

DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS LEVES COM ÁTICO:
BANCADA DE TESTES E MODELO MATEMÁTICO

ENGº ROBERTO LAMBERTS

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Porto Alegre

Junho de 1983

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. José Miguel Aroztegui
Orientador



Prof. José S. Gomes Franco
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

À HELENA
com amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

● Ao Prof. José Miguel Aroztegui pela amizade, orientação e incentivo constantes na elaboração deste trabalho.

● Ao Prof. José S. Gomes Franco, coordenador do curso, pelo grande apoio.

● À Helena P. Romanowski pelo apoio, auxílio, incentivo, execução dos gráficos e revisão ortográfica do texto.

● Ao Prof. Horácio Vielmo pelo grande auxílio prestado na elaboração do modelo matemático e seu ajuste.

● Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos no período de março de 1981 a fevereiro de 1983.

● À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos a partir de março de 1983.

● À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo patrocínio da bancada de testes e da instrumentação.

● Ao Grupo de Energia Solar da UFRGS, em especial ao Prof. Oscar Daniel Corbella, pelo empréstimo de instrumentos e da área para a construção da bancada.

● Aos Profs. Miguel Fachin e Sérgio Zimermann, do Instituto de Física da UFRGS, pelo desenvolvimento do termômetro digital.

● Ao Prof. Roberto Rivero pelo auxílio na definição da bancada de testes.

● Aos Profs. Arno Krenzinger, Milton Zaro e Rodolfo Keppeler pelo auxílio na parte instrumental.

● A Assis Francisco dos Santos Junior pelo auxílio na parte computacional.

● Ao Prof. Adriano Bica pelo auxílio e empréstimo do Laboratório de Mecânica de Solos.

● A todos os amigos, professores e funcionários desta Universidade que contribuíram, de maneira direta ou indireta, na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	2
2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO DESEM- PENHO TÉRMICO DAS COBERTURAS	7
2.1. COBERTURAS PESADAS	7
2.1.1. <u>Cor externa</u>	8
2.1.2. <u>Resistência e capacidade térmica</u>	9
2.1.3. <u>Resfriamento por evaporação</u>	9
2.2. COBERTURAS LEVES	9
2.2.1. <u>Coberturas leves com forro</u>	10
2.2.1.1. Material e cor externa da telