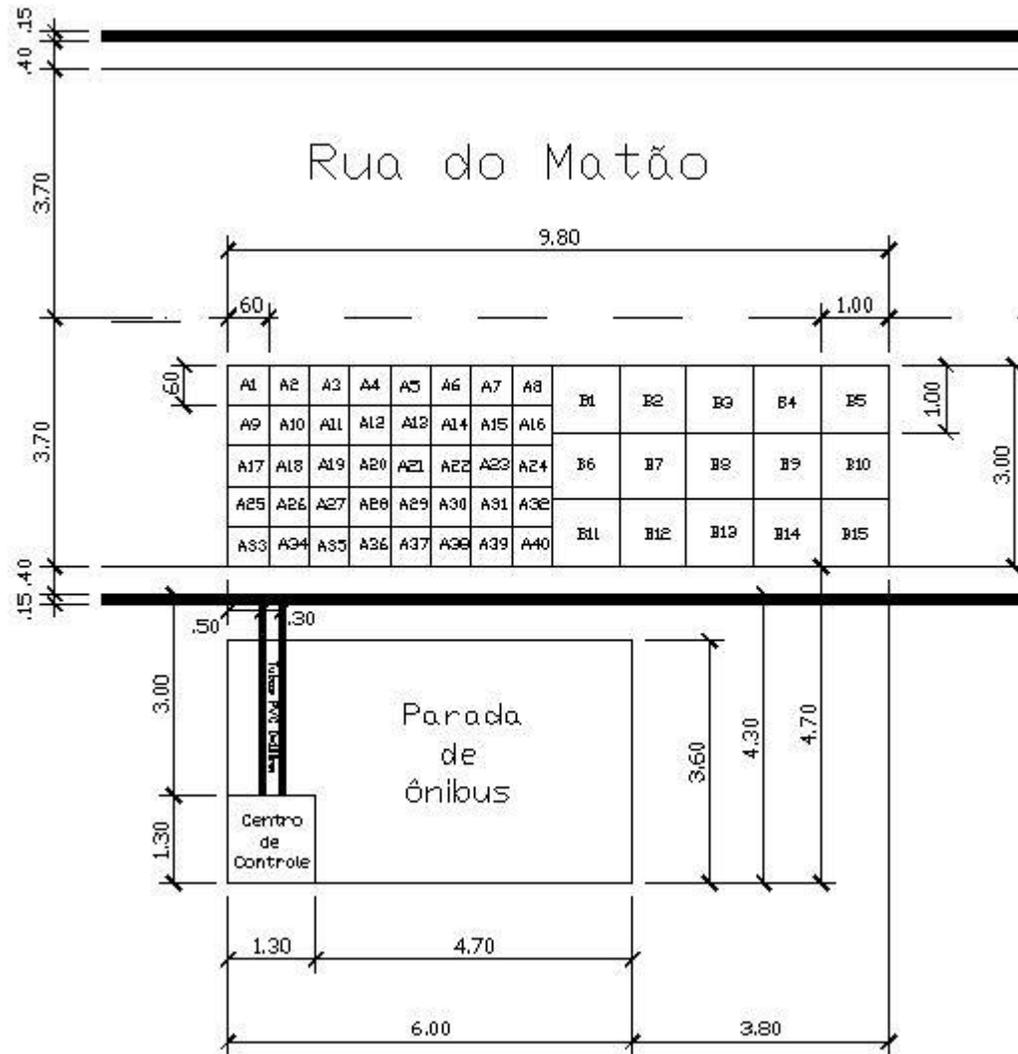


Figura 2.3 Projeto Geométrico das Placas de WTUD

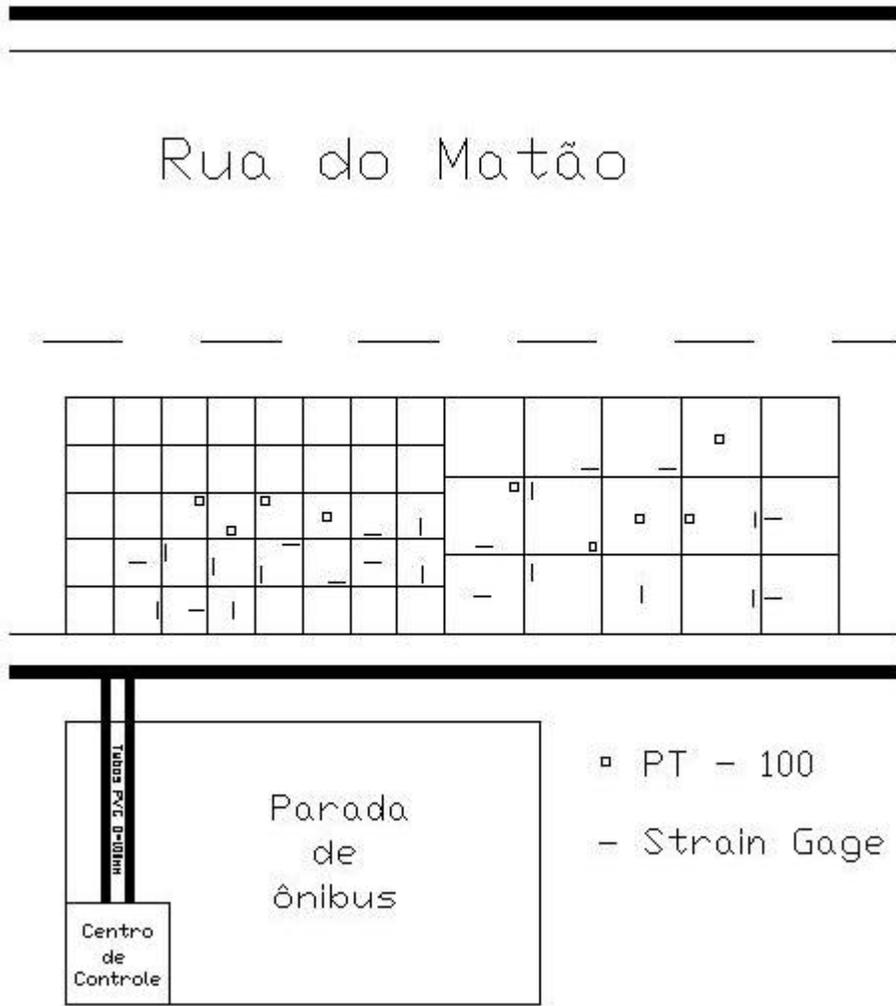


Figura 2.4 Planta da Localização aproximada dos Instrumentos

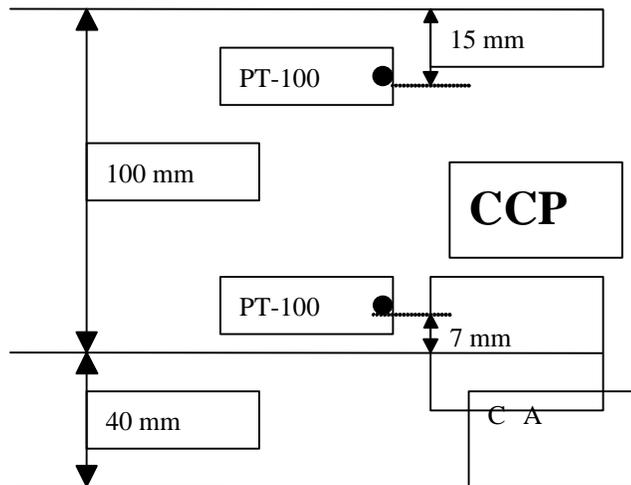


Figura 2.5 Localização dos PT-100 em Perfil

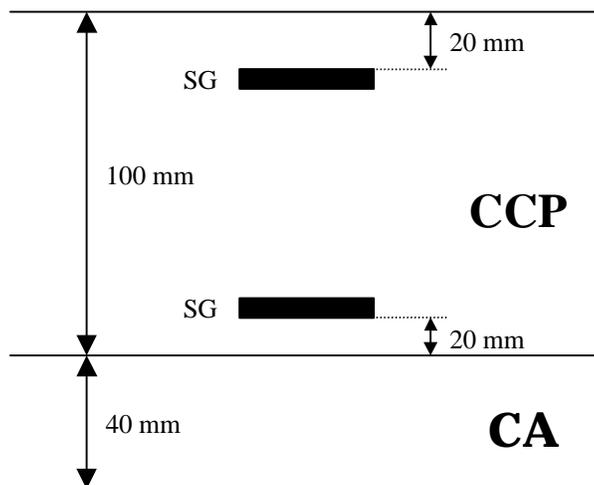


Figura 2.6 Localização dos *Strain-Gages* em Perfil

No dia 1 de novembro de 1999 foi realizada a concretagem das placas de WTUD, sendo requerido um volume de $4,0 \text{ m}^3$ do concreto anteriormente descrito. O superplastificante, que foi adicionada na obra, forneceu uma consistência de 140 mm no tronco de cone. Todas as etapas inclusas no processo de concretagem que contemplavam imersão em concretos dos instrumentos de medida, distribuição do CCP, vibração, sarrafeamento e desempenho foram executadas em 40 min, dentro do prazo de ação do superplastificante. A texturização, realizada com vassouras, e o tratamento químico aplicado ao concreto que contou com a aspersão de um pigmento branco, composto por um filme de PVA, foram executados na seqüência.

Após esta etapa, uma manta, composta de material capaz de absorver parte da radiação solar e manter o CCP úmido, foi colocada sobre as placas. Estas mantas foram intensamente umedecidas logo após o processo de pega do cimento ter sido estabelecido, até três dias após a concretagem.

A empresa EP Engenharia de Pisos Ltda., que prestou valiosa ajuda na fase de concretagem, também executou a serragem das juntas 4 horas após a finalização da concretagem. Após esta etapa a configuração do pavimento ficou de acordo com o que mostra a Figura 2.3, sendo a pista dividida em duas seções, **A** e **B**, ambas com aproximadamente 100 mm de espessura de CCP, sobreposto à 40 mm de CA, com dimensões de placas de $0,60 \times 0,60 \text{ m}$ e $1,0 \times 1,0 \text{ m}$, respectivamente. Optou-se pela não selagem de juntas uma vez que encontram-se relatos, nos artigos estudados, de desempenho similares entre WTUD com e sem este tipo de tratamento de juntas.

Além da cura para aquisição de resistência do concreto, faltava também a execução das rampas de acesso à seção de WTUD para que esta pudesse ser liberada ao tráfego. Tais rampas foram executadas no dia 5 de novembro de 1999, com a utilização de $4,0 \text{ m}^3$ de concreto asfáltico, na Faixa IV da PMSP, compactados em duas camadas interligadas com emulsão asfáltica, com auxílio do rolo compactador e operador da PCO. A liberação ao tráfego deu-se no dia 7 de novembro de 1999, após 6,5 dias da concretagem.

Maiores detalhes sobre a construção da pista experimental estão apresentados em fotos no Anexo A.

2.1.4 Controle Tecnológico

Com o intuito de se fazerr um controle tecnológico minucioso da execução e do WTUD acabado, foram realizadas paralelamente à concretagem, tomadas de medidas das temperaturas do ar, ao solo, e do concreto asfáltico, assim como da umidade relativa do ar próximo a camada asfáltica. Assim, poder-se-ia correlacionar eventuais defeitos, como fissuração por retração com as

condicionantes térmicas e higroscópicas presentes durante a concretagem. A Tabela 2.3 e a Figura 2.7 demonstram como estas variáveis oscilaram durante a execução da pista.

Tabela 2.3 Condições de Temperatura e Umidade Relativa durante a Concretagem

Hora	Temperatura do Ar ao solo (°C)	Temperatura CA (°C)	Umidade Relativa do Ar ao solo (%)
9:09	20,1	21,9	49
09:38	26,0	28,5	40
09:43	28,4	32,4	38
10:00	32,1	33,1	32
10:15	32,9	35,3	31
10:30	36,0	37,1	32
10:45	37,9	39,4	31
11:00	39,0	39,0	26
11:15	40,3	42,0	26
11:30	42,0	45,0	26
11:45	43,1	45,0	27
12:00	44,6	47,9	22
12:15	45,0	46,9	23
12:30	43,1	48,3	23
12:45	41,9	49,6	23
13:15	40,0	50,5	22
13:30	43,3	52,3	22
13:45	45,6	47,9	25
14:00	46,9	48,2	24
14:15	48,7	50,2	26
14:30	42,7	45,3	25
14:45	40,1	49,9	28
15:00	44,4	48,8	26
15:15	48,4	53,7	23
15:30	44,0	47,4	29
15:45	43,1	47,6	25
16:00	42,0	45,4	27

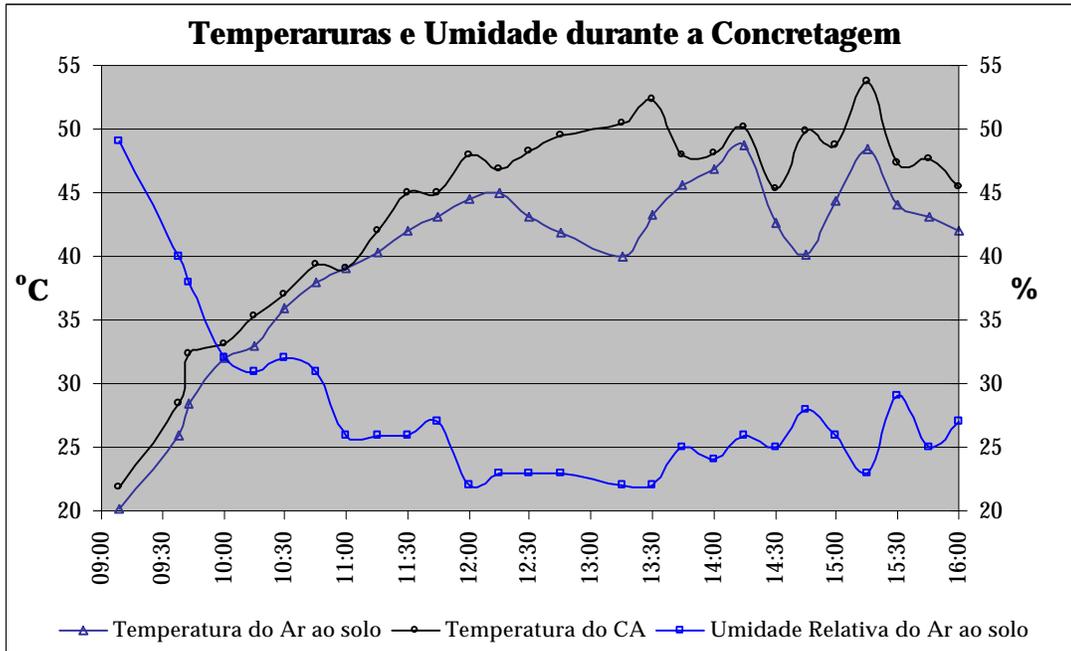


Figura 2.7 Distribuição Gráfica da Temperatura e Umidade Relativa durante a Concretagem

No que refere-se às resistências obtidas com os corpos de prova moldados durante a concretagem pelo fornecedor de concreto, os valores foram os seguintes:

- Resistência à compressão: após 48 horas de 46,6 MPa (1 cp); aos 5 dias de 63,7 e 62,3 MPa (2 cps);
- Resistência à tração na flexão: após 48 horas de 4,0 e 5,6 MPa (2 cps); após 7 dias de 6,6 e 6,0 MPa (2 cps);
- Resistência à tração na compressão diametral: após 48 horas de 4,4 MPa (1 cp); após 5 dias de 4,8 MPa (1 cp).

Já os valores destas resistências obtidos através da moldagem e ensaios realizados pelo LMP-EPUSP, sendo que os corpos de prova foram mantidos no local da concretagem até a data de ruptura para que melhor representassem o concreto utilizado, estão apresentados a seguir, nas Tabelas 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7.

Tabela 2.4 Resistência à Compressão Simples do Concreto aos 7 dias

Corpo de Prova	Resistência à Compressão (MPa)
CP A1a	48,56
CP A2a	25,39*
CP A3a	31,47*
Média	35,14
Desvio Padrão	12,01
Coeficiente de Variação	34,19%

* Corpos de prova que apresentaram problemas de paralelismo entre faces planas

Tabela 2.5 Resistência à Compressão Simples do Concreto aos 25 dias

Corpo de Prova	Resistência à Compressão (MPa)
CP A1b	43,06
CP A2b	52,55

CP A3b	53,83
Média	49,81
Desvio Padrão	5,88
Coeficiente de Variação	11,81%

Tabela 2.6 Resistência à Tração na Flexão do Concreto aos 7 dias

Corpo de Prova	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
CP B1a	6,6
CP B2a	7,4
Média	7,0

Tabela 2.7 Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade do Concreto aos 29 dias

Corpo de Prova	E (GPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
CP B1b	37,99	7,5
CP B1b	38,06	6,7
CP B1b		7,2
Média	38,03	7,1
Desvio Padrão		0,4
Coeficiente de Variação		5,66%

2.2 Monitoração de Campo

2.2.1 Esquema de Coleta de Dados

Conforme visto anteriormente, a pista foi dividida em duas seções, **A** e **B**, sendo as placas numeradas de A1 a A40 e B1 a B15.

A coleta de dados seria executada conforme um plano de leituras que contemplavam, primeiramente, coletas de dados espaçadas em duas horas até que os horários de máximo gradiente estivessem plenamente definidos, etapa esta que contaria inclusive com uma análise dos gradientes térmicos da pista executada de acordo com a prática corrente de pavimentos simples de concreto de cimento Portland, tendo em vista que este experimento, que também conta com o apoio da FAPESP e com a supervisão do LMP-EPUSP, possuía um esquema de leituras contínuas uma vez que o local onde este foi construído não apresenta problemas de segurança.

Após o conhecimento dos períodos críticos, as leituras seriam realizadas com menor periodicidade, sendo efetuadas, em sua grande maioria, durante o dia pois os gradientes térmicos noturnos não seriam rotineiramente captados devido a dúvidas quanto à segurança presente no local onde foi executada a pista. A cada saída a campo para tomada das medidas dos 48 *strain-gages* e 18 PT-100, o condicionador de sinais e o microcomputador portátil seriam levados até o local e lá permaneceriam durante as leituras que, devido à limitação de 32 canais disponíveis para leitura, sendo 22 para *strain-gages* e 10 para PT-100 por leitura, foram assim definidas:

- Leitura 0: Instrumentos das placas A19 a A34;
- Leitura 1: Instrumentos das placas A35 e A36;
- Leitura 2: Instrumentos das placas da seção B.

Tabela 2.8 Quantitativos de Instrumentos por Placas

Placa	Tipo de Instrumento	
	Strain-Gage	PT-100

A19		2
A20		2
A21		2
A22		2
A23	2	
A24	2	
A26	2	
A27	2	
A28	2	
A29	4	
A30	2	
A31	2	
A32	2	
A34	2	
A35	2	
A36	2	
B2	2	
B3	2	
B4		2
B6	2	2
B7	2	2
B8		2
B9	2	2
B10	2	
B11	2	
B12	2	
B13	2	
B14	2	
B15	2	
Total na Placa A	26	8
Total na Placa B	22	10
TOTAL	48	18

Contudo, mesmo sabendo-se do risco, ainda que pequeno, optou-se pela implantação de um sistema de leituras contínuas tendo em vista a importância de se conhecer não só os gradientes máximos e mínimos mas também a forma com que estas variáveis térmicas e deformações oscilariam durante os dias.

Os dados adquiridos foram tratados com auxílio de planilhas eletrônicas e gráficos formam elaborados com o intuito de facilitar a interpretação dos dados obtidos. Tais gráficos assemelham-se com o exibido na Figura 2.8 que representa as temperaturas durante os trabalhos de concretagem.

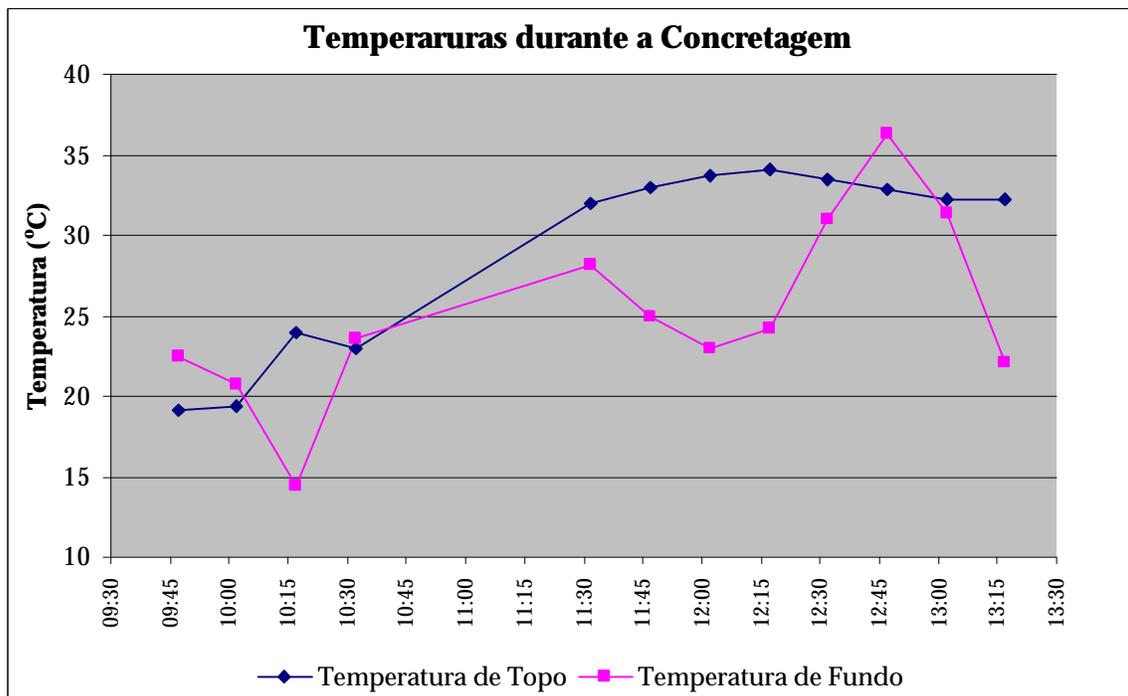


Figura 2.8 Variação da Temperatura do CCP no Topo e no Fundo durante a Concretagem

Convém ressaltar que durante o período analisado, com as reações exotérmicas de hidratação do cimento Portland presente no CCP, a temperatura deste material sofre grandes oscilações, fato que também foi verificado durante a coleta de dados destas mesmas etapas na outra pista experimental que contempla a prática executiva convencional de pavimentos de CCP, fenômeno que contribuiu para o surgimento de valores um tanto estranhos durante este período. Entretanto, após as reações mais intensas de hidratação do cimento, as leituras apresentaram uma maior consistência.

Em fevereiro de 2000, o painel de controle de leituras foi concluído dando-se por encerrada toda a parte de infra-estrutura do experimento uma vez que a parte de instalação elétrica já estava sendo concluída no final de janeiro do mesmo ano.

Em março de 2000, o condicionador de sinal apresentou problemas eletrônicos que foram solucionados por inteiro na primeira quinzena de maio.

A partir do dia 20 de maio de 2000 as leituras dos instrumentos começaram a ser realizadas conforme explicitado anteriormente, isto é, de forma contínua, intercalando-se, semanalmente entre as leituras 0 e 2, já que a leitura 1 apresenta apenas strain-gages sobressalentes da seção A.

A frequência de aquisição dos valores de temperatura e deformação foi fixada em uma leitura a cada 10 min, permitindo a avaliação de todas variações ocorridas ao longo do dia e, por consequência, nuanças existentes nestas leituras em dias de diferentes estações climáticas do ano.

2.2.2 Pesquisa de Dados Climáticos

Em paralelo às leituras na pista instrumentada de WTUD, uma pesquisa de dados climáticos foi realizada junto ao Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo (CTH). Este estudo foi importante para a compreensão de alguns fenômenos ocorridos durante os dias no que tange às temperaturas e, conseqüentemente, aos gradientes térmicos.

Diariamente, o CTH obtém informações relacionadas, entre outras coisas, à umidade relativa do ar, temperaturas máximas e mínimas, índices pluviométricos, vento, insolação e classificação climatológica. Entretanto, o CTH paralisou suas atividades em 30 de março de 2000, retornando as suas atividades normais em 14 de junho de 2000, período em que esta pesquisa ficou prejudicada.

O Anexo E apresenta a forma com que tais dados foram tratados, possibilitando assim a compreensão de qualquer comportamento anômalo da temperatura e gradiente térmico nas placas durante o período de coleta.

2.2.3 Impacto da Insolação nas Leituras

Durante análises gráficas das leituras de temperaturas e gradientes térmicos foram observadas “quedas” localizadas nestes valores que podem ser verificados na Figura 2.9, ocorridas, na maioria das vezes, nos mesmos horários. Desconfiou-se então que tal comportamento poderia estar sendo provocado por sombras que também poderiam estar induzindo diferentes gradientes térmicos em distintas posições de medidas na placa visto que, dado às reduzidas dimensões em planta, optou-se por não instrumentar uma mesma placa em mais de uma posição (borda, canto ou centro).

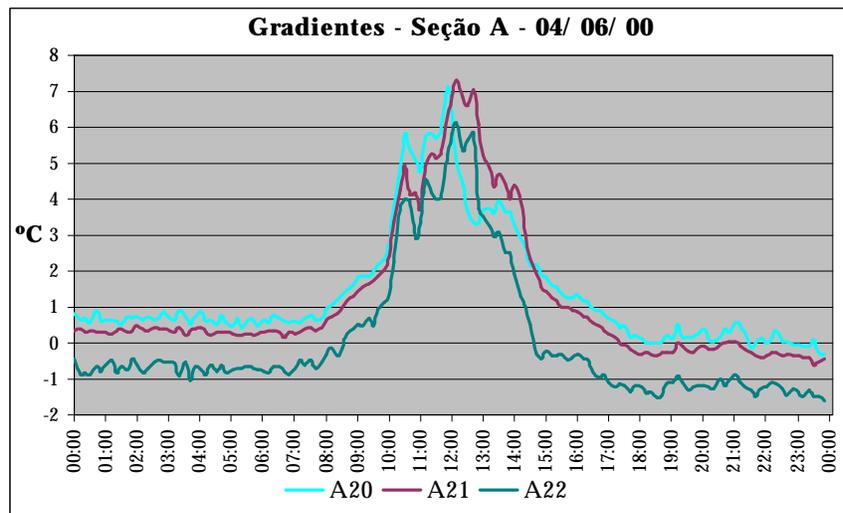


Figura 2.9 Detalhe das “quedas” de gradientes térmicos

Com intuito de dirimir possíveis interpretações errôneas a respeito destas leituras, no dia 14 de junho de 2000 procedeu-se um levantamento de campo para determinação da evolução da incidência solar sobre as placas de WTUD. Tal levantamento está apresentado graficamente no Anexo C deste trabalho.

Conforme pode ser visto na Figura 2.10, a pista experimental encontra-se perfeitamente alinhada na direção leste-oeste. No outono, o sol não incide na pista de forma direta visto a existência de um ângulo de aproximadamente 44° entre a linha do horizonte e o sol às 12h, fato que contribui para o surgimento de sombra sobre as placas de CCP. Contudo, no verão, a insolação será direta uma vez que este ângulo será próximo à 90°.

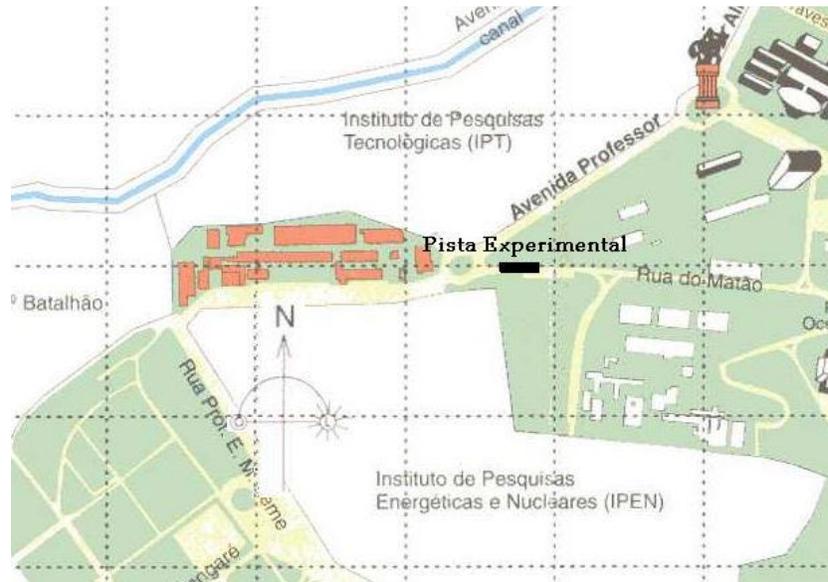


Figura 2.10 Posição Solar da Pista Experimental de WTUD

O fator sombra torna-se importante para a compreensão e interpretação dos dados obtidos referentes ao gradiente térmico, sobretudo no que refere-se à determinação de possíveis diferenças entre estes valores encontrados nas mais variadas posições das placas instrumentadas, conforme visto. Afora isto, sombras são largamente encontradas em vias urbanas, local onde tal técnica em estudo predispõe-se a ser utilizada.

Durante o final da primavera e início do verão de 2000, tais interferências sobre as leituras de temperatura não foram observadas. Em levantamento expedito, notou-se a incidência direta do sol nas placas, de forma uniforme nas duas seções de análise, sendo portanto dispensada uma análise mais aprofundada.

2.2.4 Perfil

Com o objetivo de avaliar a irregularidade longitudinal do WTUD pensou-se em, inicialmente, realizar medidas periódicas desta irregularidades com emprego de método de nível e mira entre as juntas transversais consecutivas de placas de controle. No entanto, no dia 5 de agosto de 2000, foi realizado tal levantamento com auxílio de um equipamento chamado *dipstick*, contando com a assessoria da LPE Engenharia e Consultoria Ltda.

Este equipamento, mostrado na Figura 2.11, é largamente usado para a determinação de irregularidades em pavimentos industriais e controle de qualidade executiva dos mesmos, podendo ainda, conforme relatos encontrados em Tarr et al (2000), medir o empenamento das placas de *whitotopping* devido aos gradientes térmico e higroscópico.



Figura 2.11 *Dipstick* medindo a Irregularidade Longitudinal no WTUD

Este levantamento foi realizado dividindo-se a pista experimental em duas partes coincidentes com as seções de diferentes dimensões em planta das placas de CCP. Assim, enquanto media-se a irregularidade longitudinal da seção A, por exemplo, coletas de dados das placas desta seção eram realizadas com uma frequência de uma leitura por minuto a fim de obter os gradientes térmicos no momento das leituras. O mesmo procedimento foi adotado para as placas da seção B.

Porém, devido à pequena extensão do trecho experimental, não foi possível correlacionar os dados obtidos pelo *dipstick* com coeficientes capazes de aferir o nível de conforto ao rolamento deste tipo de pavimento como, por exemplo, o Quociente de Irregularidade (QI), isto porque o número de pontos amostrais é insuficiente para a determinação da aceleração vertical média quadrática para a base de 2,5 m de comprimento, valor utilizado na determinação do QI.

Na revisão literária sobre a utilização do WTUD, encontrou-se um relato sobre a utilização de um processo, diferente daquele empregado no experimento, que também forneceu uma idéia da irregularidade longitudinal deste tipo de placas de CCP. Estes relatos foram feitos por Armaghani e Tu (1999) e informam que após a execução do WTUD, este apresentou uma medida média de irregularidade igual a 45 mm/km, realizados por um perfilógrafo. Um ótimo valor visto a maior probabilidade de surgimento de irregularidades devido à alta densidade de juntas apresentada por este tipo de pavimento de CCP. Este valor indicou a aptidão das pavimentadoras convencionais na execução do WTUD.

Conforme discutido, a determinação da irregularidade longitudinal do WTUD não será utilizada para a determinação de um índice qualitativo de conforto ao tráfego mas, futuramente, poderá fornecer uma análise comparativa da evolução deste problema com o passar do tempo. É importante salientar que nenhuma evolução dos defeitos oriundos das etapas construtivas do WTUD foram observados, bem como novos defeitos. Assim, a análise comparativa propiciada por uma segunda investigação com o *dipstick* deverá ser realizada após a entrega deste trabalho, quando alguma patologia acometer o pavimento.

2.2.5 ICP

Além dos estudos comentados nos itens anteriores, foram realizadas monitorações das condições funcionais e estruturais do pavimento através de levantamentos das patologias, bem como de suas feições.

Balbo (1997) salienta que o ICP (Índice de Condição do Pavimento) foi desenvolvido e calibrado para vias tipicamente urbanas e com base em práticas e métodos muito bem esclarecidos pelo USACE.

Com o intuito de verificar a aplicabilidade do critério do Índice de Condição do Pavimento (ICP) como índice de qualidade funcional e estrutural de *whitetoppings* ultradelgados, visto a existência de relatos sobre sua utilização com esta finalidade em WTUD americanos, foi aplicada esta metodologia durante o período de duração deste experimento, seguindo as orientações de seus idealizadores presentes em USACE (1979).

Entre 1995 e 1996, dez projetos foram escolhidos para terem suas condições levantadas através do ICP nos Estados Unidos da América. A escolha destes locais fundamentou-se no emprego de CCP com dosagens parecidas, na proximidade de localização, usos similares das rodovias, no não fechamento da via ao tráfego para o levantamento do ICP e por serem representativos dos primeiros WTUD executados nos EUA, conforme relata Cole (1997).

Cole (1997) menciona que os levantamentos necessários à determinação do ICP foram realizados entre junho e agosto de 1995 e novamente em 1996, nestes mesmos meses. Neste estudo, as condições de selagem das juntas foram ignoradas por terem sido, propositadamente, deixadas sem selagem.

Todos trechos que tiveram seu ICP mensurados foram executados de maneira similar, com fresagem do CA, vassouramento posterior, sem uso de agentes adesivos, adensados e vibrados com vibrador de superfície e texturizados com auxílio de vassouras. Cole (1997) adiciona que a cura foi feita por meio químico com as juntas serradas logo após o pega do cimento Portland.

Um resumo do levantamento realizado entre 1995 e 1996 por Cole (1997) é apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 Síntese dos levantamentos realizados para obtenção do ICP nos EUA

Seção	Total de Placas	Espes. (mm) / Dim Placas (m)	Percentual de Placas com Defeitos (%)								ICP		N acumul desde a construção (x10 ³)	
			Rupturas de Canto		Fissuras Lineares		Divisão de Placas		Total de Fissuras		1995	1996	1995	1996
			1995	1996	1995	1996	1995	1996	1995	1996				
<i>Belvoir Avanie Green St.</i>	76	75 / 1,5	7	11	5	9	1	1	13	21	90	86	36	59
<i>S. H. 56</i>	195	75 / 0,9 e 1,1	2	5	1	3	0	0	3	8	97	93	103	173
<i>Concord St.</i>	648	75 / 0,9	3	6	5	6	1	3	9	5	89	86	143	224
<i>Cusick St. *</i>	84	90 / 1,2	1	1	1	2	0	0	2	3	96	94	63	80
<i>Cusick St. **</i>	93	75 / 1,2	6	6	9	9	0	1	15	16	93	89	126	181
<i>I – 85 ***</i>	62	75 / 1,2	23	27	16	19	5	5	44	51	75	71	84	121
<i>I – 85 ****</i>	537	65 / 0,6	0	0	2	2	0	0	2	2	97	97	300	430
<i>Wesley Chapel Road</i>	133	65 / 0,6	0	0	7	8	0	1	7	9	95	93	300	430
<i>Marbut Road</i>	111	75 / 1,2	0	3	5	6	1	2	7	11	95	92	129	207
	260	75 / 1,2	3	3	1	2	0	2	4	7	95	91	50	78

* Faixa de rolamento externa

** Faixa de rolamento interna

*** Trecho de aproximação da balança de pesagem de caminhões

**** Trecho de saída da balança de pesagem de caminhões

Com base nos resultados de ICP descritos na Tabela 2.9, pode-se classificar a condição das vias estudadas, com base nos limites dados pela Tabela 2.10.

Tabela 2.10 Classificação do estado da via de acordo com o ICP

Limites de ICP	Condições da Rodovia
86 – 100	EXCELENTE
71 – 85	MUITO BOA
56 – 70	BOA
41 – 55	REGULAR
26 – 40	RUIM
11 – 25	MUITO RUIM
0 - 10	PÉSSIMA

Cole (1997) concluiu que, salvo uma mudança acentuada no tráfego, tais projetos estarão aptos a servirem aos usuários por mais 8 a 12 anos com um ICP acima de 55, que classifica a estrada como em boas condições de trafegabilidade. O caso do trecho da I – 85, que tem o maior ICP e, contraditoriamente, o maior número de solicitações acumuladas de todos analisados, é explicado pelo autor pelo fato do CA neste local apresentar grande espessura, algo em torno de 225 mm, e pela dimensões reduzidas das placas de CCP, apenas 0,61 m.

2.2.6 Provas de Carga

Provas de carga com a finalidade de medir deformações nas placas de WTUD foram realizadas contemplando posições de carga de centro, bordas e, principalmente, as de canto que induzem a tensões críticas. Inicialmente, estas seriam realizadas em diferentes períodos do dia e do ano, a fim de observar possíveis variações causadas pelas condições climáticas e período de vida do WTUD. Esta última análise poderia ser utilizada como um parâmetro de avaliação de uma eventual perda de aderência.

Conciliando tais provas de carga à modelagem numérica com emprego do programa FEACONS 4.1 SI que possui reconhecida adequação de uso para análise de tensões, deformações e deslocamentos deste tipo de pavimento composto em estudo, potencializa-se a calibração de

modelos para cálculo de tensões críticas nas placas de CCP desenvolvidos pelo LMP juntamente com a ABCP, LMP (1998), considerando, inclusive, o efeito do gradiente térmico se este for relevante.

Estas provas de carga ocorreriam, a princípio, no mês de julho e dezembro de 2000, porém, devido a problemas que forçaram a recalibração dos instrumentos e equipamentos envolvidos nas medidas, optou-se pela realização da prova de carga após a resolução deste problema com intuito de garantir a confiabilidade das informações referentes às deformações pois foi observado um gradativo aumento nestes valores com o decorrer dos dias de leituras, mesmo quando os gradientes térmicos diminuam, conforme fica claro na Figura 2.12.

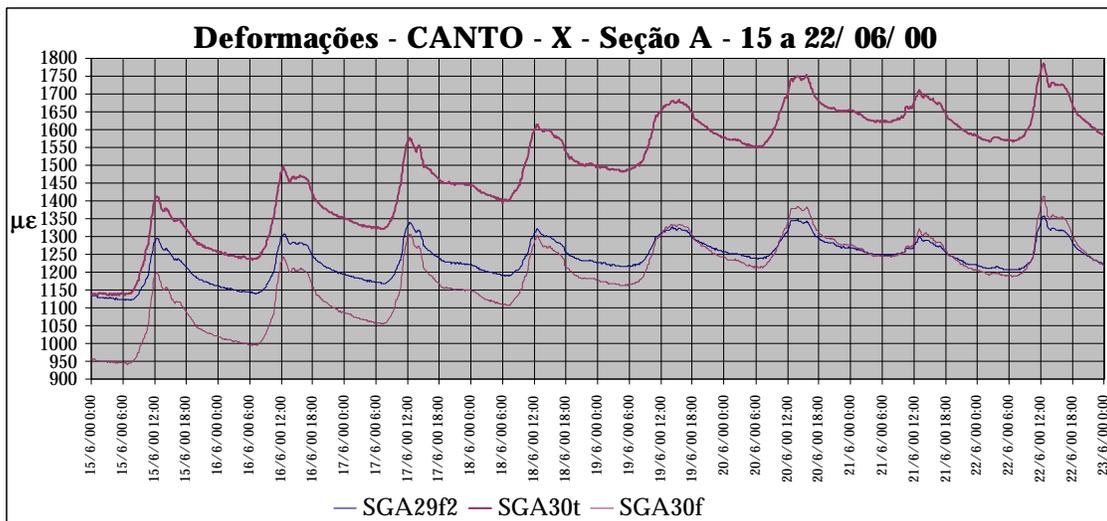


Figura 2.12 Deformações de Canto nas placas da Seção A entre os dias 15 e 22/06/2000

Nestas condições, tanto a análise da posição da linha neutra quanto das deformações resultantes do efeito conjugado entre carga e gradiente térmico estariam comprometidas.

Sanado o problema, no dia 28 de outubro de 2000, provas de carga foram realizadas nas diferentes placas instrumentadas. Para tanto, foi utilizado um caminhão com um eixo de rodas simples (ESRS) com 31,6 kN e outro eixo, traseiro, do tipo eixo simples de rodas duplas (ESRD) com um peso de 87,0 kN. A pressão de todos os pneus era de 0,621 MPa.

O esquema adotado para a prova de carga em cada placa foi idêntico, alternando somente a posição de carregamento para diferentes placas, conforme exposto anteriormente. Todas placas foram solicitadas pelos dois diferentes eixos do caminhão, na mesma posição aproximada.

Antes do posicionamento do caminhão sobre as placas, efetuou-se uma primeira coleta de temperatura e deformação. Logo em seguida, o caminhão era posicionado sobre a placa em estudo e, novamente, os valores de temperatura e deformação eram registrados, em número suficiente para uma análise estatística consistente. Tal procedimento foi repetido para as diferentes placas analisadas.

No dia da prova de carga, não foram constatados gradientes térmicos consideráveis visto a ocorrência de grande nebulosidade. A previsão desta condição climática não foi possível.

O planejamento das provas de carga tentou otimizar todo o processo com o objetivo de reduzir o tempo para execução dos testes, tendo em vista a idéia inicial de condução destas em diferentes períodos do dia. Maiores influencias de diferentes gradientes térmicos nas placas também seriam dirimidas com a execução rápida dos testes.

Optou-se pela realização das provas de carga conduzindo o caminhão sobre uma mesma “linha” de placas; o entendimento torna-se mais fácil com auxílio da Figura 2.3. Por exemplo, as placas A33 até A40 que possuem *strain-gages* foram carregadas na seqüência; o mesmo aconteceu para a “linha” das placas A25 até A32, e assim por diante. Após a solicitação de todas as placas de uma mesma seção com o ESRS, passou-se para o ESRD.

Arbitrariamente, a posição da carga de cada um dos eixos sobre as placas foi escolhida de maneira a aproximar o ponto de aplicação da carga com a localização dos *strain-gages*. A Figura 2.13 e a Tabela 2.11 fornecem a posição exata do centro de aplicação de carga em cada um dos casos (ESRS e ESRD) para as diferentes placas.

Tabela 2.11 Coordenadas do Centro da Roda Externa dos Eixos nas Provas de Carga

Placas	ESRS		ESRD	
	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
A23	250	150	340	90
A24	320	130	340	100
A26	280	260	290	130
A27	180	480	200	150
A28	160	320	160	170
A29a	420	450		
A29b	160	140	170	200
A30	370	140	480	180
A31	290	340	310	170
A32	260	340	260	150
A34	470	255	400	180
B2	860	80	820	620
B3	840	100	820	640
B6	470	150	470	340
B7	280	780	390	300
B9	680	450	690	130
B11	550	460	570	390
B12	140	870	350	360
B13	460	510	420	280
B14	830	540		
B15	200	560	240	220

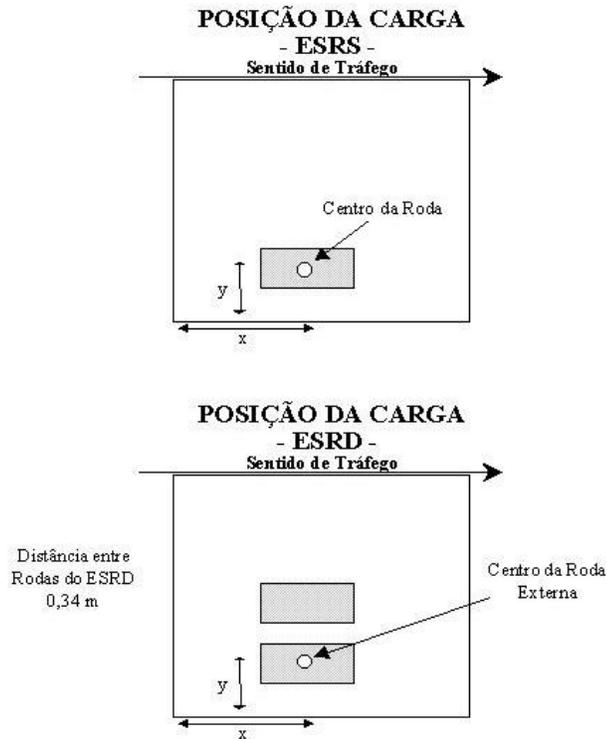


Figura 2.13 Esquema do Posicionamento dos ESRS e ESRD nas Provas de Carga

De posse dos resultados coletados, tendo-se com exatidão o posicionamento das rodas e o arquivo correspondente a cada uma das provas de carga, fez-se o cálculo das deformações e tensões induzidas no WTUD devido às cargas. Estes valores foram posteriormente comparados com os calculados através de simulações numéricas, obtidas com auxílio do programa FEACONS 4.1 SI. Um aspecto importante no cálculo das tensões e deformações por meio deste programa de elementos finitos é que as malhas foram discretizadas para cada uma das configurações, contemplando as diferentes dimensões em planta das placas, posicionamento e tipo de eixo, bem como posição dos *strain-gages*.

Capítulo 3

Resultados Obtidos

3.1 Temperaturas

A coleta de dados de maneira contínua possibilitou a análise das variações diárias tanto das temperaturas quanto dos gradientes térmicos nas placas de WTUD. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 estão apresentados um resumo dos valores de temperatura obtidas no outono de 2000. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 os valores referem-se aos mesmos dados obtidos no inverno. Na seqüência são apresentados os dados de primavera e verão. Esta última estação não possui dados envolvendo todo período, isto é, de dezembro a março, porque não houve tempo suficiente para captura completa dos valores de verão até o fechamento deste trabalho.

Tabela 3.1 Temperaturas de Outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)

Data	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
31/05	27,1	21,3	27,1	26,3	15,9	16,8	16,3	15,9
01/06	18,8	16,9	16,4	16,8	13,5	14,5	13,6	13,5
02/06	24,0	21,5	24,0	23,9	12,3	13,4	12,4	12,3
03/06	25,0	24,1	24,5	25,0	11,7	13,2	12,3	11,7
04/06	28,1	26,7	27,8	28,1	14,3	15,1	14,3	14,5
05/06	27,5	26,5	27,5	27,5	12,9	14,4	13,6	12,9
06/06	26,8	25,8	26,8	26,5	12,3	13,6	12,6	12,3
07/06	28,9	27,4	28,9	28,1	12,2	13,5	12,5	12,2
15/06	28,5	26,9	28,5	26,9	12,9	14,3	13,3	12,9
16/06	27,6	26,3	27,6	26,0	12,9	14,2	13,2	12,9
17/06	29,2	27,6	29,2	27,3	13,5	14,8	13,9	13,5
18/06	27,2	25,8	27,2	25,8	14,0	15,4	14,4	14,0
19/06	24,2	23,4	24,2	23,2	15,0	15,8	15,0	15,0
20/06	24,1	23,6	24,1	23,6	14,7	15,7	14,8	14,7
21/06	21,0	18,2	20,6	21,0	11,3	12,7	11,6	11,3
MÁX	29,2	27,6	29,2	28,1	15,9	16,8	16,3	15,9
MÍN	18,8	16,9	16,4	16,8	11,3	12,7	11,6	11,3
MÉD	25,9	24,1	25,6	25,1	13,3	14,5	13,6	13,3
DES PAD	3,0	3,3	3,5	3,0	1,3	1,1	1,2	1,3
CV(%)	11,6	13,8	13,5	12,1	9,7	7,8	9,1	9,8

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.2 Temperaturas de Outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)

Data	Temperaturas Máximas (°C)					Temperaturas Mínimas (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B.Tran
20/05	22,1	22,1	19,5	20,4	S.L	13,5	15,1	13,5	13,7	S.L

21/05	27,7	27,7	21,7	26,1	S.L	13,4	15,3	13,4	13,7	S.L
22/05	31,9	31,9	21,0	29,4	S.L	11,7	13,7	11,7	11,9	S.L
23/05	31,4	31,4	21,3	28,5	S.L	12,5	14,8	12,5	13,2	S.L
24/05	30,7	30,7	20,2	27,6	S.L	11,8	13,9	11,8	12,2	S.L
25/05	31,4	31,4	20,3	28,1	26,0	10,6	13,7	11,6	12,1	10,6
26/05	32,1	32,1	21,8	29,0	26,7	11,2	14,5	12,4	12,8	11,2
27/05	21,3	21,3	19,3	19,8	18,9	12,9	16,0	13,8	14,4	12,9
28/05	32,6	32,6	18,3	28,4	26,7	10,1	13,0	11,0	11,6	10,1
29/05	29,3	29,3	16,9	25,4	23,7	7,1	10,5	8,1	8,5	7,1
08/06	29,7	29,7	19,7	27,4	24,9	10,2	13,6	11,3	11,9	10,2
09/06	27,6	27,6	20,3	26,2	24,3	10,5	14,2	11,6	12,2	10,5
10/06	26,5	26,5	22,5	26,1	24,2	13,1	16,5	13,8	14,7	13,1
11/06	28,4	28,4	21,6	25,6	24,0	12,2	15,8	13,4	13,8	12,2
12/06	27,8	27,8	19,9	25,2	23,5	12,1	15,3	13,4	13,7	12,1
13/06	27,8	27,8	21,2	25,9	23,4	10,9	14,6	12,3	12,6	10,9
MÁX	32,6	32,6	22,5	29,4	26,7	13,5	16,5	13,8	14,7	13,1
MÍN	21,3	21,3	16,9	19,8	18,9	7,1	10,5	8,1	8,5	7,1
MÉD	28,6	28,6	20,3	26,2	24,2	11,5	14,4	12,2	12,7	11,0
DES PAD	3,3	3,3	1,4	2,7	2,1	1,6	1,4	1,4	1,5	1,7
CV(%)	11,5	11,5	7,0	10,4	8,9	14,1	9,8	11,8	11,6	15,2

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.
S.L = Sem Leituras

Tabela 3.3 Temperaturas de Inverno no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)

Data	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
22/06	25,5	24,1	25,5	24,2	10,4	11,8	10,6	10,4
23/06	25,4	23,4	25,4	23,5	7,5	9,1	8,0	7,5
24/06	27,5	25,8	27,5	25,9	9,2	10,8	9,7	9,2
25/06	27,8	27,8	27,5	25,3	12,6	13,5	13,0	12,6
26/06	26,0	25,5	26,0	25,5	13,9	14,9	14,3	13,9
27/06	24,5	23,5	24,5	24,4	15,0	15,8	15,0	15,2
28/06	29,3	27,9	29,3	28,2	14,9	15,8	15,1	14,9
29/06	25,2	24,8	25,2	24,5	14,1	15,2	14,4	14,1
30/06	20,7	20,7	19,7	19,8	14,3	15,5	14,4	14,3
01/07	27,6	26,4	27,6	26,6	12,0	13,4	12,1	12,0
02/07	29,3	27,5	29,3	28,3	11,5	12,9	11,8	11,5
03/07	20,0	20,0	18,8	18,9	14,4	15,2	14,6	14,4
12/07	22,9	22,9	21,6	21,9	15,2	16,4	15,3	15,2
13/07	22,7	20,1	22,3	22,7	13,2	14,4	13,3	13,2
14/07	17,3	17,3	15,9	16,2	11,1	12,3	11,2	11,1
15/07	23,6	23,6	21,3	22,8	12,0	13,0	12,0	12,0
16/07	25,4	24,8	24,4	25,4	9,4	10,5	9,6	9,4
17/07	22,7	20,6	21,6	22,7	5,4	6,9	5,7	5,4
26/07	18,8	18,8	17,5	17,6	12,0	12,9	12,0	14,3
27/07	20,9	20,9	19,9	20,3	10,9	12,1	10,9	11,0
28/07	30,0	29,5	29,0	30,0	11,9	13,1	11,9	12,3
29/07	30,2	30,2	29,5	30,2	11,2	12,4	11,4	11,2
30/07	31,5	31,5	30,7	31,5	10,3	11,6	10,6	10,3
31/07	30,9	30,9	29,7	30,3	11,4	12,7	11,7	11,4
06/08	28,2	28,2	26,7	27,4	10,7	11,9	10,8	10,7
07/08	32,4	32,4	30,1	31,7	13,5	14,4	13,5	13,8
08/08	34,8	34,8	33,1	34,1	13,3	14,3	13,4	13,3
09/08	36,4	36,4	34,4	35,3	14,2	15,3	14,4	14,2
10/08	21,9	20,0	19,5	20,3	12,8	13,9	12,8	12,8
11/08	17,3	17,3	15,7	16,4	10,6	12,1	10,6	10,8
12/08	17,3	17,3	15,7	16,6	7,9	9,2	7,9	8,0
13/08	32,6	32,6	30,9	32,0	8,3	9,7	8,3	8,5
14/08	34,5	34,5	32,5	33,4	10,3	11,4	10,3	10,4
30/08	34,7	34,7	32,8	32,8	12,3	13,3	12,7	12,3
31/08	18,4	18,4	17,7	17,7	14,5	15,2	14,7	14,5
01/09	26,8	26,8	25,5	26,5	12,7	13,7	13,0	12,7
02/09	14,9	14,6	14,0	14,1	11,7	12,4	11,9	11,7
03/09	15,0	15,0	14,4	14,4	11,2	11,8	11,3	11,2
04/09	17,4	17,4	16,4	16,9	10,7	11,2	10,7	10,7
05/09	31,6	31,2	30,7	31,6	11,6	12,1	11,6	11,9
14/09	35,3	35,3	33,0	35,1	16,6	17,2	16,6	16,7
15/09	34,8	34,8	32,9	34,4	18,9	19,5	19,0	18,9
16/09	21,4	21,0	20,2	20,7	16,2	16,9	16,3	16,2
17/09	20,6	20,6	19,8	20,1	15,2	15,9	15,4	20,1
18/09	37,2	37,2	34,9	35,3	14,8	15,4	14,8	15,0
19/09	33,9	33,9	32,6	33,2	17,4	18,1	17,5	17,4
20/09	42,2	42,2	40,3	41,6	17,6	18,2	17,7	17,6
21/09	43,8	43,8	41,9	43,1	19,0	19,7	19,2	19,0
MÁX	43,8	43,8	41,9	43,1	19,0	19,7	19,2	20,1
MÍN	14,9	14,6	14,0	14,1	5,4	6,9	5,7	5,4
MÉD	26,9	26,4	25,7	26,1	12,6	13,6	12,8	12,8
DESV PAD	7,0	7,2	6,8	7,0	2,9	2,7	2,8	3,0
CV (%)	26,2	27,1	26,5	27,0	22,7	19,6	22,3	23,7

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.4 Temperaturas de Inverno no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)

Data	Temperaturas Máximas (°C)					Temperaturas Mínimas (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B.Tran
05/07	24,9	24,9	20,8	24,7	22,0	11,6	14,9	12,9	13,3	11,6

06/07	30,2	30,2	20,8	27,8	25,8	11,5	15,0	12,9	13,3	11,5
07/07	29,6	29,6	20,2	27,0	24,7	10,0	13,1	11,4	11,8	10,0
08/07	30,9	30,9	20,4	28,2	26,3	11,0	14,4	12,3	12,7	11,0
09/07	31,7	31,7	21,1	29,3	26,8	11,3	15,0	12,5	13,1	11,3
10/07	31,6	31,6	22,9	29,9	27,2	11,9	15,3	12,9	13,7	11,9
20/07	25,4	25,4	15,2	23,0	21,6	4,7	8,1	6,2	6,2	4,7
21/07	26,2	26,2	15,8	24,1	22,7	2,8	6,4	4,1	4,4	2,8
22/07	22,4	22,4	20,4	20,9	19,2	8,8	12,1	9,5	10,4	8,8
23/07	17,0	17,0	15,0	15,1	15,1	8,5	11,5	9,9	10,2	8,5
24/07	25,3	25,3	20,1	23,1	21,1	7,3	10,6	8,8	8,9	7,3
02/08	26,6	26,6	24,9	26,3	24,2	11,9	14,7	12,8	13,6	11,9
03/08	21,1	21,1	19,5	19,7	18,2	12,6	15,5	13,6	14,1	12,6
04/08	16,7	16,7	15,2	15,4	14,9	8,8	11,2	10,4	10,4	12,9
16/08	17,4	17,4	16,0	16,2	16,5	11,9	14,5	12,9	13,4	11,9
17/08	27,9	27,9	25,2	26,4	24,7	11,7	14,2	12,5	13,1	11,7
18/08	30,8	30,8	27,9	29,4	27,6	12,7	15,3	13,6	14,0	12,7
19/08	34,1	34,1	33,4	33,6	31,2	12,4	14,4	13,4	13,7	12,4
20/08	37,9	37,7	37,4	37,9	35,6	12,5	15,2	14,0	14,1	12,5
21/08	38,4	37,9	38,3	38,4	36,2	12,3	14,5	13,9	13,8	12,3
22/08	38,4	38,4	38,4	37,9	36,2	12,5	14,8	13,9	13,9	12,5
23/08	36,8	36,8	36,2	36,7	34,9	13,1	15,7	14,5	14,6	13,1
24/08	38,6	38,6	38,6	38,2	36,5	12,9	15,5	14,3	14,3	12,9
25/08	39,9	39,9	39,9	39,2	37,1	13,6	15,9	15,0	15,1	13,6
26/08	40,6	40,6	39,4	38,4	36,8	16,2	18,8	17,6	17,7	16,2
27/08	28,5	28,5	26,9	27,3	25,7	15,0	17,2	16,5	16,5	15,0
28/08	18,8	18,8	16,9	17,3	17,8	11,2	13,7	12,6	12,6	11,2
07/09	31,9	31,9	30,7	31,7	30,1	13,2	15,6	14,4	14,5	13,2
08/09	36,4	36,4	35,5	36,2	34,6	12,0	14,8	13,5	13,7	12,0
09/09	37,6	37,6	36,7	37,2	35,8	13,7	16,1	15,2	15,3	13,7
10/09	42,6	42,6	42,4	42,6	41,1	13,9	16,3	15,5	15,5	13,9
11/09	42,5	42,5	41,8	42,2	40,7	16,9	19,4	18,4	18,4	16,9
12/09	25,4	25,4	24,1	24,5	24,4	15,1	17,2	16,7	16,7	15,1
MÁX	42,6	42,6	42,4	42,6	41,1	16,9	19,4	18,4	18,4	16,9
MÍN	16,7	16,7	15,0	15,1	14,9	2,8	6,4	4,1	4,4	2,8
MÉD	30,4	30,4	27,2	29,3	27,7	11,7	14,5	13,0	13,2	11,8
DES PAD	7,6	7,6	9,2	8,1	7,7	2,9	2,6	2,9	2,9	2,9
CV(%)	25,1	25,0	34,0	27,5	27,7	24,9	18,2	22,6	21,7	24,3

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.5 Temperaturas de Primavera no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)

Data	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
06/10	31,2	31,2	29,4	29,5	17,5	18,3	17,7	17,5
07/10	46,0	46,0	43,7	42,1	15,9	16,8	16,1	15,9
08/10	43,7	43,7	43,0	42,1	18,9	19,8	19,3	18,9
09/10	39,1	39,1	39,0	38,9	20,7	21,5	21,0	20,7
07/11	29,8	29,8	28,6	29,4	20,1	20,7	20,1	20,1
08/11	46,8	46,7	44,7	46,8	17,6	18,4	17,8	17,6

09/11	46,2	46,2	44,2	46,1	20,0	20,8	20,1	20,0
10/11	32,8	32,8	31,2	32,5	21,8	22,4	21,9	21,8
11/11	45,7	45,7	43,8	45,7	20,6	21,5	20,7	20,6
12/11	42,2	42,2	40,7	41,8	22,3	23,1	22,4	22,3
13/11	39,0	39,0	37,2	38,8	21,2	21,8	21,5	21,2
14/11	25,2	24,6	23,8	24,7	17,7	18,5	17,7	17,7
15/11	35,8	35,7	34,4	35,8	16,9	17,7	16,9	17,0
16/11	37,1	37,1	35,9	36,6	19,5	20,2	19,6	19,5
17/11	40,0	40,0	38,4	39,5	20,1	20,9	20,3	20,1
18/11	25,3	24,5	23,7	24,8	16,8	17,5	17,0	16,8
19/11	36,5	36,3	34,7	36,5	16,5	17,2	16,5	16,6
20/11	44,6	44,2	42,6	44,6	19,2	19,9	19,3	19,2
21/11	40,4	39,7	38,6	40,4	19,3	20,0	19,4	19,3
22/11	42,4	42,2	39,7	42,4	18,7	19,5	18,7	18,8
23/11	43,9	43,6	42,2	43,9	19,8	20,5	19,8	19,8
24/11	43,8	43,5	42,0	43,8	21,7	22,4	21,7	21,7
25/11	30,4	30,3	29,1	30,4	19,6	20,3	19,7	19,6
09/12	47,0	46,9	44,9	47,0	21,6	22,3	21,6	21,7
10/12	35,4	35,4	33,7	35,2	21,8	22,6	22,0	21,8
11/12	44,0	44,0	41,8	43,9	19,6	20,3	19,6	19,7
12/12	44,8	44,8	42,9	44,8	21,4	22,1	21,4	21,6
13/12	39,9	39,9	38,0	39,8	21,8	22,6	21,8	22,1
14/12	40,5	40,5	38,4	40,3	20,8	21,5	20,8	20,9
15/12	36,0	36,0	34,6	36,0	21,9	22,4	21,9	21,9
16/12	34,7	34,7	33,0	34,7	19,1	19,8	19,2	19,1
17/12	23,3	23,3	22,5	23,3	16,0	16,7	16,0	16,0
18/12	24,8	24,8	23,6	24,8	15,9	16,5	16,0	15,9
19/12	35,3	35,2	33,8	35,3	16,9	17,5	16,9	17,0
20/12	42,8	42,4	40,1	42,8	18,0	18,5	18,0	18,0
21/12	43,6	43,4	41,1	43,6	19,8	20,5	19,8	19,9
MÁX	47,0	46,9	44,9	47,0	22,3	23,1	22,4	22,3
MÍN	23,3	23,3	22,5	23,3	15,9	16,5	16,0	15,9
MÉD	38,3	38,2	36,6	38,0	19,4	20,1	19,5	19,4
DESV PAD	6,8	6,9	6,6	6,8	1,9	1,9	1,9	2,0
CV (%)	17,8	18,0	18,0	18,0	10,0	9,7	10,0	10,1

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.6 Temperaturas de Primavera no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)

Data	Temperaturas Máximas (°C)					Temperaturas Mínimas (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B. Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B. Tran
10/10	38,4	38,4	37,6	37,7	36,2	17,6	19,7	19,6	19,1	17,6
11/10	41,8	41,1	40,1	41,8	39,7	17,8	19,9	19,2	19,4	17,8
12/10	45,5	44,3	42,7	45,5	43,6	17,9	19,8	19,2	19,4	17,9
29/10	30,7	30,7	29,2	30,1	28,5	16,1	18,5	17,5	17,6	16,1
30/10	46,5	46,3	46,5	46,4	44,6	16,0	18,5	17,2	27,4	16,0
31/10	41,2	41,2	41,1	41,2	39,5	19,8	22,1	21,3	21,3	19,8
01/11	47,1	47,0	47,1	47,0	45,4	18,9	21,3	20,6	20,4	18,9
02/11	47,4	47,4	46,8	47,3	45,7	20,0	22,3	21,5	21,5	20,0
03/11	36,1	36,1	35,1	35,8	34,3	20,4	22,7	21,9	21,9	20,4
04/11	44,8	44,7	44,0	44,8	43,0	19,7	22,1	21,1	21,2	19,7
05/11	38,6	38,6	37,5	38,3	36,8	21,6	24,0	23,0	23,1	21,6

28/11	46,4	45,7	46,2	46,4	44,9	20,5	22,6	22,3	21,9	20,5
29/11	45,6	45,3	45,0	45,6	43,7	18,6	20,7	20,2	20,1	18,6
30/11	39,4	39,3	38,4	39,4	37,6	18,7	20,9	20,3	20,1	18,7
01/12	31,0	31,0	30,0	30,0	28,6	16,9	19,3	18,4	18,4	16,9
02/12	40,2	40,2	39,6	39,8	38,1	16,0	18,4	17,4	17,5	16,0
03/12	49,2	48,3	49,0	49,2	47,6	19,6	21,9	20,9	21,1	19,6
04/12	34,1	34,1	33,0	33,6	32,0	19,7	21,9	21,2	21,2	19,7
05/12	29,7	29,7	28,8	29,3	27,6	17,8	19,8	19,4	19,2	17,8
06/12	40,7	40,7	40,4	40,3	38,6	16,7	19,1	18,3	18,1	16,7
07/12	47,7	46,6	47,7	47,4	45,7	16,2	18,4	17,8	17,6	16,2
MÁX	49,2	48,3	49,0	49,2	47,6	21,6	24,0	23,0	27,4	21,6
MÍN	29,7	29,7	28,8	29,3	27,6	16,0	18,4	17,2	17,5	16,0
MÉD	41,1	40,8	40,3	40,8	39,1	18,4	20,7	19,9	20,4	18,4
DES PAD	6,0	5,8	6,3	6,2	6,2	1,7	1,7	1,7	2,3	1,7
CV(%)	14,7	14,2	15,7	15,3	15,8	9,2	8,1	8,6	11,2	9,2

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.7 Temperaturas de Verão no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m (Seção A)

Data	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
22/12/00	44,7	44,1	41,8	44,7	20,5	21,3	20,5	20,7
23/12/00	48,3	47,7	45,9	48,3	22,0	22,6	22,0	22,1
24/12/00	46,9	46,3	44,6	46,9	22,8	23,2	22,8	22,8
25/12/00	40,3	39,9	38,0	40,3	20,3	20,8	20,4	20,3
26/12/00	38,9	38,3	36,7	38,9	21,5	22,0	21,5	21,7
27/12/00	44,4	43,7	41,8	44,4	21,0	21,8	21,0	21,1
28/12/00	38,9	38,8	36,6	38,9	21,8	22,4	21,8	21,8
29/12/00	42,1	41,8	40,3	42,1	22,5	23,1	22,5	22,8
30/12/00	39,2	38,5	36,8	39,2	21,5	22,0	21,5	21,5
31/12/00	27,1	27,1	26,0	26,8	20,5	21,0	20,5	20,5
01/01/01	39,7	39,6	38,3	39,7	19,7	20,2	19,7	19,7
02/01/01	41,9	41,9	39,9	41,7	19,2	19,8	19,2	19,2
03/01/01	43,0	42,9	41,2	43,0	21,6	22,2	21,6	21,7
MÁX	48,3	47,7	45,9	48,3	22,8	23,2	22,8	22,8
MÍN	27,1	27,1	26,0	26,8	19,2	19,8	19,2	19,2
MÉD	41,2	40,8	39,1	41,1	21,1	21,7	21,2	21,2
DESV PAD	5,2	5,1	4,9	5,3	1,1	1,1	1,1	1,1
CV (%)	12,7	12,4	12,5	12,8	5,0	4,8	5,0	5,2

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.8 Temperaturas de Verão no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m (Seção B)

Data	Temperaturas Máximas (°C)					Temperaturas Mínimas (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B. Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B. Tran
04/01/01	44,2	44,2	44,2	44,2	S.L	23,3	23,9	23,3	23,3	S.L
05/01/01	47,7	47,0	47,5	47,7	S.L	20,6	21,3	20,6	20,6	S.L
MÁX	47,7	47,0	47,5	47,7	-	23,3	23,9	23,3	23,3	-
MÍN	44,2	44,2	44,2	44,2	-	20,6	21,3	20,6	20,6	-
MÉD	46,0	45,6	45,9	46,0	-	22,0	22,6	22,0	22,0	-
DES PAD	2,5	2,0	2,3	2,5	-	1,9	1,8	1,9	1,9	-
CV(%)	5,4	4,3	5,1	5,4	-	8,7	8,1	8,7	8,7	-

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum,
S.L = Sem Leituras.

Os dados constantes nas tabelas anteriores foram extraídos das planilhas diárias onde todo um tratamento estatístico foi efetuado, conforme indicado no Anexo F.

3.2 Gradientes Térmicos

Nas Tabelas 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.14, 3.15 e 3.16 são apresentados resumos dos valores de gradientes térmicos obtidos através da instrumentação da pista experimental nas diferentes estações climáticas do ano.

Tabela 3.9 Gradientes de Outono no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A

Data	Gradientes Máximos (°C)				Gradientes Mínimos (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
31/05	5,8	1,8	5,8	3,2	-1,4	0,1	-0,2	-1,4
01/06	1,5	1,5	1,1	0,1	-2,9	0,0	-0,6	-2,9
02/06	6,3	4,7	6,3	4,7	-1,6	0,0	-0,4	-1,6
03/06	7,0	7,0	6,6	5,9	-1,7	-0,2	-0,4	-1,7
04/06	7,3	7,1	7,3	6,1	-1,6	-0,3	-0,6	-1,6
05/06	7,3	7,3	7,1	6,3	-1,7	-0,3	-0,6	-1,7
06/06	7,4	7,4	7,0	6,3	-1,6	-0,2	-0,6	-1,6
07/06	8,4	8,4	8,0	7,2	-1,6	-0,3	-0,6	-1,6
15/06	7,8	7,8	7,5	6,6	-1,4	-0,1	-0,4	-1,4
16/06	7,5	7,5	7,0	6,1	-1,6	-0,2	-0,5	-1,6
17/06	8,0	8,0	7,6	6,5	-1,3	0,1	-0,4	-1,3
18/06	6,5	6,5	6,5	5,4	-1,4	0,0	-0,4	-1,4
19/06	5,0	4,2	5,0	3,1	-1,2	0,2	0,2	-1,2
20/06	5,2	4,6	5,2	4,2	-1,4	0,0	-0,5	-1,4
21/06	4,9	2,4	4,9	4,6	-1,9	-0,5	1,0	-1,9
MÁX	8,4	8,4	8,0	7,2	-1,2	0,2	0,2	-1,2
MÍN	1,5	1,5	1,1	0,1	-2,9	-0,5	-1,0	-2,9
MÉD	6,4	5,7	6,2	5,1	-1,6	-0,1	-0,5	-1,6
DES PAD	1,7	2,4	1,7	1,9	0,4	0,2	0,3	0,4
CV(%)	27,3	41,1	27,5	36,4	-24,5	-169,6	-54,7	-24,5

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.10 Gradientes de Outono no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B

Data	Gradientes Máximos (°C)					Gradientes Mínimos (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B. Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B. Tran
20/05	3,8	3,3	3,5	3,8	S.L	-2,0	-2,0	-0,5	-1,0	S.L
21/05	7,3	6,4	4,3	7,3	S.L	-2,0	-2,0	-0,6	-1,2	S.L
22/05	8,6	7,3	6,1	8,6	S.L	-2,1	-2,1	-0,7	-1,1	S.L
23/05	7,5	6,3	4,7	7,5	S.L	-2,0	-2,0	-0,5	-1,0	S.L
24/05	7,6	6,6	4,2	7,6	1,6	-3,1	-2,0	-0,5	-1,0	-3,1
25/05	8,0	7,0	3,9	8,0	5,8	-3,0	-1,9	-0,4	-0,8	-3,0
26/05	8,1	6,8	4,7	8,1	5,8	-3,0	-1,8	-0,4	-0,8	-3,0
27/05	2,4	1,1	2,4	2,2	-0,1	-2,9	-1,7	-0,3	-0,7	-2,9
28/05	8,9	7,6	3,7	8,9	6,7	-3,7	-2,6	-1,0	-1,5	-3,7
29/05	8,5	7,1	4,3	8,5	6,2	-3,7	-2,6	-1,1	-1,5	-3,7
08/06	8,4	7,5	4,8	8,4	6,1	-3,1	-1,8	-0,2	-0,7	-3,1
09/06	7,5	6,3	4,4	7,5	5,2	-3,0	-1,8	-0,2	-0,7	-3,0
10/06	5,4	4,2	4,5	5,4	3,1	-2,9	-1,9	-0,1	-0,6	-2,9
11/06	7,4	6,6	3,9	7,4	5,2	-2,9	-1,8	-0,1	-0,6	-2,9
12/06	6,9	5,9	3,1	6,9	4,6	-2,8	-1,7	-0,1	-0,6	-2,8
13/06	7,4	6,5	4,2	7,4	5,1	-3,1	-1,8	-0,2	-0,6	-3,1
MÁX	8,9	7,6	6,1	8,9	6,7	-2,0	-1,7	-0,1	-0,6	-2,8
MÍN	2,4	1,1	2,4	2,2	-0,1	-3,7	-2,6	-1,1	-1,5	-3,7
MÉD	7,1	6,0	4,2	7,1	4,6	-2,8	-2,0	-0,4	-0,9	-3,1
DES PAD	1,8	1,7	0,8	1,8	2,0	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3

CV(%)	25,1	28,7	19,6	25,6	44,4	-19,2	-13,9	-72,6	-34,0	-9,6
--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.11 Gradientes de Inverno no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A

Data	Gradientes Máximos (°C)				Gradientes Mínimos (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min.	B. Long	Canto	Centro
22/06	7,7	7,7	7,3	6,4	-1,9	-0,6	-1,1	-1,9
23/06	8,5	8,5	8,0	7,0	-2,0	-0,7	-1,2	-2,0
24/06	9,2	9,2	8,4	7,5	-1,7	-0,3	-0,8	-1,7
25/06	8,9	8,9	7,9	6,7	-1,1	0,3	-0,2	-1,1
26/06	7,2	7,2	6,3	5,2	-1,2	0,2	-0,2	-1,2
27/06	5,4	5,4	4,9	4,4	-1,0	0,3	0,0	-1,0
28/06	7,8	7,8	7,5	6,6	-1,3	0,0	-0,4	-1,3
29/06	5,8	5,8	5,3	4,3	-1,4	0,0	-0,4	-1,4
30/06	2,7	2,7	2,7	1,5	-1,4	-0,2	-0,5	-1,4
01/07	8,1	8,1	7,5	6,7	-1,6	-0,3	-0,8	-1,6
02/07	8,8	8,8	8,5	7,8	-1,6	-0,3	-0,6	-1,6
03/07	2,6	2,6	2,3	1,5	-1,1	0,1	-0,1	-1,1
12/07	4,0	4,0	3,6	3,3	-1,3	-0,2	-0,3	-1,3
13/07	5,0	3,4	5,0	4,4	-1,6	-0,5	-0,7	-1,6
14/07	2,2	2,2	1,8	1,1	-1,9	-0,7	-0,8	-1,9
15/07	7,0	7,0	5,7	6,0	-1,1	0,1	-0,1	-1,1
16/07	7,4	7,4	6,7	6,8	-2,3	-1,1	-1,5	-2,3
17/07	7,8	7,8	7,5	7,3	-2,4	-1,2	-1,6	-2,4
26/07	2,9	2,9	2,7	1,8	-1,0	0,1	0,0	-1,0
27/07	4,1	4,0	4,1	3,5	-1,3	-0,2	-0,2	-1,3
28/07	8,9	8,9	8,1	7,7	-1,8	-0,4	-0,7	-1,8
29/07	9,2	9,2	8,5	8,1	-1,8	-0,6	-0,7	-1,8
30/07	9,7	9,7	8,9	8,5	-1,7	-0,6	-0,7	-1,7
31/07	8,7	8,7	7,8	7,2	-1,5	-0,4	-0,5	-1,5
06/08	7,5	7,5	6,8	6,1	-1,6	-0,2	-0,7	-1,6
07/08	9,0	9,0	7,7	7,7	-1,4	0,1	-0,3	-1,4
08/08	9,8	9,8	8,8	8,4	-1,7	-0,2	-0,5	-1,7
09/08	9,9	9,9	8,9	8,4	-1,8	-0,3	-0,6	-1,8

10/08	1,5	1,5	1,2	0,4	-1,9	-0,4	-0,8	-1,9
11/08	2,1	2,1	1,6	0,8	-1,9	-0,4	-0,8	-1,9
12/08	3,8	3,8	3,2	2,8	-2,1	-0,9	-1,2	-2,1
13/08	10,4	10,4	9,4	9,1	-1,7	-0,5	-0,7	-1,7
14/08	10,2	10,2	9,1	8,5	-1,8	-0,5	-0,8	-1,8
30/08	9,5	9,5	8,8	8,3	-2,1	-1,1	-0,9	-2,1
31/08	2,8	2,8	2,5	1,7	-1,8	-0,7	-0,6	-1,8
01/09	6,8	6,8	6,3	5,8	-2,6	-1,5	-1,2	-2,6
02/09	1,2	1,1	1,2	0,1	-1,5	-0,5	-0,3	-1,5
03/09	1,6	1,4	1,6	0,6	-1,1	-0,2	0,0	-1,1
04/09	3,5	3,5	3,2	2,4	-1,1	-0,1	0,0	-1,1
05/09	9,4	9,4	9,1	8,5	-1,6	-0,7	-0,4	-1,6
14/09	8,2	8,2	7,2	7,5	-1,3	-0,4	-0,3	-1,3
15/09	9,4	9,4	8,4	8,4	-2,8	-1,8	-1,7	-2,8
16/09	1,6	1,6	1,5	0,9	-1,7	-0,8	-0,7	-1,7
17/09	2,3	2,3	2,3	1,5	-1,9	-0,9	-0,8	-1,9
18/09	10,1	10,1	9,2	8,5	-1,8	-0,9	-0,8	-1,8
19/09	8,8	8,8	8,2	7,6	-1,5	-0,5	-0,5	-1,5
20/09	10,9	10,9	9,9	9,9	-2,1	-1,2	-0,9	-2,1
21/09	10,6	10,6	9,7	9,7	-2,2	-1,2	-0,9	-2,2
MÁX	10,9	10,9	9,9	9,9	-1,0	0,3	0,0	-1,0
MÍN	1,2	1,1	1,2	0,1	-2,8	-1,8	-1,7	-2,8
MÉD	6,7	6,6	6,1	5,5	-1,7	-0,5	-0,6	-1,7
DESV PAD	3,1	3,1	2,8	3,0	0,4	0,5	0,4	0,4
CV (%)	46,1	47,0	46,1	53,9	-24,8	-97,4	-64,5	-24,8

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.12 Gradientes de Inverno no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B

Data	Gradientes Máximos (°C)					Gradientes Mínimos (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B.Tran
05/07	6,6	4,8	4,1	6,6	3,8	-2,7	-1,1	0,2	-0,2	-2,7
06/07	8,4	7,5	4,9	8,4	6,0	-3,1	-1,8	-0,1	-0,7	-3,1
07/07	8,3	7,5	4,6	8,3	5,8	-3,3	-2,1	-0,3	-0,8	-3,3
08/07	8,9	7,9	4,4	8,9	6,5	-3,2	-1,9	-0,3	-0,9	-3,2
09/07	8,8	7,7	5,1	8,8	6,4	-3,0	-1,8	-0,1	-0,6	-3,0
10/07	8,4	7,3	5,6	8,4	6,1	-2,8	-1,7	0,1	-0,5	-2,8
20/07	8,2	7,3	5,2	8,2	6,0	-3,6	-2,6	-0,8	-1,4	-3,6
21/07	8,6	7,8	6,6	8,6	6,4	-3,6	-2,5	-0,9	-1,3	-3,6
22/07	4,5	3,8	4,5	4,5	2,5	-2,6	-1,3	0,2	-0,4	-2,6
23/07	2,0	0,7	2,0	1,6	-0,4	-2,8	-1,7	-0,1	-0,8	-2,8
24/07	7,5	6,4	6,1	7,5	5,3	-3,4	-2,4	-0,7	-1,3	-3,4
02/08	6,6	5,5	6,6	6,5	4,3	-2,7	-1,8	-0,1	-0,5	-2,7
03/08	3,1	1,9	3,1	2,9	0,7	-2,8	-1,6	-0,1	-0,6	-2,8
04/08	1,8	0,5	1,8	1,5	-0,7	-3,1	-2,5	-0,5	-0,9	-3,1
16/08	1,6	0,8	1,6	1,2	-0,8	-2,5	-1,2	-0,2	-0,6	-2,5
17/08	8,1	7,6	7,9	8,1	6,1	-3,1	-1,5	-0,5	-1,0	-3,1
18/08	9,5	8,8	9,2	9,5	7,4	-2,8	-1,4	-0,5	-0,9	-2,8
19/08	9,5	8,6	9,5	9,4	7,2	-3,3	-1,9	-1,0	-1,4	-3,3
20/08	10,3	9,4	10,3	10,2	8,0	-2,9	-1,5	-0,6	-0,9	-2,9
21/08	10,4	9,0	10,4	10,1	8,1	-3,0	-1,7	-0,8	-1,1	-3,0
22/08	10,4	9,3	10,4	10,1	8,0	-3,0	-1,8	-0,8	-1,2	-3,0
23/08	9,8	8,9	9,7	9,8	7,7	-3,0	-1,7	-0,8	-1,2	-3,0
24/08	10,2	9,1	10,2	9,6	7,5	-3,1	-1,7	-0,9	-1,2	-3,1
25/08	10,7	9,7	10,7	9,4	7,4	-3,0	-1,6	-0,8	-1,1	-3,0
26/08	9,3	8,7	9,3	8,9	6,8	-3,5	-2,2	-1,4	-1,8	-3,5
27/08	4,6	4,0	4,6	4,5	2,6	-4,9	-3,8	-2,6	-3,1	-4,9
28/08	0,7	-0,3	0,7	0,4	-1,5	-3,1	-1,8	-0,7	-1,3	-3,1
07/09	9,0	8,0	8,4	9,0	6,8	-3,4	-1,8	-1,2	-1,2	-3,4
08/09	10,4	9,4	10,3	10,4	8,3	-3,3	-1,7	-1,0	-1,0	-3,3
09/09	10,6	9,5	10,2	10,6	8,4	-3,3	-1,6	-1,1	-1,1	-3,3

10/09	10,6	9,8	10,6	10,6	8,5	-3,1	-1,5	-0,9	-0,9	-3,1
11/09	10,2	9,4	10,0	10,2	8,1	-3,0	-1,7	-0,8	-0,9	-3,0
12/09	3,6	2,9	3,6	3,6	1,5	-4,0	-2,7	-1,6	-1,9	-4,0
MÁX	10,7	9,8	10,7	10,6	8,5	-2,5	-1,1	0,2	-0,2	-2,5
MÍN	0,7	-0,3	0,7	0,4	-1,5	-4,9	-3,8	-2,6	-3,1	-4,9
MÉD	7,6	6,6	6,7	7,5	5,3	-3,2	-1,9	-0,7	-1,1	-3,2
DES PAD	3,1	3,1	3,2	3,1	3,1	0,4	0,5	0,6	0,5	0,4
CV(%)	40,3	46,7	47,0	41,4	57,7	-14,1	-27,8	-86,6	-49,8	-14,1

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.13 Gradientes de Primavera no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A

Data	Gradientes Máximos (°C)				Gradientes Mínimos (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min.	B. Long	Canto	Centro
06/10	6,7	6,7	5,9	4,7	-2,1	-0,8	-0,9	-2,1
07/10	11,4	11,4	10,5	8,9	-2,9	-1,7	-1,6	-2,9
08/10	10,7	10,7	9,8	6,9	-2,8	-1,5	-1,5	-2,8
09/10	9,3	9,3	8,7	7,2	-2,2	-1,0	-1,0	-2,2
07/11	3,1	3,1	2,8	2,2	-2,5	-1,5	-1,3	-2,5
08/11	11,3	11,3	10,5	10,3	-3,6	-2,4	-2,2	-3,6
09/11	10,6	10,6	9,7	9,4	-3,3	-2,1	-1,9	-3,3
10/11	5,1	5,1	4,3	4,0	-2,4	-1,6	-1,3	-2,4
11/11	10,2	10,2	9,6	9,3	-2,7	-1,5	-1,3	-2,7
12/11	9,9	9,9	9,6	9,1	-2,2	-1,2	-1,1	-2,2
13/11	8,2	8,2	7,5	7,4	-3,9	-2,8	-2,6	-3,9
14/11	0,4	0,4	0,4	-0,5	-3,0	-1,9	-1,7	-3,0
15/11	9,2	9,2	8,6	8,7	-2,8	-1,8	-1,5	-2,8
16/11	7,3	7,3	6,8	6,2	-2,8	-1,7	-1,4	-2,8
17/11	9,4	9,4	9,2	8,7	-2,3	-1,3	-1,1	-2,3
18/11	1,0	1,0	1,0	0,1	-4,2	-3,4	-3,1	-4,2
19/11	9,2	9,2	8,4	8,4	-1,7	-0,8	-0,5	-1,7
20/11	11,2	11,2	10,8	10,5	-2,4	-1,4	-1,2	-2,4
21/11	9,5	9,2	9,5	9,4	-5,4	-3,8	-3,7	-5,4
22/11	10,5	10,5	9,8	10,0	-2,2	-1,3	-0,9	-2,2
23/11	9,6	9,5	9,6	8,9	-2,5	-1,5	-1,2	-2,5
24/11	10,1	10,1	9,9	9,9	-8,9	-7,2	-6,8	-8,9
25/11	5,4	5,4	4,9	4,7	-4,4	-2,8	-2,4	-4,0
09/12	10,9	10,9	10,6	10,6	-4,6	-4,0	-3,1	-4,6
10/12	6,3	6,3	6,0	6,2	-6,6	-5,5	-5,1	-6,6
11/12	9,8	9,8	9,6	9,4	-2,7	-1,7	-1,5	-2,7
12/12	11,1	11,1	10,9	10,8	-2,1	-1,5	-1,2	-2,1
13/12	8,6	8,6	8,5	8,3	-7,1	-6,3	-5,6	-7,1
14/12	8,8	8,8	7,9	8,4	-2,8	-2,1	-1,8	-2,8
15/12	6,2	6,2	5,9	5,7	-4,2	-3,3	-3,0	-4,2
16/12	7,3	7,3	6,6	7,2	-2,5	-1,6	-1,4	-2,5
17/12	3,7	3,7	3,6	3,3	-2,3	-1,5	-1,3	-2,3
18/12	3,4	3,4	3,4	3,2	-1,5	-0,9	-0,6	-1,5

19/12	8,0	8,0	7,7	7,6	-2,0	-1,3	-1,0	-2,0
20/12	10,7	10,7	10,3	10,1	-1,9	-1,3	-0,9	-1,9
21/12	9,6	9,6	9,2	9,1	-5,9	-5,0	-4,2	-5,9
MÁX	11,4	11,4	10,9	10,8	-1,5	-0,8	-0,5	-1,5
MÍN	0,4	0,4	0,4	-0,5	-8,9	-7,2	-6,8	-8,9
MÉD	8,2	8,1	7,7	7,3	-3,3	-2,3	-2,0	-3,3
DESV PAD	2,9	2,9	2,8	2,9	1,7	1,6	1,5	1,7
CV (%)	36,1	36,0	36,7	40,0	-50,0	-68,0	-72,0	-50,0

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.14 Gradientes de Primavera no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B

Data	Gradientes Máximos (°C)					Gradientes Mínimos (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B. Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B. Tran
10/10	9,3	8,2	9,3	8,9	7,1	-8,1	-6,6	-5,4	-6,3	-8,1
11/10	9,7	8,8	9,5	9,7	7,5	-3,6	-2,4	-1,4	-1,9	-3,6
12/10	10,7	10,0	9,8	10,7	8,6	-3,8	-2,8	-1,7	-2,0	-3,8
29/10	6,2	5,0	5,7	6,2	4,0	-3,3	-2,2	-1,1	-1,5	-3,3
30/10	11,4	10,2	11,4	11,3	9,1	-4,2	-2,9	-1,9	-2,6	-4,2
31/10	10,3	9,1	10,1	10,3	8,2	-4,4	-3,0	-2,0	-2,6	-4,4
01/11	11,5	10,1	11,5	11,2	9,2	-4,2	-3,0	-1,9	-2,5	-4,2
02/11	11,5	10,6	11,3	11,5	9,5	-4,0	-2,7	-1,8	-2,3	-4,0
03/11	6,2	5,0	5,7	6,2	4,1	-3,7	-2,5	-1,5	-1,9	-3,7
04/11	10,1	9,0	9,8	10,1	7,9	-3,7	-2,4	-1,5	-1,9	-3,7
05/11	9,6	8,5	9,1	9,6	7,7	-3,3	-2,1	-1,1	-1,5	-3,3
28/11	12,0	10,8	12,0	11,5	9,6	-8,7	-7,2	-5,8	-7,0	-8,7
29/11	10,5	10,1	10,4	10,5	8,4	-7,7	-6,4	-4,9	-6,0	-7,7
30/11	9,8	8,9	9,7	9,8	7,7	-7,7	-6,1	-4,5	-6,4	-7,7
01/12	6,5	5,3	6,5	5,7	3,8	-3,6	-2,3	-1,1	-1,7	-3,6
02/12	9,9	8,6	9,9	9,4	7,3	-3,4	-2,0	-0,8	-1,4	-3,4
03/12	12,7	11,6	12,7	12,3	10,3	-3,9	-2,5	-1,3	-2,1	-3,9
04/12	7,4	6,5	7,4	7,1	5,1	-5,0	-3,8	-2,4	-3,2	-5,0
05/12	5,3	4,2	5,3	4,7	2,9	-3,3	-2,1	-0,7	-1,4	-3,3
09/01	9,5	8,5	9,5	9,3	7,3	-4,1	-2,7	-1,5	-2,1	-4,1
07/12	12,3	11,2	12,3	11,8	9,9	-4,3	-3,1	-1,8	-2,7	-4,3
MÁX	12,7	11,6	12,7	12,3	10,3	-3,3	-2,0	-0,7	-1,4	-3,3
MÍN	5,3	4,2	5,3	4,7	2,9	-8,7	-7,2	-5,8	-7,0	-8,7
MÉD	9,6	8,6	9,5	9,4	7,4	-4,7	-3,4	-2,2	-2,9	-4,7
DESV PAD	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	1,7	1,7	1,5	1,8	1,7
CV(%)	22,3	25,4	23,2	23,3	29,4	-37,3	-49,1	-70,1	-62,5	-37,3

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.15 Gradientes de Verão no WTUD – Placas de 0,6 x 0,6 m – Seção A

Data	Gradientes Máximos (°C)				Gradientes Mínimos (°C)			
	Máx. Max	B. Long	Canto	Centro	Mín. Min	B. Long	Canto	Centro
22/12/00	10,0	10,0	9,1	9,7	-1,9	-1,2	-0,9	-1,9
23/12/00	11,7	11,7	11,0	11,3	-2,0	-1,3	-0,9	-2,0
24/12/00	10,5	10,5	10,2	10,1	-7,4	-5,9	-5,3	-7,4
25/12/00	7,6	7,6	7,0	7,2	-2,7	-2,0	-1,7	-2,7
26/12/00	9,8	9,8	8,7	9,4	-2,8	-1,9	-1,6	-2,8
27/12/00	11,3	11,3	10,3	10,9	-2,1	-1,4	-1,0	-2,1
28/12/00	7,8	7,8	7,1	7,4	-3,6	-2,7	-2,4	-3,6

29/12/00	7,9	7,9	7,5	7,3	-1,9	-1,2	-0,9	-1,9
30/12/00	8,2	8,2	7,7	8,0	-3,6	-2,8	-2,7	-3,6
31/12/00	2,4	2,4	2,4	2,0	-2,2	-1,6	-1,4	-2,2
01/01/01	8,9	8,9	8,3	8,6	-2,3	-1,5	-1,3	-2,3
02/01/01	8,7	8,7	8,2	8,1	-2,6	-1,8	-1,4	-2,6
03/01/01	9,5	9,5	8,9	8,9	-2,5	-1,7	-1,4	-2,5
MÁX	11,7	11,7	11,0	11,3	-1,9	-1,2	-0,9	-1,9
MÍN	2,4	2,4	2,4	2,0	-7,4	-5,9	-5,3	-7,4
MÉD	8,8	8,8	8,2	8,4	-2,9	-2,1	-1,8	-2,9
DESV PAD	2,3	2,3	2,1	2,3	1,5	1,3	1,2	1,5
CV (%)	26,5	26,5	26,1	27,9	-50,7	-60,5	-68,1	-50,7

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum.

Tabela 3.16 Gradientes de Verão no WTUD – Placas de 1,0 x 1,0 m – Seção B

Data	Gradientes Máximos (°C)					Gradientes Mínimos (°C)				
	Máx. Max	Centro	Canto	Centro	B.Tran	Mín. Min	Centro	Canto	Centro	B.Tran
04/01/01	10,2	9,2	10,2	10,2	S.L	-5,2	-5,2	-3,8	-4,9	S.L
05/01/01	12,0	11,0	12,0	11,9	S.L	-3,4	-3,4	-2,2	-2,7	S.L
MÁX	12,0	11,0	12,0	11,9	-	-3,4	-3,4	-2,2	-2,7	-
MÍN	10,2	9,2	10,2	10,2	-	-5,2	-5,2	-3,8	-4,9	-
MÉD	11,1	10,1	11,1	11,1	-	-4,3	-4,3	-3,0	-3,8	-
DES PAD	1,3	1,3	1,3	1,2	-	1,3	1,3	1,1	1,6	-
CV(%)	11,5	12,6	11,5	10,9	-	-29,6	-29,6	-37,7	-40,9	-

Onde, Máx. Max é o Máximo Maximorum,
Mín. Min é o Mínimo Minimorum,
S.L = Sem Leituras.

3.3 ICP

Para a determinação inicial do Índice de Condição do Pavimento (ICP) foi realizado um levantamento detalhado das condições das placas de WTUD na pista experimental. Cada defeito foi minuciosamente detalhado, tendo suas feições catalogadas e apresentadas no Anexo D.

A determinação do ICP seguiu rigorosamente as determinações constantes em USACE (1979).

As falhas observadas foram oriundas do processo executivo e todas encontravam-se nas placas de 0,6 x 0,6 m. Tal seção apresentou duas placas com fissura por retração térmica e o mesmo número de placas apresentando esborcinamento de canto, também atribuído ao processo executivo, mais precisamente à desforma.

Para a seção A, como as fissuras de retração ocorreram em 5% do número total de placas, o valor a deduzir (VD) é igual a zero. Já as placas (5% do total) que apresentaram esborcinamento de canto, ambos com profundidade superior à 50 mm, conferiram um valor de VD igual a 1 (um), já que sua severidade foi classificada como média, segundo USACE (1979).

Assim, o ICP para a seção A foi de 99 e para a seção B igual a 100, que classificam ambas seções como excelente, conforme Tabela 2.10. Cabe salientar que a condição de juntas sem selagem foi desconsiderada no cálculo deste índice.

3.4 Perfil

Conforme visto anteriormente, o levantamento da irregularidade longitudinal das seções A e B da pista experimental foi realizado com auxílio do *dipstick*. Procurou-se realizar este levantamento

próximo do horário de pico do gradiente térmico pois assim, a medida estaria sendo feita no momento crítico quando o possível empenamento da placa atinge seu valor máximo.

No momento em que a análise estava sendo efetuada, o gradiente térmico médio obtido nas placas, tanto da seção A quanto na B, era de 8,1 °C.

As Figuras 3.1 e 3.2 demonstram o perfil médio, de três passagens, das seções A e B, respectivamente, e servirão para uma futura análise comparativa da evolução desta variável com o decorrer do tempo. Cabe lembrar que a determinação do perfil foi realizada em 5 de agosto de 2000. O perfil da seção A foi obtido de cima para baixo e para a seção B, o sentido de leitura foi invertido. A escala horizontal das duas figuras estão de acordo com as dimensões em planta das placas de cada uma das duas seções de análise.

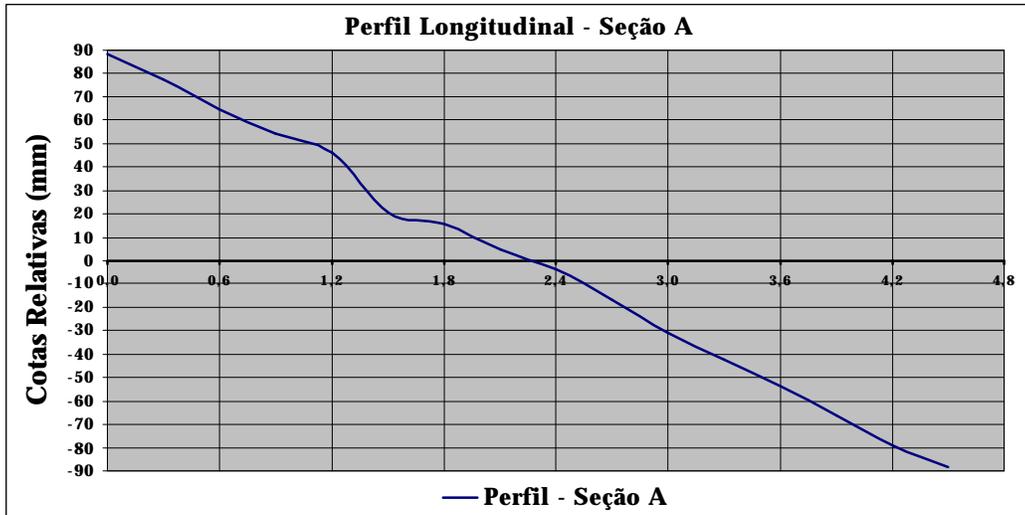


Figura 3.1 Perfil Longitudinal da Seção A

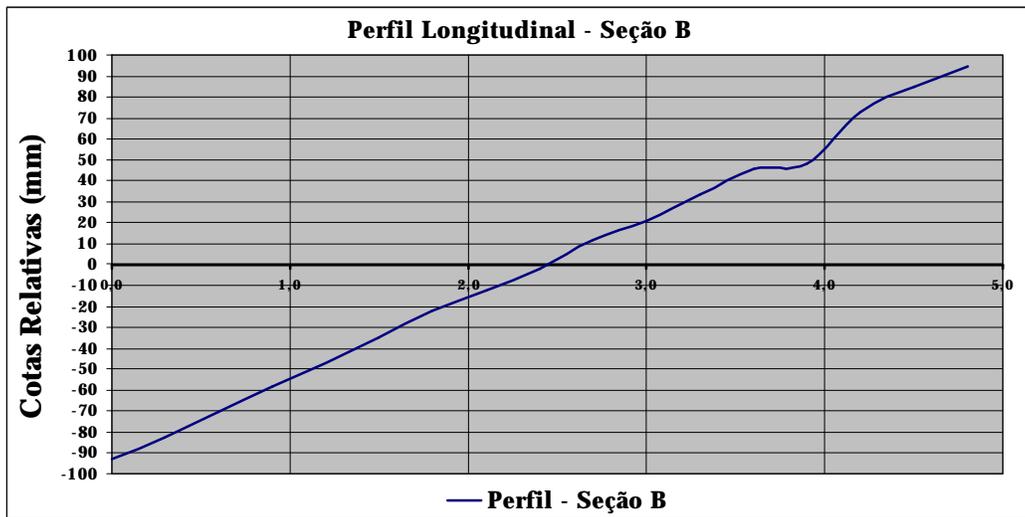


Figura 3.2 Perfil Longitudinal da Seção B

3.5 Provas de Carga

A prova de carga realizada no dia 28 de outubro de 2000, quando uma grande nebulosidade instalou-se em São Paulo, foi muito importante por permitir uma análise, quantitativa e qualitativa dos esforços oriundos do tráfego. Soma-se a este, a experiência adquirida neste tipo de “ensaio” em verdadeira grandeza para os integrantes da equipe.

Contrariando ao previsto inicialmente, foram realizadas provas de carga em um único dia. Aboliu-se um segundo dia de provas de carga porque após a simulação numérica, que objetivava o cálculo das deformações e tensões no local de instalação dos *strain-gages* em cada placa, foram obtidas tensões reduzidíssimas oriundas somente do gradiente térmico. A máxima tensão foi de 2,5 kPa, para um gradiente de 15,0°C, isto para a placa de 1,0 x 1,0 m. Este valor pode ser desconsiderado uma vez que em nada interfere na vida à fadiga do CCP, para as condições encontradas na pista experimental.

Os valores apresentados na Tabela 3.17, foram extraídos das medidas de deformação em campo, transformadas em tensão pelo módulo de elasticidade do CCP empregado nas placas, 38 GPa. Aqueles dados referentes à simulação numérica, constantes na Tabela 3.17, foram ajustados para a posição dos *strain-gages* em perfil porque o programa FEACONS 4.1 SI calcula as tensões no topo e no fundo da placa e, de acordo com a Figura 2.6, os medidores de deformação encontram-se a 20 mm do topo e do fundo das placas de WTUD. Este ajuste deu-se considerando linearidade de deformações causadas ao longo da espessura da placa de concreto de cimento Portland.

Tabela 3.17 Tabela Comparativa entre Tensões Simuladas e Medidas em Campo

Placas	Tensões (MPa) devido ao ESRS				Tensões (MPa) devido ao ESRD			
	TOPO		FUNDO		TOPO		FUNDO	
	Numérico	Campo	Numérico	Campo	Numérico	Campo	Numérico	Campo
A23	-0,72		0,58		-1,18		0,96	1,60
A24	-0,34		0,27	1,10	-0,18		0,15	
A26	-0,64	1,20	0,52	0,90	-0,99	2,30	0,80	1,90

A27	-0,04	0,50	0,03	0,80	-0,09	0,30	0,07	1,50
A28	-0,81	-0,40	0,65		-0,20	0,70	0,16	
A29 (a)	-0,41	1,00	0,33	0,20	0,00	2,40	0,00	0,20
A29 (b)	-0,07		0,06		0,09		-0,07	
A30	-0,19	2,90	0,16	2,50	-0,23	5,00	0,19	3,50
A31	-0,66		0,53	0,60	-0,93		0,75	1,60
A32	-0,70	-0,30	0,57		0,31	-0,20	-0,25	-0,70
A34	-0,77	-0,20	0,72	0,50	0,27	0,20	-0,22	0,00
B02	0,41	0,90	-0,33		-0,10	0,80	0,08	
B03	-0,09	-0,50	0,08	-0,20	-0,06	-0,40	0,05	0,40
B06	-0,55	-0,60	0,44		-0,26	-1,40	0,21	
B07	-0,65	-0,30	0,52	-0,10	-0,40	-0,50	0,32	-0,30
B09	-0,46		0,37		-0,22		0,18	
B11	-0,80		0,65	-2,50	-1,37		1,10	-0,60
B12	0,08	-0,80	0,07	-4,60	-0,69	-0,80	0,56	-0,90
B13	-0,94	-0,50	0,76		-0,64	0,20	0,52	
B14	-1,02		0,83	-0,70	0,00		0,00	0,00
B15	-0,14	-1,90	0,11		-0,20	-0,80	0,16	-5,50

A simulação numérica foi efetuada considerando-se as placas de CCP plenamente aderidas ao CA. As malhas, conforme já descrito, foram discretizadas para cada configuração de eixo, posição do *strain-gage* e posicionamento da carga. A espessura das placas usadas na simulação foi de 95 mm e do CA de 45 mm, ambos valores representativos das condições de campo. O gradiente térmico foi nulo devido a inexistência deste no momento da prova de carga. O módulo de reação do subleito adotado foi de 65 MPa/m, cuja magnitude reflete bem as condições de apoio das placas de WTUD, ainda mais se considerado o subleito laterítico presente no local.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

4.1 Temperaturas

Com base nos resultados obtidos referentes a temperaturas, tornou-se possível uma análise das características de evolução destas durante as 24h do dia, bem como algumas considerações sobre os valores extremos obtidos.

Faz-se necessária, no início deste capítulo, uma observação; todos os horários que forem apresentados ao longo da discussão dos resultados referem-se ao horário solar, facilitando assim a interpretação e a comparação entre o horário de ocorrência de determinados fenômenos, mesmo que acontecidos em períodos do ano em que o horário brasileiro de verão fazia-se vigente. O horário de verão não foi assumido nas leituras.

4.1.1 Temperaturas durante o Outono

A máxima temperatura observada na seção A no período de outono foi de 29,2 °C ocorrida no dia 17 de junho de 2000. Tal temperatura ocorreu às 12h 50min no PT-100 colocado no topo da placa. Em média, as temperaturas máximas registradas no interior do WTUD foram de 25,9 °C nesta estação, nas placas de 0,6 x 0,6 m.

Quanto à variação da temperatura ao longo do dia, notou-se em ambas seções de análise um rápido ganho de temperatura, observado pelo maior coeficiente angular das curvas de temperatura no ramo ascendente, conforme Figura 4.1, quando comparado com o ramo descendente da mesma.

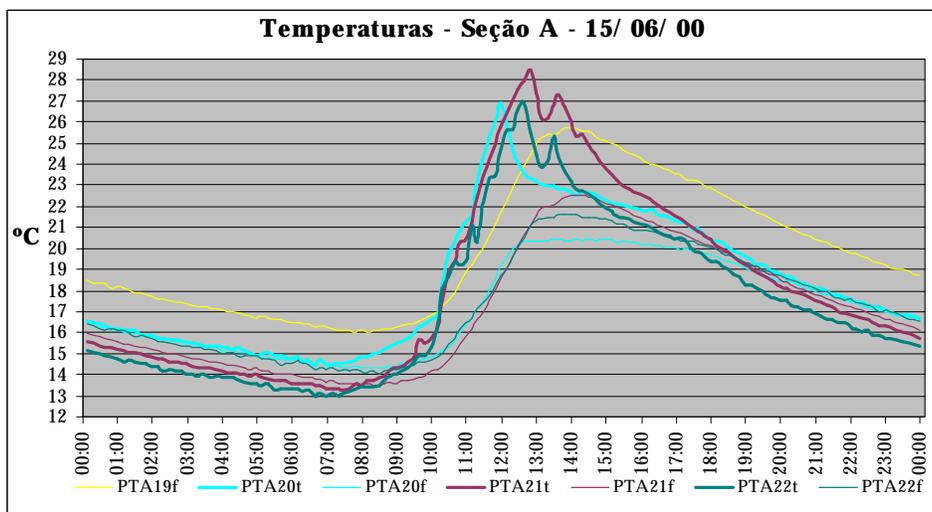


Figura 4.1 Variação Típica da Temperatura no Outono

Percebe-se também que as temperaturas de fundo de placa apresentam um pico mais abaulado proporcionado pelas trocas de calor existente entre o CA e CCP nesta região, evidenciando haver, neste ponto, uma condição de maior conservação de energia conforme esperado.

O valor mínimo encontrado para a temperatura mínima foi de 11,3 °C no dia 21 de junho de 2000, também em um PT-100 de topo, sendo 13,3 °C a média das temperaturas mínimas registradas.

Todas observações realizadas para a seção A são válidas para a seção B, onde a temperatura máxima foi de 32,6 °C ocorrida em 28 de maio de 2000 às 12h 56min, no topo. O valor médio das máximas temperaturas foi de 28,6 °C, superior ao encontrado nas leituras da seção A porém, cabendo ressaltar que as leituras foram extraídas em diferentes semanas, não podendo se atribuir esta diferença ao tamanho das placas. A mínima temperatura ocorreu no dia 29 de maio de 2000 sendo 4,4 °C menor que a média das mínimas temperaturas que foi de 11,5 °C.

4.1.2 Temperaturas durante o Inverno

A menor temperatura registrada na seção A foi de 5,4 °C ocorrida em um dia em que a temperatura máxima no WTUD foi de 22,7 °C. A Figura 4.2 mostra a variação das temperaturas no dia de inverno em que a menor temperatura foi alcançada, sendo este valor igual a 2,8 °C, na placa B9.

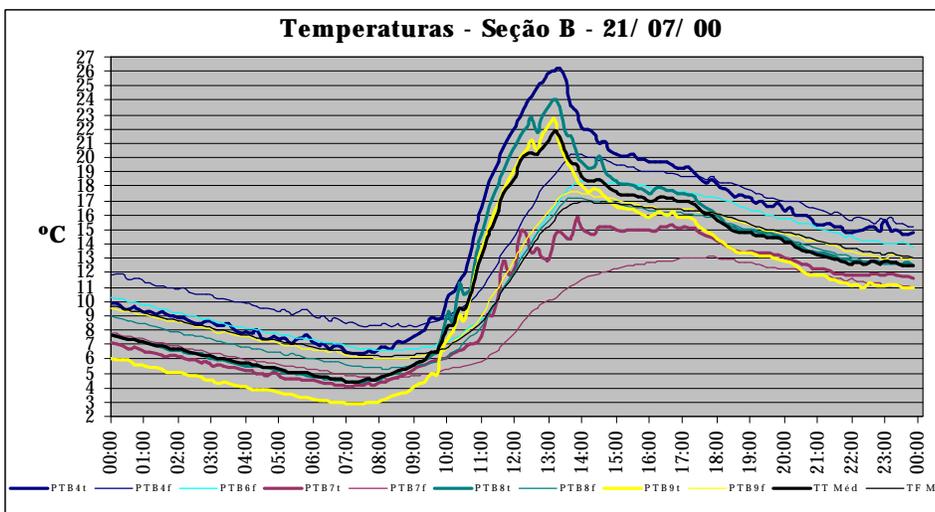


Figura 4.2 Variação Típica da Temperatura em um dia frio de Inverno

Observando-se a Figura 4.2, percebe-se um rápido acréscimo de temperatura até o pico, assim como observado no outono, e um decréscimo de temperatura mais suave. A significativa redução do coeficiente angular do ramo decrescente quando comparado ao da Figura 4.1 foi causado, provavelmente, pelo aumento da temperatura ambiente, não podendo ser esta característica relacionada ao inverno conforme análises efetuadas neste sentido.

4.1.3 Temperaturas durante a Primavera

Nesta estação do ano, a menor temperatura registrada durante os 57 dias de leituras ocorreu em 07 de outubro de 2000, quando o PT-100 de topo da placa A22 registrou 15,9 °C às 5h e 58min. Este valor de temperatura assemelha-se ao menor encontrado nas placas de dimensões em planta de 1,0 x 1,0 m, cujo valor foi de 16,0 °C, no dia 30 do mesmo mês. A média das temperaturas mínimas foi de 19,4 °C e 18,4 °C, para as seções A e B, respectivamente.

Com relação ao máximo valor registrado, este foi de 49,2 °C ocorrido no dia 3 de dezembro de 2000, encontrado no topo da placa B8, às 13h 28min. Este valor supera em 2,2 °C o máximo registrado nas placas da seção A. Nas placas de menores dimensões, a temperatura máxima média foi de 38,3 °C, enquanto na outra seção este valor foi de 41,1 °C. A Figura 4.3 apresenta a evolução das temperaturas de topo e fundo de um dia típico de primavera.

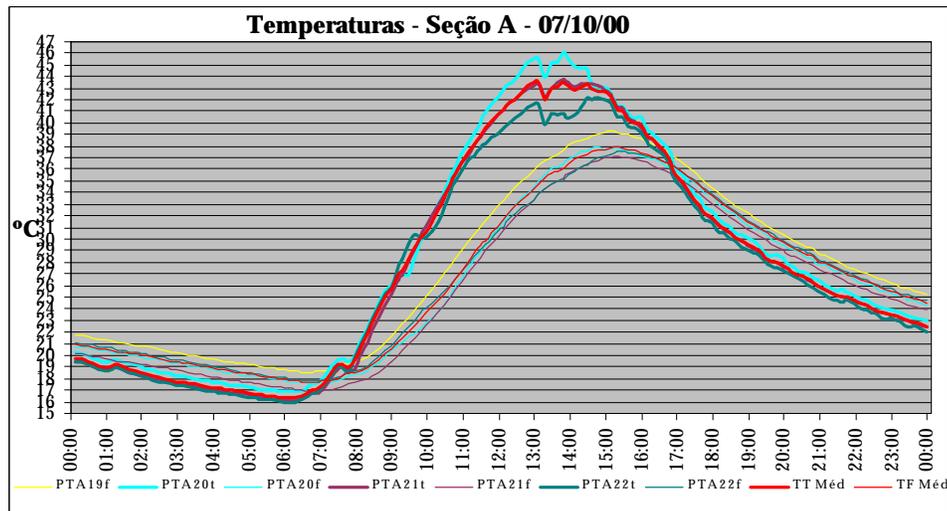


Figura 4.3 Evolução das Temperaturas de Topo e Fundo na Primavera

Percebe-se na Figura 4.3 que a superfície das placas de WTUD passam um maior número de horas com temperatura inferior àquelas encontradas no fundo, quando comparado com o comportamento nos dias de outono e inverno.

Ao contrário do que ocorria nas estações mais frias, ocorreu um considerável aumento nas temperaturas, seja de topo ou de fundo, permanecendo por um maior período de tempo nos valores de pico. Houve uma substancial redução na diferença de curvatura das temperaturas de topo e fundo durante o período em que os maiores valores eram registrados na superfície e na interface CCP/CA.

Por último, torna-se evidente a inexistência de interferência de sombras sobre as placas, fato que colaborou para que as diferentes posições de medidas de temperaturas apresentassem valores idênticos. Portanto, as variações consideráveis de temperatura, para as diferentes placas em um mesmo instante, encontradas no outono e no inverno foram ocasionadas, na íntegra, pelo fator já referido.

4.1.4 Temperaturas durante o Verão

Mesmo com poucos dias amostrados durante esta estação, total de 15 dias, foi possível notar algumas peculiaridades no comportamento destas leituras. A princípio, a temperatura máxima obtida foi de 48,3 °C, no dia 23 de dezembro de 2000 às 13h 56min. Este valor é menor que o máximo encontrado na primavera e deve-se, provavelmente, ao reduzido número de dias amostrados. Com o passar do tempo, nos meses de janeiro e fevereiro, este valor máximo deve aumentar. A média das máximas temperaturas foi de 41,2 °C na seção A e 46 °C na seção B (apenas dois dias de leituras).

Os valores mínimos detectados na monitoração de campo foi de 19,2 °C na seção A, valor consideravelmente superior aos 15,9 °C ocorridos na primavera. A média das temperaturas mínimas foi de 21,1 °C para a mesma seção, também superior ao valor correspondente durante a primavera.

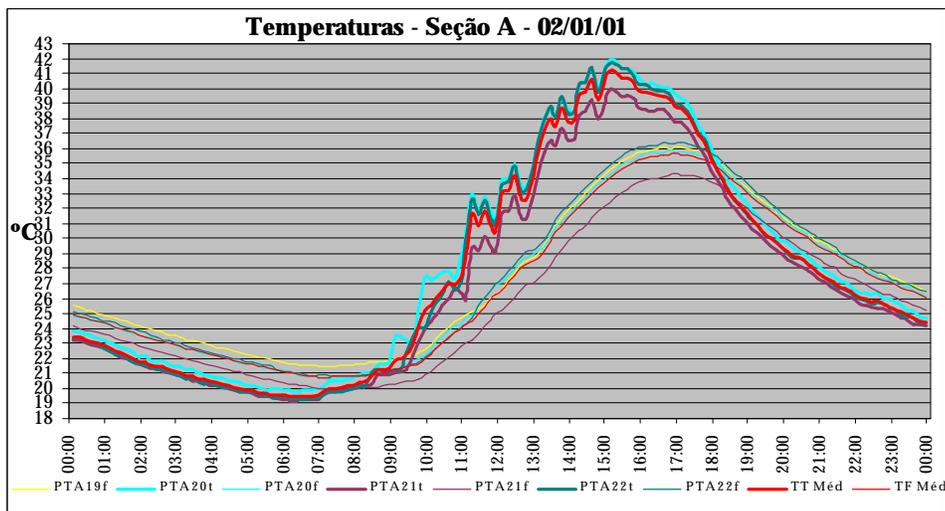


Figura 4.4 Elevação e Decréscimo das Temperaturas durante o Verão

A Figura 4.4 mostra a evolução das temperaturas ao longo de um dia de verão. Neste dia não ocorreu chuva sendo as variações de temperatura no topo no ramo ascendente da curva ocasionada pela presença de nuvens esparsas, comumente presentes nesta estação do ano. Não há grandes diferenças entre o comportamento encontrado no verão e na primavera.

A última figura deixa claro que as rápidas alterações de temperatura ambiente e de irradiação solar são sentidas apenas na superfície do WTUD.

4.2 Gradientes Térmicos

4.2.1 Análise dos Gradientes de Outono

Os gradientes térmicos máximos encontrados na seção cujas placas possuem dimensões de 0,6 x 0,6 m e espessura de 100 mm situaram-se próximo aos 8,5 °C, e ocorreram no dia em que a temperatura máxima registrada no CCP foi de 28,9 °C. Na maioria das vezes observou-se uma variação menor que 1,5 °C entre os gradientes térmicos máximos encontrados nas três posições analisadas. Conforme constatado no levantamento realizado no dia 14 de junho de 2000, já descrito anteriormente, tais diferenças tanto de gradiente térmico como de temperaturas máximas podem ser atribuídas, na íntegra, às sombras.

A placa A20 que alcança suas maiores temperaturas e gradientes antes das demais, por volta das 11h 30min, compensa sua menor temperatura superior por apresentar também uma menor temperatura inferior, uma vez que o pavimento ainda não recebeu o máximo da irradiação solar, fazendo com que o gradiente tenha a mesma ordem de grandeza daqueles encontrados nas outras placas, um pouco mais tarde, quando mais energia foi repassada ao pavimento sob forma de calor, elevando a temperatura no topo e no fundo do WTUD.

As placas A21 e A22, que possuem uma incidência de sol análogas, apresentaram sempre gradientes térmicos máximos coincidindo com as temperaturas máximas nestas placas, que ocorreram sempre próxima à superfície do WTUD, de acordo com o mencionado anteriormente.

Em relação aos gradientes térmicos negativos, o máximo valor absoluto registrado foi de 2,9 °C ocorrido quando a temperatura no topo da placa era de 13,6 °C e no fundo de 16,5 °C.

A Tabela 4.1 revela como foi a distribuição percentual dos diferentes gradientes térmicos ocorridos na seção A da pista experimental nos meses do outono de 2000.

Tabela 4.1 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Outono - Seção A

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -6 e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -3 e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	41,4
Entre 0 e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$	47,8
Entre 3 e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$	8,4
Entre 6 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,4
Maior que $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0

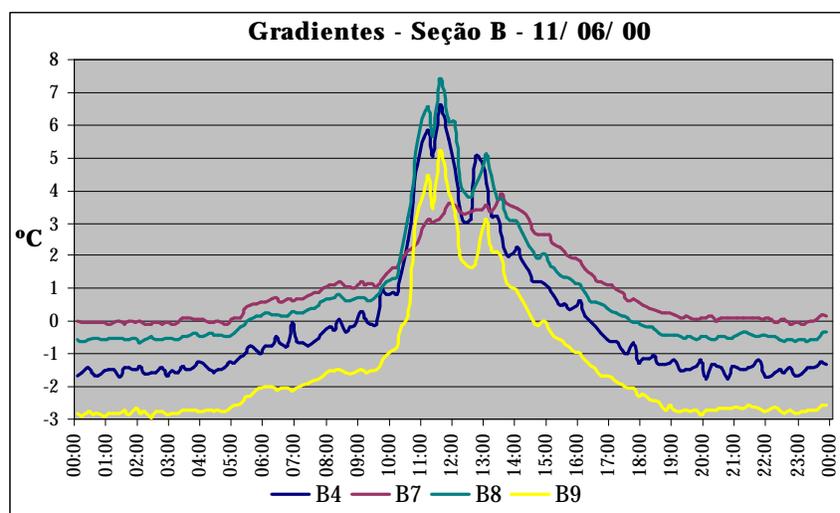
O máximo gradiente térmico encontrado nas placas que possuem 1,0 m de largura no período de outono foi de $8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ no dia 28 de maio de 2000, cuja temperatura máxima registrada nesta placa foi de $28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em relação aos gradientes negativos, o máximo valor absoluto encontrado foi de $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Todas as observações realizadas para as leituras da seção A são válidas para esta seção. Na Tabela 4.2 são apresentadas as frequências de ocorrência de intervalos de gradientes para as placas da seção B. Os valores apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 não podem ser comparados diretamente pois foram originados de leituras realizadas em diferentes dias.

Tabela 4.2 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Outono - Seção B

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0
Entre -6 e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,5
Entre -3 e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	58,8
Entre 0 e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$	30,2
Entre 3 e $6\text{ }^{\circ}\text{C}$	6,0
Entre 6 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,4
Maior que $9\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,0

Percebe-se também que, no outono, há uma grande concentração dos gradientes entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que mais de 80% dos valores de gradiente lidos encontram-se nesta faixa.

**Figura 4.5** Variação Típica do Gradiente Térmico no Outono

Na Figura 4.5 é apresentado o comportamento típico do gradiente térmico observado durante o período de 24h nas seções A e B. Assim como para a temperatura, o ramo ascendente da curva apresenta uma inclinação maior quando comparado com o descendente. Contudo, a diferença de inclinação não é tão discrepante como acontece com a apresentada na Figura 4.1.

Visualiza-se também, na Figura 4.5, o efeito causado pelas sombras no gradiente térmico, conforme comentado no item 2.2.2 deste trabalho.

4.2.2 Análise dos Gradientes de Inverno

O menor gradiente térmico na seção B foi alcançado às 19h 37min, sendo este valor de $-4,9$ °C, quando a temperatura de topo estava em $15,7$ °C e a de fundo em $20,6$ °C, porém durante uma chuva.

Em um dia normal, sem chuva, o menor gradiente térmico nas placas da seção B foi de $-3,6$ °C, quando a temperatura de topo estava em $6,4$ °C e a de fundo em $10,0$ °C, longe dos $4,7$ °C, menor temperatura coletada nesta placa às 7h 20min. Isto sugere que o gradiente térmico depende não somente da temperatura, mas também da irradiação solar e, principalmente, da velocidade com que a temperatura de topo aumenta durante o dia. Para a seção A, o menor gradiente foi de $-2,8$ °C às 19h 29min do dia 15 de setembro de 2000.

No dia em que a menor temperatura foi coletada na seção A, o máximo gradiente térmico foi de $7,8$ °C, diferindo em apenas $2,8$ °C daquele obtido no dia 21 de setembro, o mais quente das leituras de inverno.

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram como foram as frequências de ocorrência das faixas de gradientes térmicos para o inverno, onde percebe-se pouca variação nos valores quando comparados com os obtidos durante o outono.

Tabela 4.3 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Inverno - Seção A

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,0
Entre -6 e -3 °C	0,0
Entre -3 e 0 °C	45,0
Entre 0 e 3 °C	43,4
Entre 3 e 6 °C	6,3
Entre 6 e 9 °C	4,5
Maior que 9 °C	0,9

Tabela 4.4 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Inverno - Seção B

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,0
Entre -6 e -3 °C	2,0
Entre -3 e 0 °C	56,6
Entre 0 e 3 °C	29,4
Entre 3 e 6 °C	5,6
Entre 6 e 9 °C	4,7
Maior que 9 °C	1,7

A Figura 4.6 apresenta as oscilações dos gradientes térmicos durante as 24h de um dia de inverno cuja menor temperatura nas placas de WTUD foi atingida.

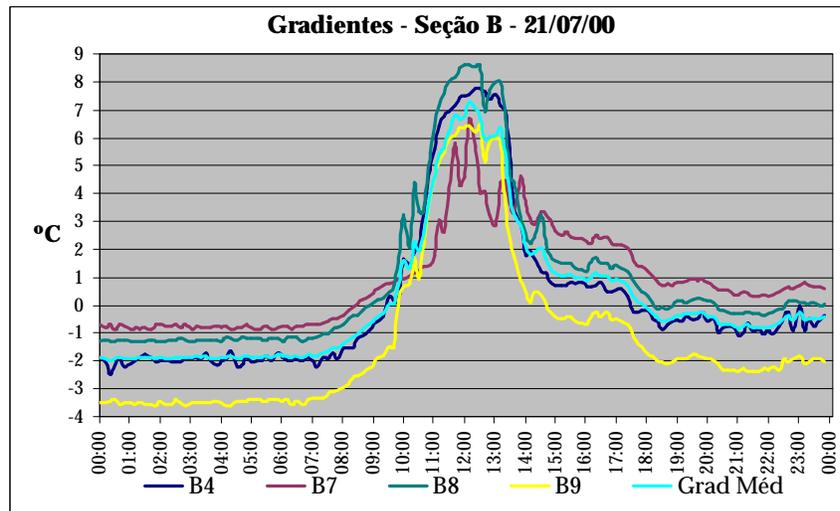


Figura 4.6 Variação do Gradiente Térmico no dia mais frio de Inverno

Observa-se que o gradiente térmico permanece mais tempo com os valores máximos, quando comparados com os obtidos durante o outono, conforme Figura 4.5. As mesmas diferenças entre os gradientes nas placas causados pelas sombras persistiu no período de inverno.

O ramo descendente das curvas de gradientes possuem, na maioria dos casos observados, uma inclinação maior que aquela encontrada no outono, sendo um pouco menor do que o coeficiente linear do ramo ascendente durante o inverno.

4.2.3 Análise dos Gradientes de Primavera

Para a seção A, o maior gradiente encontrado foi de 11,4 °C no dia 7 de outubro de 2000. Este valor foi coletado às 11h 38min, quando a temperatura de topo era de 40,9 °C e a de fundo de 29,5 °C. Este valor foi obtido aproximadamente 2h antes de que a máxima temperatura no WTUD fosse atingida. Quanto ao mínimo valor registrado (-8,9 °C) para esta seção, este foi encontrado no dia 24 de novembro de 2000, quando, próximo ao horário em que a máxima temperatura de fundo era alcançada, uma chuva torrencial de 12 mm acometeu o campus da USP em menos de 90min, conforme dados do CTH.

Já para com placas de 1,0 x 1,0 m, o máximo gradiente coletado foi de 12,7 °C, que coincide com o máximo gradiente observado em todas as estações do ano. Assim como para a seção A, os menores gradientes ocorreram durante chuvas.

Desconsiderando os dias de chuvas, os mínimos gradientes para ambas seções em quase nada diferenciam-se dos mínimos encontrados no inverno.

As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram as frequências média de ocorrência das faixas de gradientes térmicos durante os 57 dias de primavera analisados. Percebe-se uma sensível modificação nas frequências dos maiores e menores gradientes quando comparados com as outras estações; o primeiro devido ao aumento do número de horas do dia em que o gradiente permanece elevado, mesmo tendo valores próximos aos anteriores; o segundo devido ao início do período de chuvas na cidade de São Paulo que contribui para o surgimento de valores muito baixos de gradientes térmicos.

Tabela 4.5 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Primavera - Seção A

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,1
Entre -6 e -3 °C	1,3

Entre -3 e 0 °C	61,8
Entre 0 e 3 °C	19,1
Entre 3 e 6 °C	9,8
Entre 6 e 9 °C	5,8
Maior que 9 °C	2,2

Tabela 4.6 Freqüência de ocorrência dos gradientes térmicos no Primavera - Seção B

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,3
Entre -6 e -3 °C	9,0
Entre -3 e 0 °C	53,8
Entre 0 e 3 °C	18,6
Entre 3 e 6 °C	8,7
Entre 6 e 9 °C	6,1
Maior que 9 °C	3,4

A Figura 4.7 apresenta as oscilações dos gradientes térmicos durante as 24h de um dia de primavera onde pode ser observado o maior tempo em que elevados gradientes térmicos atuam no interior do WTUD.

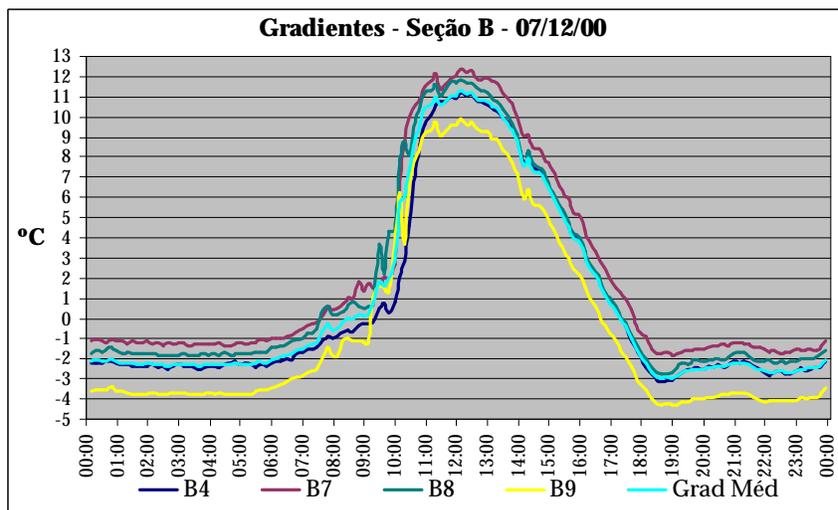


Figura 4.7 Variação do Gradiente Térmico durante a Primavera

A velocidade com que os gradientes térmicos nas placas aumentam é sensivelmente maior que a de declínio destes mesmos valores, fato que foi uma constante em dias sem a presença de chuva nesta estação analisada.

4.2.4 Análise dos Gradientes de Verão

Mesmo com o pequeno número de dias amostrais deste período, algumas observações podem ser pertinentes neste momento. Contudo, maiores informações continuarão sendo coletadas durante esta estação no início do ano de 2001 e deverão ser divulgadas em futuras publicações.

Em dias que não choveram, o gradiente mínimo foi de -3,6 °C. Já o máximo valor obtido foi de 12,0 °C. Estes valores aproximam-se muito daqueles do período de primavera, constatação que pode ser explicada pela proximidade do término da primavera em que tais coletas foram efetuadas.

As Tabelas 4.7 e 4.8 demonstram a ocorrência das diferentes faixas de gradientes térmicos para o início do verão, sendo muito parecidas com os mesmos dados referentes à primavera.

Tabela 4.7 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Princípio do Verão - Seção A

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,0
Entre -6 e -3 °C	0,8
Entre -3 e 0 °C	59,5
Entre 0 e 3 °C	19,9
Entre 3 e 6 °C	10,7
Entre 6 e 9 °C	7,3
Maior que 9 °C	1,6

Tabela 4.8 Frequência de ocorrência dos gradientes térmicos no Princípio do Verão - Seção B

Intervalos de Gradientes Térmicos	%
Menor que -6 °C	0,0
Entre -6 e -3 °C	2,1
Entre -3 e 0 °C	59,4
Entre 0 e 3 °C	10,8
Entre 3 e 6 °C	11,3
Entre 6 e 9 °C	11,2
Maior que 9 °C	5,4

Nenhuma variação significativa foi detectada no comportamento do gradiente térmico ao longo dos dias de verão quando comparados com a evolução destes valores durante a primavera.

4.3 Tipificação de Dados Térmicos nas Placas em Estações Climáticas

Antes de apresentar uma análise fundamentada na escolha de dias seqüenciais que melhor representem cada uma das quatro estações climáticas do ano, uma breve consideração sobre as possíveis diferenças entre as temperaturas em placas de seções distintas, bem como das mais variadas posições de medida, será realizada.

No dia em que o efetuou-se o levantamento com o *dipstick* a fim de determinar possíveis irregularidades longitudinais na pista experimental, verificou-se um gradiente médio nas placas da seção A igual à 8,1 °C, valor rigorosamente igual ao encontrado para as placas da outra seção, medidos aproximadamente 10min após.

Em outra oportunidade, agora próxima do fim da primavera, comutações entre as leituras 0 e 2, objetivando única e exclusivamente a verificação destas possíveis diferenças, foram efetuadas próximo do período de máximo gradiente térmico. A comparação dos dados mostrados na Tabela 4.9 permitiu verificar que a temperatura de topo é sempre a mesma, não dependendo nem da posição (centro, canto ou borda) nem da dimensão da placa; a mesma conclusão é válida para as temperaturas de fundo e gradientes térmicos.

Tabela 4.9 Temperaturas e Gradientes Térmicos nas Seções A e B medidos ao mesmo Tempo

Seção	Temp. Média - Topo (°C)	Temp. Média - Fundo (°C)	Grad. Médio (°C)
A	42,9	32,6	10,5
B	44,9	33,9	11,0

Tal constatação permite, primeiramente, reorganizar os dados referentes às faixas de gradientes térmicos, unindo as freqüências de ocorrência para a seção A com os da seção B, abrangendo, desta forma, um universo de dados mais representativo das estações do ano. A Tabela 4.10 apresenta este reagrupamento, obtido a partir de todos os dias de leituras.

Tabela 4.10 Freqüências de Ocorrência das Faixas de Gradientes Térmicos – Seção A e B –

	Outono	Inverno	Primavera	Verão	Total
Menor que -6 °C	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1
Entre -6 e -3 °C	1,1	0,8	4,1	1,0	1,9
Entre -3 e 0 °C	49,2	49,7	58,9	59,5	53,3
Entre 0 e 3 °C	40,0	37,7	18,9	18,7	30,5
Entre 3 e 6 °C	7,3	6,0	9,4	10,8	7,7
Entre 6 e 9 °C	2,4	4,6	5,9	7,8	5,0
Maior que 9 °C	0,0	1,2	2,6	2,1	1,6
Σ	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Torna-se notória a possibilidade de divisão das estações do ano em dois grandes blocos baseadas nas faixas de ocorrência de gradientes térmicos; o primeiro bloco constituído dos meses de outono e inverno; o segundo dos meses mais quentes, ou seja, primavera e verão.

No caso de necessidade de consideração da distribuição de gradientes térmicos para o dimensionamento estrutural de WTUD na região da grande São Paulo, a Tabela 4.10 seria a mais indicada para este fim.

No que se refere à análise de dias típicos de cada estação do ano, selecionou-se leituras seqüenciais que melhor representassem estas épocas do ano. O critério de seleção fundamentou-se, basicamente, nas máximas temperaturas de topo e fundo, e em suas mínimas temperaturas respectivas. Um breve resumo estatístico dos resultados obtidos desta forma de trabalho dos resultados é apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Temperaturas e Gradientes Térmicos durante Dias Típicos de cada estação

	Máximas Temperaturas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
	outono	inverno	primavera	verão	outono	inverno	primavera	verão
Máximo	29,7	25,4	40,0	48,3	14,3	15,2	20,1	22,8
Mínimo	26,5	17,3	25,2	38,9	10,2	5,4	16,5	20,3
Média	28,0	22,4	33,3	43,1	12,4	11,1	17,9	21,6
Sd	0,9	2,7	6,4	3,6	1,2	3,4	1,5	0,9
	Máximos Gradientes (°C)				Mínimos Gradientes (°C)			
	outono	inverno	primavera	verão	outono	inverno	primavera	verão
Máximo	8,4	7,8	9,4	11,7	-1,3	-1,1	-1,7	-1,9
Mínimo	5,4	2,2	0,4	7,6	-3,1	-2,4	-4,2	-3,6
Média	7,4	5,6	6,1	9,6	-2,1	-1,8	-2,8	-2,4
Sd	0,8	2,2	4,2	1,6	0,8	0,5	0,8	0,6

Onde, Sd é o desvio padrão.

Ao contrário do que ocorria na Tabela 4.10, as máximas temperaturas apresentam valores bem distintos, variando de 25,4 °C para o inverno a 48,3 °C para o verão. O mesmo acontece com as

temperaturas máximas médias para cada estação. Quanto às mínimas temperaturas, há uma maior proximidade das temperaturas mínimas médias para os dois blocos de estações já mencionados.

A média do gradiente térmico positivo durante o dia não apresentou variações representativas durante o outono, inverno e primavera, com valores de 7,4 °C, 5,6 °C e 6,1 °C, respectivamente. O gradiente térmico apresentou altos valores na maior parte do verão, atingindo uma média de 9,6 °C e um máximo valor isolado de 11,7 °C. Valores típicos de gradientes térmicos durante o verão podem também ser encontrados durante a primavera, como mostra a Tabela 4.11 (valor isolado de 9,4 °C durante a primavera). Um típico dia de primavera também pode ser verificado, onde o mínimo valor de gradiente térmico máximo para o dia foi de 0,4 °C; que foi um dia chuvoso de primavera quando a temperatura permaneceu praticamente a mesma durante todo o dia.

Gradientes térmicos negativos (durante a noite) permaneceram praticamente invariáveis durante as estações do ano, como pode ser inferido das médias apresentadas na Tabela 4.11. O mínimo gradiente térmico negativo registrado foi de - 4,2 °C, durante a primavera. Os valores de mínimos gradientes apresentados foram obtidos desconsiderando aqueles gradientes durante as chuvas, que serão abordados separadamente.

Ratifica-se aqui, após estas análises, que os gradientes térmicos positivos e negativos dependem de um maior número de fatores que não somente a temperatura ambiente. Em estudos comparativos com os dados retirados da pista experimental com os oriundos do CTH, também verificou-se a importância da radiação solar, do número de horas de sol, da velocidade de crescimento e decréscimo da temperatura ambiente.

Todos dados até aqui constantes sobre gradientes térmicos, relacionam-se ao valores capturados diretamente pelas leituras dos PT-100 de topo e fundo nas placas. Sabe-se, da Figura 2.5, que o PT-100 de fundo encontra-se a 7 mm da camada asfáltica e o de topo a 15 mm da superfície da placa de WTUD. Se considerar uma distribuição linear do gradiente nas placas, os seguintes valores de gradientes retificados atuam na placa de WTUD, conforme Tabela 4.12, baseada nos gradientes máximos e mínimos tabulados anteriormente e numa espessura média das placas de 95 mm.

Tabela 4.12 Retificação dos Gradientes Extremos de Dias Típicos de cada Estação do Ano

Estações do Ano	ΔT (°C)	$\Delta T/t$ (°C/mm)	Gradiente Retificado (°C)
Outono	8,4	0,115	10,9
Inverno	7,8	0,107	10,1
Primavera	9,4	0,129	12,2
Verão	11,7	0,160	15,2
Outono	-3,1	-0,042	-4,0
Inverno	-2,4	-0,033	-3,1
Primavera	-4,2	-0,058	-5,5
Verão	-3,6	-0,049	-4,7

Utilizando o mesmo processo de ajuste nos gradientes térmicos que permitiram o construção da Tabela 4.12, é possível chegar aos valores extremos de gradientes térmicos atuantes ao longo de toda a espessura da placa. O máximo gradiente, não corrigido, foi de 12,7 °C ocorrido no dia 3 de dezembro de 2000, seu valor retificado é de 16,5 °C. O mínimo gradiente coletado durante uma forte chuva, ajustado para toda a espessura de placa, foi de -11,6 °C.

Uma última análise faz-se possível com os dados típicos de cada estação do ano. Esta diz respeito aos horários de ocorrência das temperaturas e gradientes extremos.

Em dias típicos de outono, 78,6% dos casos, a temperatura máxima ocorre entre às 12h 30min e 13h, sendo que 100% dos dias esta ocorre entre às 12h e 13h. As temperaturas mínimas ocorrem entre às 6h 30min e 7h 30min com uma frequência de 78,6%. Em 84,6% das vezes, os gradientes máximos surgiram entre às 11h 30min e 12h 30min, aproximadamente uma hora antes da

temperatura atmosférica máxima do dia ser atingida. Em relação aos gradientes mínimos, há muita dispersão nos horários de ocorrência, sendo esta faixa entre às 0h e 5h da madrugada.

Quanto aos horários de maiores temperaturas durante o inverno, observou-se uma maior dispersão nestes quando comparados com o outono, ocorrendo o pico entre às 12h e 14h, sendo uma boa parte destes valores concentrados entre às 13h e 14h. Para as mínimas temperaturas, registrou-se grande parte destes valores entre às 5h 30min e 7h 30min, contrariando o ocorrido durante o outono onde não havia um horário preferencial. Os máximos gradientes térmicos, em 83,3% dos casos, surgiram entre às 11h e 12h 30min, ocorridos sempre antes das temperaturas máximas, porém com uma variação maior neste intervalo de tempo; os mínimos valores correspondentes aconteciam entre às 4h e 6h 30min.

Na primavera, as máximas temperaturas eram registradas entre às 14h e 15h 30min; já as mínimas entre às 4h e 5h 30min. Os gradientes máximos foram coletados entre às 12h 30min e 14h 30min, 60min a 90min antes da temperatura máxima, intervalo elástico que pode ser explicado pelo maior tempo em que elevadas temperaturas no topo placa eram registradas, fato que levava a um maior aquecimento no fundo da mesma. No que tange aos gradientes mínimos, valores muito próximos destes foram coletados entre às 0h e 2h 30min e entre às 18h 30min e 20h; neste último período de ocorrência de gradientes mínimos, seus valores absolutos eram levemente maiores que aqueles do período da madrugada.

Em 75% dos casos as temperaturas máximas no verão ocorreram entre às 13h 30min e às 15h 30min; as mínimas ocorreram em 87,5% dos dias típicos entre às 5h 30min e 6h 30min. Os gradientes máximos, em 62,5% dos dias analisados, apareciam entre às 12h 30min e 14h 30min, poucos minutos antes das temperaturas máximas, diferentemente das outras estações em que este intervalo era mais longo. Os mínimos gradientes, assim como na primavera, podem ser percebidos em dois períodos distintos do dia, com a mesma magnitude se desconsiderados aqueles provenientes da chuva, entre às 4h 30min e 6h 30min (62,5%) e entre às 20h 30min e 21h 30min (57,1%).

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam peculiaridades relacionadas à evolução das temperaturas de topo e fundo e dos gradientes durante condições climáticas características.

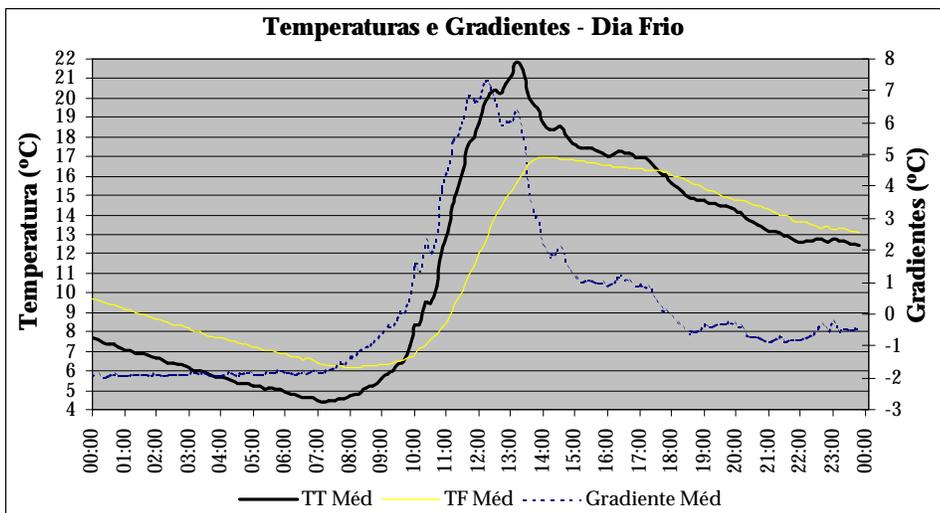


Figura 4.8 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Frio

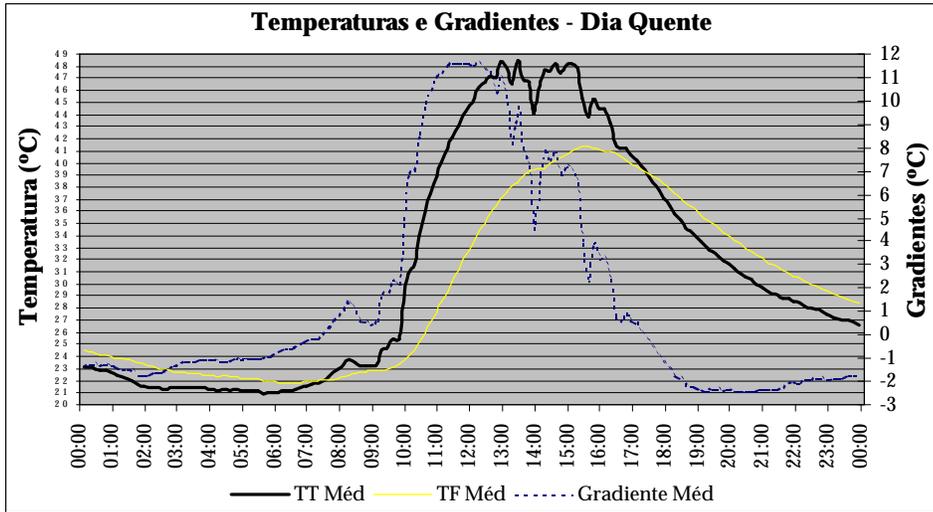


Figura 4.9 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Quente

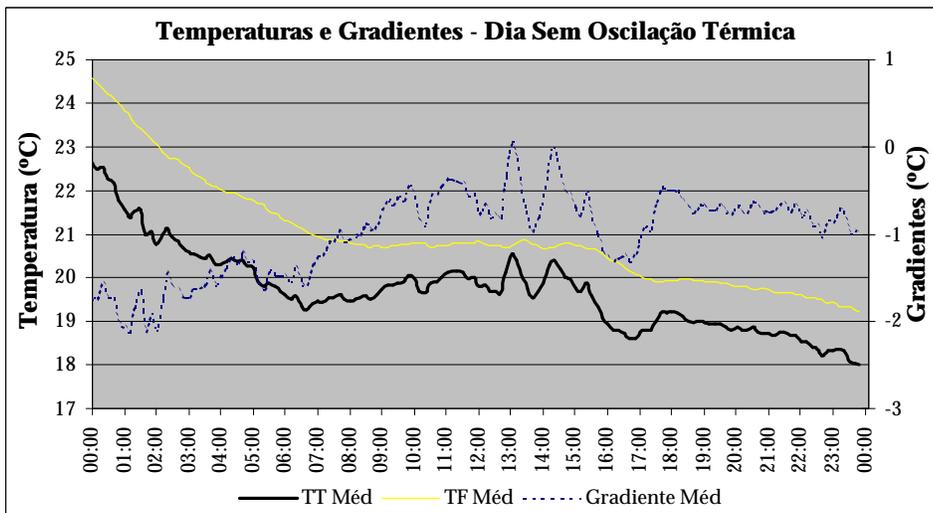


Figura 4.10 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante um Dia Sem Oscilação Térmica

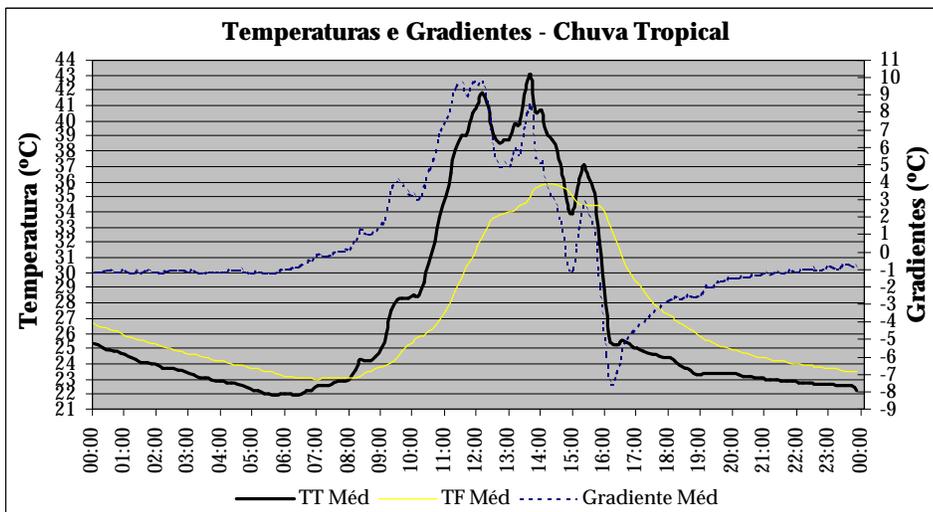


Figura 4.11 Evolução das Temperaturas e Gradientes durante uma Chuva Tropical

Parece haver fenômenos que atuam mais intensamente em diferentes épocas do ano para que não haja discrepância enormes entre os gradientes máximos e contribua para a igualdade dos valores mínimos.

Em meses frios, com a constância de baixas temperaturas, o fundo das placas de WTUD em contato com o CA permanece com sua temperatura reduzida. Ao longo dos dias, a temperatura do topo vai aumentando, mesmo que em valor absoluto menor que no verão, fato que induz elevados gradientes visto a baixa temperatura de fundo. Nos dias quentes, mesmo que o fundo esteja a uma temperatura mais elevada que no inverno, por exemplo, a temperatura ambiente elevasse a valores muito superiores aqueles máximos encontrados no período frio, contribuindo assim para atingir níveis de gradientes apenas um pouco superiores àqueles encontrados durante o outono e inverno.

Em relação aos gradientes negativos, não oriundos de chuvas, no inverno, o clima frio consegue reduzir a temperatura de topo a um valor pouco menor que aquela encontrada no fundo das placas. No verão, a temperatura de fundo encontra-se em valores razoavelmente elevados; durante a fase de resfriamento do topo, a temperatura superficial do WTUD tende ser um pouco menor que a de fundo, equilibrando com a temperatura ambiente.

Os dois parágrafos anteriores tentaram explicar algo similar a conservação de energia aplicada às placas de WTUD. Os valores limites de gradientes nas duas seções são idênticos, mesmo que proporcionados por valores de temperaturas, tanto de topo quanto de fundo, com ordem de grandeza complementemente diferentes; porém os gradientes são análogos por que a temperatura de fundo, nas diferentes épocas do ano, tende a ser próxima da média da temperatura ambiente, e a de topo, que sofre maiores oscilações, mas sempre procura equilibrar-se com a temperatura ambiente. Concluindo, em dias frios quem parece governar o magnitude dos gradientes térmicos é a temperatura de fundo; no calor, quem governa tal magnitude é a temperatura de topo.

Em dias atípicos, em que não há variação térmica proporcionada pelo frio, chuviscos durante o dia inteiro ou por nebulosidade, as temperaturas de topo e fundo pouco variam, podendo o gradiente ficar somente positivo ou negativo durante todo o dia, conforme Figura 4.10.

Os maiores valores absolutos de gradientes térmicos foram observados durante os primeiros momentos de chuvas tipicamente tropicais, que pode ser visualizada na Figura 4.11. O horário exato de início da chuva para que esta conduza a valores mais negativos de gradientes térmicos deve coincidir com o pico da temperatura de topo. Assim, considerando que a chuva tropical tenha um potencial constante de redução da temperatura na superfície da placa, tal condição citada anteriormente reduziria o gradiente térmico em valores maiores de quando esta mesmo chuva ocorresse no ponto de máxima temperatura de topo, já que quando este valor é alçado, a temperatura de fundo ainda não atingiu seu ápice.

4.4 Deformações devido ao Empenamento

Somente após sanado o problema já relatado no item 2.2.6 e visualmente descrito na Figura 2.12, maiores conclusões a respeito das deformações foram possíveis. Contudo, a análise destas deformações será apenas qualitativa uma vez que dificuldades análogas às mencionadas por Barenberg e Zollinger (1990) impossibilitaram a quantificação das deformações devidas exclusivamente ao gradiente térmico.

A dificuldade encontrada refere-se à grande interferência da temperatura sobre os *strain-gages*. De acordo com o que já foi exposto neste trabalho, a temperatura aumenta a resistência do medidor de deformação que passa a fornecer leituras que não representam apenas as deformações do concreto, mas leituras de deformações que somam o efeito do empenamento e da influência da temperatura na resistência elétrica dos medidores. Assim, numericamente, as tensões que dariam origem aquele valor de deformação estariam muito acima da resistência do concreto empregado.

Tentando mensurar o efeito da temperatura sobre tais medidas, procedeu-se uma calibração dos *strain-gages*, em que a temperatura destes medidores variou entre 0 °C e 50 °C, temperaturas limites no experimento em campo. Ter-se-ia assim, o valor de deformação que deveria ser descontada daquela obtida em campo a fim de torná-la somente referente ao empenamento. Entretanto, mesmo usando-se esta correção, não foi possível chegar a valores confiáveis de deformação devido exclusivamente ao gradiente térmico.

Para as seções A e B, a deformação máxima ocorre no momento em que a temperatura da superfície do WTUD encontra seu valor máximo. Observa-se também que a máxima temperatura de fundo é atingida após a máxima deformação e que o gradiente térmico máximo é alcançado antes deste valor de deformação. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 ilustram melhor o que foi exposto. O comportamento das deformações ante às temperaturas de topo e fundo, bem como ao gradiente térmico manteve-se inalterado nas quatro estações do ano.

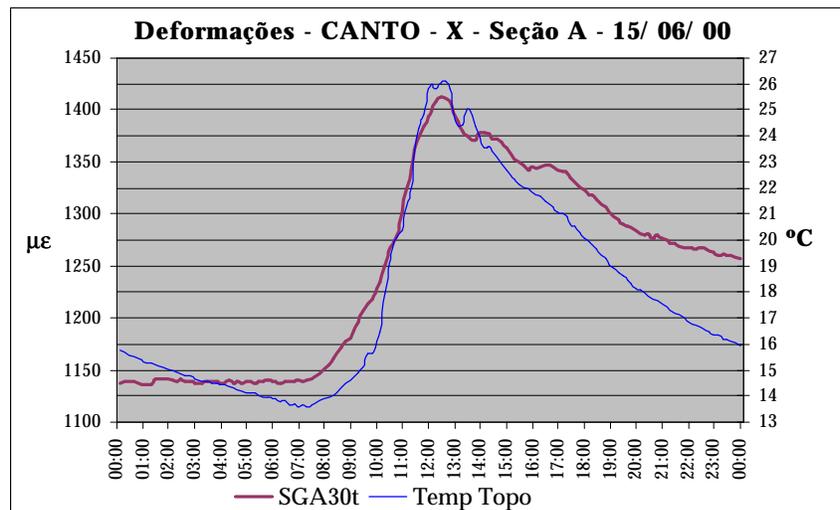


Figura 4.12 Pico de Deformação coincidente com o Pico da Temperatura de Topo

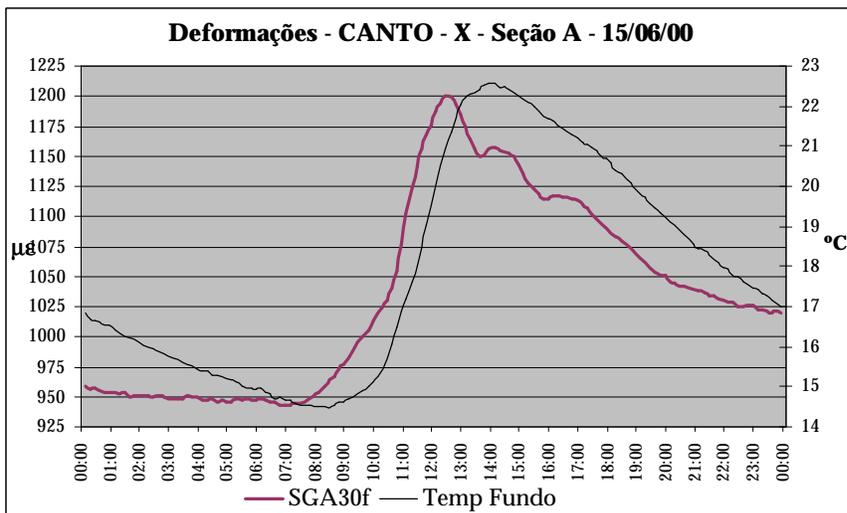


Figura 4.13 Pico de Deformação ocorrendo antes do Pico da Temperatura de Fundo

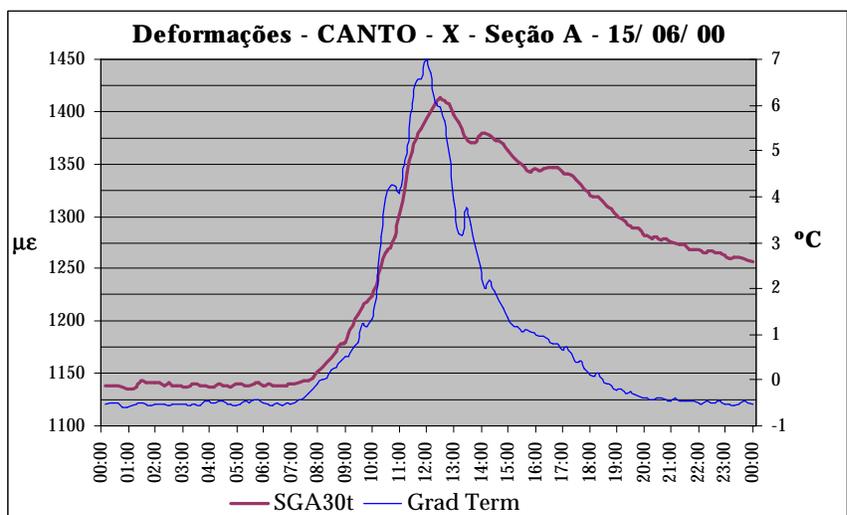


Figura 4.14 Pico de Deformação ocorrendo antes do Pico de Gradiente Térmico

4.5 ICP

Não houve evolução nos defeitos detectados logo após a execução da pista e nenhum outro defeito foi observado após uma solicitação total de 37.157 ESRs e 37.157 ESRD (calculados até o dia 08 de fevereiro de 2001, 15 meses após sua liberação ao tráfego). O número de eixos foi calculado com base em informações adquiridas junto à Prefeitura do Campus Universitário (PCO) e contagem de um dia do tráfego existente. Considerou-se 22,5 dias de semana por mês mais quatro sábados sendo, 86 o número de circulares que trafegam sobre o WTUD por dia durante os dias da semana e 7 durante os sábados; 20 ônibus da linha 7702 da SP-Trans durante a semana e 12 aos sábados; 5 ônibus fretados durante cada um dos cinco dias da semana; 6 caminhões por dia de semana; descontando os eixos dos ônibus circulares durante o período compreendido entre 26 de abril de 2000 e 18 de junho deste mesmo ano, uma vez que durante este intervalo de tempo ocorreu a greve dos funcionários da USP.

O valor encontrado para o PCI durante os quatorze meses de uso do WTUD não possibilitará a avaliação da aplicabilidade deste método para WTUD, dado sua invariabilidade durante o período de análise. Conclui-se também que, até então, o desempenho de ambas seções classificar-se-ia como excelente.

4.6 Perfil

Observa-se, nas duas seções, uma irregularidade longitudinal relativamente acentuada. Porém, de acordo com o comentado no item 2.2.4, esta irregularidade não pode ser atribuída a defeitos surgidos após a execução da pista experimental uma vez que nenhuma falha foi observada após a liberação desta ao tráfego.

O fato de haver invariabilidade nos valores de ICP, contribuem para o que foi acima descrito, bem como concorre para o fato destas imperfeições serem oriundas do processo executivo empregado, já que nesta fase nenhuma técnica mais precisa de acabamento foi adotada, contrário ao que ocorreria no caso de uso do WTUD em maior escala.

O empenamento causado pelo gradiente térmico positivo de 8,1 °C, pode ser desprezado, uma vez que nenhuma irregularidade perceptível tenha sido notada. Esta constatação pode ser atribuída, em primeiro lugar, às diminutas dimensões em planta das placas, fator que reduz o empenamento devido ao gradiente térmico. Em um segundo momento, o imperceptível empenamento atribui-se à presença da aderência, que pode ser percebida pelo excelente desempenho observado em campo.

Por fim, no capítulo referente ao método de pesquisa adotado neste trabalho, já antecipava-se a impossibilidade de análise comparativa entre os perfis em diferentes estágios da vida de serviço do WTUD dado a invariância das condições das placas ao longo do presente estudo (em curto período de tempo).

4.7 Provas de Carga

Conforme visto no item 3.6 referente aos dados obtidos nas provas de carga, alguns comentários pertinentes podem ser realizados. Primeiramente, tornou-se evidente o grande número de placas instrumentadas necessárias à obtenção de dados consistentes.

A disparidade de alguns valores de campo quando comparados com aqueles obtidos por elementos finitos podem ser atribuídos a vários fatores. A temperatura, por exemplo, afeta de maneira muito intensa as medidas de deformação, chegando a provocar oscilações nas leituras dos *strain-gages* da mesma ordem de grandeza do sinal captado pela deformação das placas quando de seu carregamento, isto para uma variação de 1°C, conforme tentativa de calibração dos *strain-gages*. A modelagem considera uma condição de plena aderência entre as placas e, conforme pode ser inferido das referências bibliográficas apresentadas neste trabalho, sabe-se que na prática a aderência plena não ocorre.

As características elásticas assumidas para as diferentes camadas do pavimento composto, mais precisamente o módulo de reação do subleito, também poderiam inserir erros, mas que seriam de menor magnitude, conforme já observado em análise de sensibilidade constante no relatório final encaminhado pelo LMP à ABCP, referente a um projeto que deu origem a um programa de dimensionamento de WTUD, LMP (1998).

Um outro fator de ordem prática-executiva, pode estar interferindo nas leituras de deformação. Este fator é a presença de uma área enrijecida com aço estar presente no local de leitura das deformações. Mesmo com o cuidado de utilizar uma estrutura de suporte que menos alterasse o estado de rigidez do CCP na área em que estas leituras seriam tomadas, não é possível prever como tal fenômeno poderia estar interferindo as medidas.

Contudo, a maioria dos números apresentados na Tabela 3.17, obtidos por meio de provas de carga estão na mesma ordem de grandeza daqueles oriundos da simulação numérica, comprovando que o emprego de modelos numéricos ajusta-se de maneira satisfatória à análise tensional em WTUD.

Analisando os valores em negrito na Tabela 3.17, percebe-se uma diferença entre os valores medidos e calculados inferiores aos apresentados por Mack et al (1993). Neste artigo, as tensões de tração máximas de borda obtidas na modelagem numérica foram de 2,29 e 3,70 MPa para as placas de 51 e 89 mm, respectivamente, ambas com dimensão em planta de 1,83 m. Nesta mesma ordem, os valores da mesma tensão obtidos experimentalmente foram de 2,95 e 1,12 MPa.

Algumas aparentes incoerências nas medidas também foram encontradas nesta pesquisa, já que em alguns casos, leituras de deformação provocadas por um ESRS forneceram tensões superiores aquelas encontradas na mesma placa sobre aplicação de um eixo mais pesado (ESRD). Tal fenômeno pode ser explicado pelo posicionamento do eixo na placa não ser o mesmo para os dois casos analisados e pela ação compensatória da sobreposição dos efeitos das duas rodas do semi-eixo de rodas duplas, conforme pode ser visto nos valores calculados numericamente para a placa A28, por exemplo.

Em relação à linha neutra (LN), conforme esperava-se, esta encontra-se pouco deslocado para baixo do plano médio da placa de WTUD. A modelagem numérica conduziu a posição da LN a 44,6 mm do fundo da placa de WTUD, considerada nesta análise com espessura de 95 mm, para ambas seções. Na medida de campo das deformações no topo e no fundo da placa B03 para o ESRD, percebe-se claramente que a LN encontra-se no plano médio desta, a 47,5 mm do fundo.

Assim, a modelagem numérica e a medida de campo, mesmo que de uma forma muito incipiente dada a demanda de mais leituras em pista das deformações, colaboram para o entendimento de que a contribuição da camada asfáltica na absorção dos esforços fletores oriundos do tráfego é mínima, o que também era previsível, uma vez que a espessura desta camada é muito pequena. Atrela-se o excelente desempenho observado em pista à qualidade do concreto de cimento Portland empregado no WTUD experimental conciliado ao baixo valor de deformabilidade encontrado no CA e demais camadas.

O ajuste “fino” dos modelos numéricos através da calibração de campo somente será possível com um maior número de provas de carga. Este próximo passo será facilitado dado o potencial da pista experimental construída e, não menos importante, experiência adquirida com a realização destas primeiras provas de carga. Em outras oportunidades, por exemplo, não posicionar-se-ão as cargas exatamente sobre os medidores de deformação, mas em locais onde maiores deformações serão induzidas nos *strain-gages*. Também, com intuito de reduzir ainda mais a interferência da temperatura sobre estas leituras, as deformações sem carga e com carga serão tomadas placa a placa, logo após o seu descarregamento.

Provas de carga dinâmicas mostraram-se muito eficientes e habilitam-se ao emprego visto a rapidez de execução, consistência dos dados mesmo que ainda pouco trabalhados, e pela menor influência causada pela temperatura nas medidas. Um programa capaz de capturar as leituras do condicionador de sinais com altas frequências foi adquirido, com auxílio financeiro da FAPESP. Este programa chama-se Aqdados.

No mesmo dia em que as provas de carga estáticas foram realizadas, alguns testes preliminares com este programa foram realizados. O teste dinâmico contou com uma frequência de leituras de 250 Hz, em que todas as variações de deformação nos *strain-gages* eram arquivadas, podendo ser interpretadas a posteriori, como sendo uma linha de influência da carga ao deslocar-se sobre a placa analisada.

A Figura 4.16 apresenta a evolução das deformações nos *strain-gages* colocados na placa A27 quando da passagem do mesmo caminhão utilizado nas provas de carga estática. A cada passagem do caminhão, à uma velocidade próxima dos 20 km/h, fotografias digitais eram tomadas para que o

posicionamento aproximado dos eixos sobre as placas fosse observado. No caso comentado, os eixos passaram próximos ao canto oposto de onde os *strain-gages* estão medindo a deformação na direção Y, de acordo com a Figura 4.15.

POSIÇÃO STRAIN-GAGE E EIXO PLACA - A27

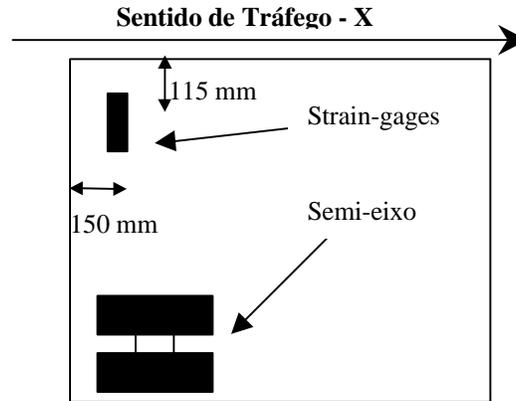


Figura 4.15 Posição aproximada das Rodas na Prova de Carga Dinâmica da placa A27

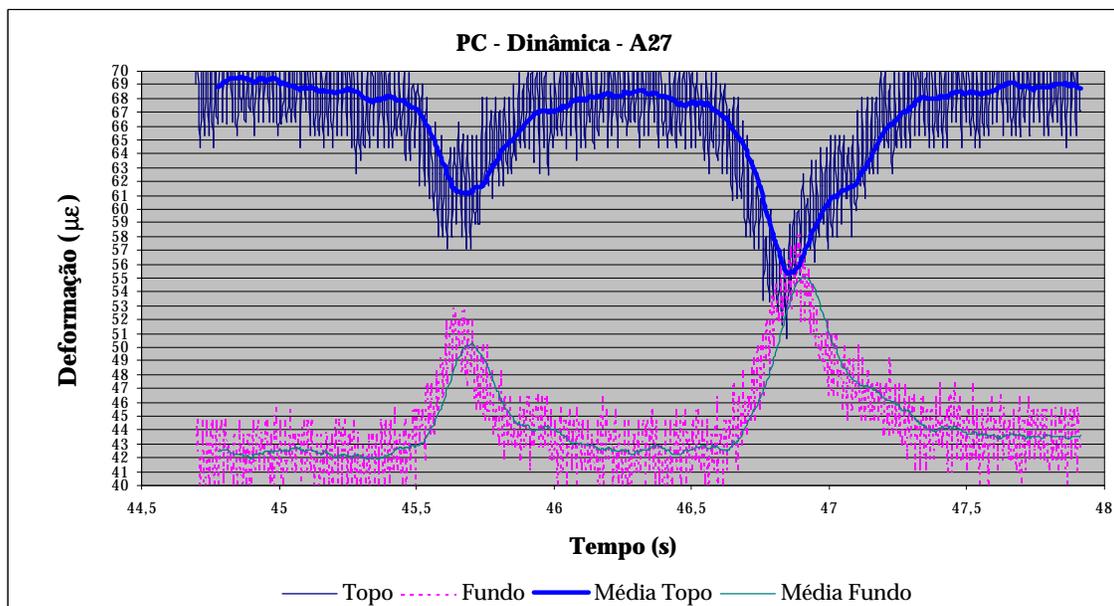


Figura 4.16 Linhas de Influência dos Eixos sobre a Deformação nos *strain-gages* da placa A27

O ESRS induziu no *strain-gage* de topo da placa A27 uma deformação correspondente a uma tensão de 0,29 MPa (tração); no fundo esta tensão foi de -0,30 MPa (compressão). Por sua vez, o ESRD provocou uma tensão máxima, no ponto onde estava colocado o *strain-gage* de topo, de 0,47 MPa e a correspondente tensão medida no fundo foi de -0,51 MPa.

Analogamente às provas de carga estáticas, as provas de carga dinâmica comprovaram que a linha neutra encontra-se deslocada apenas alguns milímetros do plano médio das placas de CCP. Para o exemplo exposto, no caso do ESRD, a linha neutra encontra-se a 49,5 mm do fundo (tensão de tração no topo).

4.8 Análise de Deflexões

Um segundo levantamento das bacias de deformação devido à carga foi realizado. A idéia era levantar novas bacias, obtidas sobre as placas das duas seções de WTUD e compará-las com a medida quando do estudo do local onde a pista experimental seria construída. Cabe salientar que a pressão dos pneus dos caminhões bem como os pesos dos ESRD, nos dois levantamentos realizados, equiparavam-se, não podendo atribuir-se a estas variáveis as diferenças encontradas. A Figura 4.17 apresenta as deformações obtidas com auxílio de viga de Benkelman.

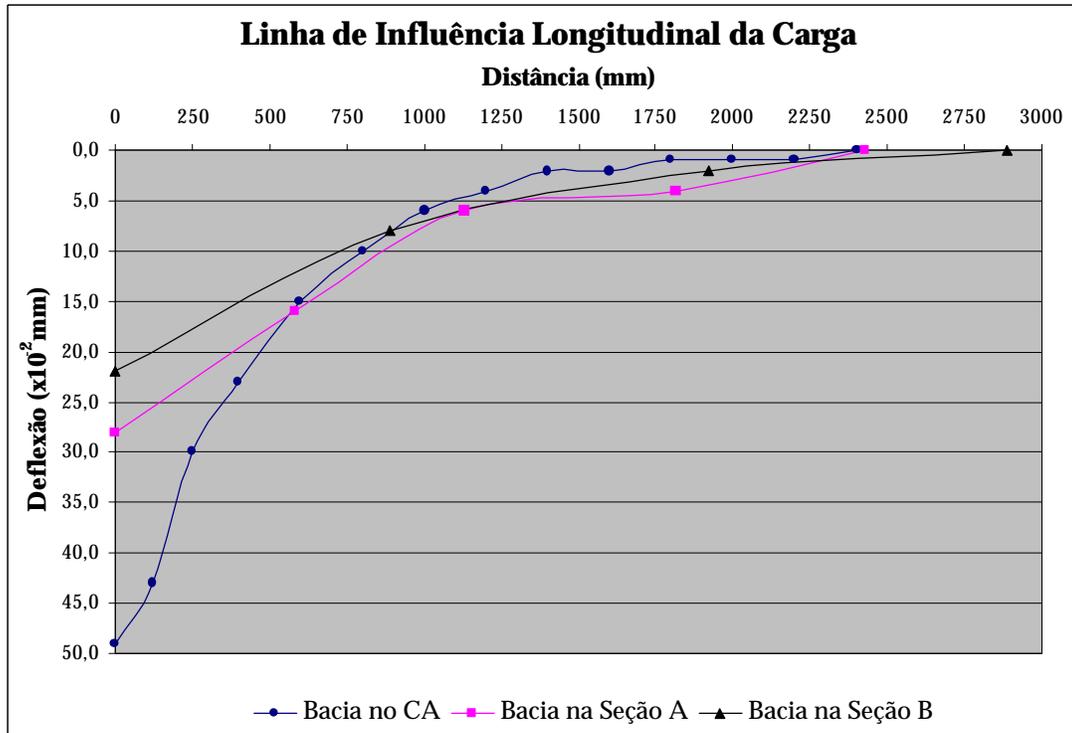


Figura 4.17 Linha de Influência Longitudinal da Carga

Fica nitidamente evidenciada a redução da deflexão após a execução do WTUD. O deslocamento máximo, na ponta da viga Benkelman, reduz-se em aproximadamente 50% após a construção do WTUD; este valor que inicialmente era de 49×10^{-2} mm, passou para 28×10^{-2} mm sobre as placas da seção A e 22×10^{-2} mm sobre a outra seção.

A significativa redução de deflexão encontrada na pista experimental na USP está plenamente de acordo com os relatados na bibliografia internacional onde, por exemplo, a deflexão máxima após o WTUD ter sido executado foi reduzida em de 63% do valor inicial, antes da fresagem do CA, conforme valores encontrados em Armaghani e Tu (1999).

Uma explicação plausível para esta redução na deflexão máxima reside na melhor distribuição dos esforços oriundos das rodas do caminhão proporcionado pelas placas rígidas de WTUD. Desta forma, os esforços a serem suportados pelo subleito, grande responsável pelas deformações no pavimento, estariam melhor distribuídos, provocando uma menor deflexão total.

Acrescenta-se também a transferência de carga existente entre as placas. Este fator é proporcionado pelo embricamento dos agregados graúdos presentes entre as juntas serradas de placas adjacentes àquela em que o caminhão estava solicitando. A interpretação visual do que foi dito encontra-se na Figura 4.17 onde, mesmo quando o caminhão ultrapassa o limite da placa onde a viga de Benkelman está colocada, ocorre uma redução suave nas deflexões, sem que inflexões abruptas sejam percebidas.

Uma forma de explicar esta melhor distribuição de carga nas camadas do pavimento pode ser encontrada, observando-se, o maior raio de curvatura que seria possível ser circunscrito tangenciando-se os pontos de máxima deflexão para cada um dos casos.

Há coerência também nos deslocamentos máximos encontrados para as seções A e B. Por serem maiores e constituídas de um CCP com a mesma rigidez da seção A, as seções com placas de 1,0 m conseguem distribuir de forma mais uniforme e amena a carga para as camadas subsequentes do pavimento, quando comparadas com as da seção A.

O tipo de comportamento estrutural encontrado no WTUD da pista experimental difere em muito daquele observado no primeiro experimento com placas ultradelgadas de CCP aderidas ao CA no Brasil, conforme relata Balbo (1999a). Naquela oportunidade, o pavimento sem a execução do WTUD apresentava o mesmo nível de deflexões daquelas obtidas após a concretagem das placas de CCP. Este comportamento foi atribuído ao comprometimento estrutural das camadas asfálticas e de base, denotada pela excessiva presença de fissuras interligadas, segundo relata Balbo (1999a).

Torna-se possível então a consideração do efeito de transferência de carga entre as placas de WTUD quando as condições estruturais das camadas do pavimento estiverem inabaladas.

Conclusões

Todas técnicas construtivas, sobretudo as rodoviárias, antes de uma difusa aplicação, necessitam de exaustivas análises das variáveis envolvidas no seu emprego, até porque inúmeras vezes estas provêm de países com condições climáticas e de tráfego completamente diferentes das encontradas nas regiões tropicais brasileiras.

Assim sendo, este trabalho pôde levar ao conhecimento da comunidade técnica algumas nuances importantes quando da aplicação deste tipo de pavimento composto obtidas na extensa revisão bibliográfica e, o mais importante, em análise de campo de desempenho e instrumentação de pista.

Notoriamente no Brasil, os pavimentos asfálticos urbanos possuem pequenas espessuras, na grande maioria das vezes inferiores ao 75 mm recomendado como mínimo remanescente da fresagem nos Estados Unidos. A princípio, o que poderia ser um limitador do emprego de WTUD nas ruas brasileiras, pode ser contornado com a utilização de placas de pequenas dimensões em planta e, principalmente, com emprego de concretos de cimento Portland de alta resistência à tração na flexão.

As provas de carga e a modelagem numérica comprovaram a pequena contribuição da camada asfáltica na redução das tensões crítica no CCP mas, ao mesmo tempo, demonstraram o baixo nível de tensão a que as placas de WTUD estariam sujeitas quando comparado à resistência do concreto utilizado. Concorre para esta assertiva, o fato das camadas subjacentes ao WTUD estarem íntegras, guardando ainda capacidade portante, refletida nos níveis de deflexão medidos sobre o CA antes da execução da pista experimental.

Ao mesmo tempo em que a preocupação apresentada em Balbo (1999a) de inserção do efeito do gradiente térmico nas placas de WTUD nos modelos de desempenho de WTUD fez-se desnecessária devido ao baixo nível de deformação a que estas placas ficam sujeitas quando de seu empenamento, mesmo para os máximos e mínimos gradientes encontrados em pista, surgiu uma outra preocupação. Sabidamente, a resistência ao cisalhamento da interface CCP e CA sofre um considerável decréscimo com o aumento da temperatura, conforme estudos constantes na revisão bibliográfica. Não obstante da desconsideração do primeiro efeito, faz-se necessário um estudo com o intuito de verificar qual a sensibilidade da referida aderência para as elevadas temperaturas de fundo de placas encontradas neste experimento, máxima de 42 °C, para uma posterior inclusão em modelos de desempenho ajustados às condições nacionais, caso de fato tal preocupação persista após um estudo mais aprofundado.

Fica validado o modelo de desempenho apresentado em Balbo (1999a), sendo que tal equação não necessita de um ajuste devido ao gradiente térmico. Potencializa-se ainda um ajuste nesta equação a fim de compatibilizar deformações medidas em campo com aquelas obtidas na modelagem numérica que deram origem ao referido modelo.

Durante as provas de carga ficou evidente a necessidade de utilização de um grande número de instrumentos imersos ao concreto dado o apreciável índice de instrumentos que forneciam respostas anômalas.

As provas de carga estática devem ser conduzidas de forma a serem executadas medidas de deformação com e sem carga para cada placa, minimizando assim o efeito da temperatura sobre as leituras de deformação obtidas, fator ainda carente de maiores estudos.

Os valores obtidos e apresentados neste trabalho referentes às provas de carga encontram-se na mesma ordem de grandeza daqueles oriundos da modelagem numérica, inclusive com diferenças menores que as encontradas em referências bibliográficas. Conclui-se portanto, que os modelos de cálculo de tensões em WTUD provenientes de programas baseados em elementos finitos, mais

especificamente o FECONS 4.1 SI, são aptos a este fim, desde que uma correta discretização de malhas seja realizada. Um coeficiente preliminar de correlação das tensões em campo e das modeladas numericamente situa-se em torno de 0,5, devendo ainda ser consolidado estatisticamente após um maior número de provas de carga serem efetuadas.

As provas de carga dinâmica mostraram-se muito promissoras nos testes preliminares realizados, aferindo com grande êxito a linha de influência da carga sobre as tensões ou deformações na posição de medida na placa.

Dada a reduzida extensão da pista experimental, o levantamento de perfil com o *dipstick* não possibilitou a medida do quociente de irregularidade porém, permitiu a verificação da inexistência de empenamento significativo nas placas da seção A e B.

Com o excelente desempenho do WTUD observado em campo, sob as condições de tráfego urbano existente, não foi possível a verificação da aplicabilidade do ICP com indexador de qualidade funcional e estrutural desta incipiente técnica rodoviária no Brasil.

Por fim, estando as camadas do pavimento abaixo das placas de concreto de cimento Portland íntegras e com capacidade estrutural inabaladas, há uma expressiva redução nas deflexões quando comparadas com aquelas obtidas antes da execução do WTUD. Com esta condição estrutural do pavimento, torna-se possível ainda a consideração da transferência de esforços entre placas justapostas, conforme constatado.

Agradecimentos

Ao Prof. *José Tadeu Balbo*, pela confiança em compartilhar suas idéias e projetos, pelos incansáveis momentos de aprendizado e pela inestimável orientação e labuta no desenvolvimento desta pesquisa.

Às mãos calejadas dos amigos Eng. *Alexandre Peres* e Eng. ME. *Andréa Severi* pelas incontáveis horas de ajuda, sem que esforços mentais e físicos fossem poupados para a concretização deste trabalho.

Ao colega Eng. *Marcos Rodolfo*, pela modelagem em elementos finitos do problema em questão, sem a qual muitas conclusões não poderiam ser obtidas

Ao Prof. *Antonio Domingues de Figueiredo*, pela disposição em acompanhar a concretagem, bem como disponibilizar toda estrutura e recurso humano do CPqDCC – PCC - EPUSP para os ensaios de controle tecnológico e pelo seu auxílio na compreensão de vários assuntos referentes ao uso de fibras em concretos de cimento Portland. Também agradeço aos laboratoristas daquele laboratório pela atenção e empenho durante a realização dos ensaios.

À PCO, nas pessoas do Prof. *Gil da Costa Marques* e do Eng. *Samir T. Hamzo*, pela incalculável ajuda nas diferentes etapas de execução da pista experimental, colocando toda a estrutura da Prefeitura do Campus Universitário a nossa disposição.

Ao amigo Eng. ME. *Valmir Bonfim*, da FREMIX S.A., pela criteriosa e eficaz fresagem realizada na área destinada às placas de WTUD, confirmando a imagem desta consolidada empresa no mercado rodoviário.

Ao Eng. *Cláudio Pinheiro de Freitas*, da EP Engenharia de Pisos Ltda., pela ajuda decisiva durante a concretagem e serragem, sem que ônus algum fosse despendido, auxiliando na execução primorosa do WTUD.

Ao Eng. ME. *Publio Rodrigues*, da LPE Enga. & Consultoria Ltda., por possibilitar o emprego do dipstick na análise do perfil da pista.

À Prof. *Rita Moura Fortes*, por fornecer os recursos necessários à execução das sondagens e do controle tecnológico.

Ao *Centro Tecnológico de Hidráulica* da Universidade de São Paulo pelo repasse dos dados meteorológicos necessários a esta pesquisa.

À *FAPESP* pela concessão do auxílio individual à pesquisa ao Prof. José Tadeu Balbo que possibilitou o financiamento da pista experimental e, por agraciar o autor deste trabalho com a bolsa de auxílio, sem a qual não seria capaz de dedicar-me por inteiro a este fascinante mundo de descobertas que é a pesquisa científica.

Ao *Departamento de Engenharia de Transportes* da Universidade de São Paulo que, através de seu corpo docente, funcionários e estrutura, disponibilizou todos recursos necessários à realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ACPA (1998). *Whitotopping- State of the Practice*. Engineering Bulletin. American Concrete Pavement Association.
- Armaghani, J.; Tu, D. (1997). *Performance of ultra-thin whitotopping in Florida*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 189-206, Indianapolis.
- Armaghani, J.; Tu, D. (1998). *Implementation of ultra-thin whitotopping in Florida*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 183-202, Lisbon.
- Armaghani, J.; Tu, D. (1999). *Whitotopping Ultradelado – Conceitos Básicos sobre uma Tecnologia Emergente*. Anais da 31ª Reunião Anual de Pavimentação, pp 647-663, São Paulo.
- Balbo, J. T., (1999b). *Applications of High-Performance Concrete for Ultra-Thin Pavement Overlays (White-Topping)*. Proceedings , Second CANMET/ACI International Conference, Gramado.
- Balbo, J. T., Rodolfo, M. P. (1998a). *Concrete requeriments for ultra-thin concrete (whitotopping) for flexible pavements*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 27-32, Lisbon.
- Balbo, J. T., Rodolfo, M. P. (1998b). *Slab Geometry and Load Effects on Ultra-Thin Whitotoppings: Considerations basead on Numerical Solution*. Proceedings of the 4th International Workshop on Designtheories and their verification of concrete slabs for pavements and railroads, CROW, Buçaco.
- Balbo, J.T. (1996). *Practical Considerations for Concrete Pavement Design Based on Numerical Model*. 1er Congresso Interamericano de Pavimentos Rígidos, Federación Interamericana del Cemento, Buenos Aires.
- Balbo, J.T. (1997). *Pavimentos Asfálticos: Patologias e Manutenção*. Ed. Plêiade, 103 p, São Paulo.
- Balbo, J.T. (1999a). *Contribuição à Análise Estrutural de Reforços com Camadas Ultradelgadas de Concreto de Cimento Portland sobre Pavimentos Asfálticos (Whitotopping Ultradelado)*. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 195p, São Paulo.
- Balbo, J. T.; Pitta, M. R.; Rodolfo, M. P.; Tia, M. (2000). *Desenvolvimento de um Modelo de Cálculo de Tensões em Whitotopping Ultradelado com base no Método dos Elementos Finitos*. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, pp. 887 – 905, São Paulo
- Barber, E. S. (1957). *Calculation of Maximum Pavements Temperature from Weather Reports*. Proceedings of the Bulletin 168. *Highway Research Board*. National research Concil. pp. 1 – 8.
- Barenberg, E. J; Zollinger, D. G. (1990). *Validation of Concrete Pavement Responses Using Instrumented Pavements*. Transportation Research Record 1286. Transportation Research Board. pp. 67 – 77
- Cable, J. K.; Grove, J. D.; Heyer, M. (1997). *Ultrathin pavement making the grade*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 245-266, Indianapolis.

- Chambon, M.; Chrystory, J-P.; Dallemagneand, M; Grob, M. (1998). *Very thin bonded cement concrete (VTBCC): a new quality surfacing*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 165-172, Lisbon.
- 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.
- Cole, L. W. (1997). *Pavement condition surveys of ultrathin whitetopping projects*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 175-188, Indianapolis.
- Cole, L. W., Mack, J.; Packard, R. (1998). *Whitetopping and ultrathin whitetopping - the U.S. experience*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 203-218, Lisbon.
- Faraggi *et al.* (1987). *Combined Effect of Traffic Loads and Thermal Gradients on Concrete Pavement Design*. Transportation Research Record 1136. Transportation Research Board. pp. 108 – 118.
- Fortes, R. M. (1999). *Estudo da aderência entre o Concreto de Cimento Portland e Concretos Asfálticos para fins de Reforços Ultradeltados de Pavimentos*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 335p, São Paulo.
- Fortes, R. M.; Balbo, J. T. (2000). *Estudo da aderência entre o Concreto de Cimento Portland e Concretos Asfálticos com a finalidade de utilização em Pavimentos de Whitetopping Ultradeltados*. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, pp. 681 – 702, São Paulo
- Grove, J. D.; Harris, G. K.; Skinner, B. J. (1993). *Bond contribution to whitetopping performance on low volume roads*. Transportation Research Record No. 1382, pp. 104-110, Washington, D.C.
- Gucunski, N.; Ganji, V; Vitillo, N; Tabrizi, K; Maher, A. (1999). *FE Analysis Based Prediction Equation for Ultra Thin Whitetopping (UTW)*. Paper presented for the TRB meeting of 1999, Washington, D.C..
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. Prentice – Hall, Inc. New Jersey, 805p.
- Lee, Y. H.; Darter, M. I. (1994). *Loading and Curling Stress Models for Concrete Pavement Design*. Transportation Research Record nº 1449. Transportation Research Board. pp. 101 – 113.
- LMP; ABCP (1998). *Pesquisa para o Desenvolvimento de Subsídios de Projeto para a Tecnologia Emergente de Reforços de Pavimentos Flexíveis com Camadas Ultradeltadas de Concreto de Cimento Portland – Whitetopping Ultradeltado (WTUD) – Fase I*. Relatório de Pesquisa (Final), 145p, São Paulo.
- Mack, J.; Wu, C-L.; Tarr, S.; Refai, T. (1997). *Model development and interim design procedure guidelines for ultra-thin whitetopping pavements*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 231-256, Indianapolis.
- Mack, J.W, Cole, L. W.; Mohsen, J. P. (1993). *Analytical considerations for thin concrete overlays on asphalt*. Transportation Research Record No. 1388, pp. 167-173, Washington, D.C.

- Mack, J.W.; Hawbaker, L.D.; Cole, L.W. (1998) *Ultra-thin whitetopping (UTW): the state-of-the-practice for thin concrete overlays of asphalt*. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington, D.C.
- 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, Sigüenza. Spain. pp. 121 - 135.
- Mohamed, A.; Hansen, W. (1998). *Effects of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Concrete Pavements*. Transportation Research Record 1568. Transportation Research Board. pp. 65 – 71.
- Nishizawa T; Fukute, T; Kokubun, S. (1999). *Study on an analysis method for mechanical behavior of composite*. Paper presented for the TRB meeting of 1999, Washington, D.C..
- Noda, E.; Kong, Y.; Kasahara, Y. (1998). *Fundamental study on bonded ultrathin whitetopping*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 67-76, Lisbon.
- Older, C. (1924). *Highway Research in Illinois*. Transactions of the American Society of Civil Engineers - ASCE. vol. 87. pp. 1181 – 1224.
- Pitta, M. da R. (1996). *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método da PCA/84*. 2. Ed., ET-97, ABCP, São Paulo.
- Popete *et al.* (1988). *Field Evaluation of Thermal Deformations in Undowelled Portland Cement Concrete Pavements Slabs*. Transportation Research Record 1207. Transportation Research Board. pp. 217 – 228.
- 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.
- Risser, R.J.; LaHue, S.P.; Voigt, G.F; Mack, J.W. (1993). *Ultra-thin concrete overlays on existing asphalt pavement*. Preprint for the 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, West Lafayette.
- Salcedo, M. A. (1996). *Rehabilitación de pavimentos flexibles mediante losas delgadas de concreto - resultados experimentales*. 1er Congreso Interamericano de Pavimentos Rígidos, Federación Interamericana del Cemento, Buenos Aires.
- Salcedo, M. A. (1998). *Ultra-thin whitetopping applications in Mexico*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 173-182, Lisbon.
- Silfwerbrand, J. (1997). *Whitetoppings - Swedish field tests and recommendations*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 231-244, Indianapolis.
- Silfwerbrand, J. (1998). *Whitetoppings - long term performance and recommendations*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 139-148, Lisbon.
- Sommer, H.; Steigenberger, J.; Pichler, R. (1998). *Fast track paving in Viena*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 87-90, Lisbon.

- Sprinkel, M.; Ozyildirim, C.; Hladky, S.; Moen, C. (1997). *Pavements overlays in Virginia*. Proceedings of the 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance. Purdue University, Vol. II, pp. 217-230, Indianapolis.
- Steigenberger, J. (1998). *Thin white topping in Viena*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 91-94, Lisbon.
- Sturm, H.; Moris, D. (1998). *Ultra-thin whitetopping Ontario's experience*. Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads. AIPCR-CEMBUREAU, Theme IV, pp. 129-138, Lisbon.
- Swanberg, J. H. (1945). *Temperature Variation in a Concrete Pavement and Underlying Subgrade*. Proceedings of the 26th Annual Meeting of the *Highway Research Board*. pp. 169 – 180.
- Tarr, S. M.; Sheehan, M. J.; Ardani, A. (2000). *Mechanistic Design of Thin Whitetopping Pavements in Colorado*. Preprint of Transportation Research Board. 26 pp. Washington, D.C.
- Teller, L. W.; Sutherland, 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 and vol. 10 pp. 201 – 221.
- USACE – United States Army Corps of Engineers (1979). *Development of a pavement condition rating procedure for roads, streets and parking lot*. Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report M-268, Champaign
- Webb, R. D.; Delatte, N. J. (2000). *Performance of Whitetopping Overlays*. Preprint of Transportation Research Board. Paper No. 001068, pp. 23. Washington, D.C.
- Westergaard, H. M. (1926). *Computation of Stresses in Concrete Roads*. Proceedings of the 5th Annual Meeting of the *Highway Research Board*. Washington, D.C. Part I, pp. 90 – 118.
- Westergaard, H. M. (1927). *Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due Variations of Temperature*. Proceedings of the 6th Annual Meeting of the *Highway Research Board*. National research Council, pp. 201 – 215.
- Wu, C.L.; Tarr, S.M.; Ardani, A.; Sheehan, M.J. (1998). *Instrumentation and field testing of ultrathin whitetopping pavement*. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington, D.C.

Deividi da Silva Pereira, nascido em Cachoeira do Sul, RS, no dia 02 de abril de 1976, formou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria em julho de 1998.

Durante a graduação, participou do programa de iniciação científica, sendo bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) durante dois anos, de 1996 a 1998, pesquisando sobre a adição de microssílica em concretos com altos teores de cinza volante. Ainda foi monitor da disciplina Análise Matricial das Estruturas A.

Realizou estágio na Cimbagé, indústria cimenteira atualmente pertencente ao grupo Cimpor, tendo atuado nos mais diversos setores, desde a mineração do calcário até a expedição de cimento e argamassas industrializadas. Logo em seguida, estagiou na empresa Prontomix, participando de todas as atividades de prestação de serviços de concretagem.

Depois de formado, trabalhou no grupo Cimpor, no setor de concreto usinado, de onde afastou-se para cursar o mestrado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo no início de 1999, junto ao Laboratório de Mecânica de Pavimentos, como bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Neste laboratório, participou, como pesquisador assistente, da criação de um programa computacional para cálculo e verificação à fadiga das placas de *whitetopping* ultradelgado, em convênio entre o LMP-EPUSP e a ABCP, entre outras atividades científico-acadêmicas.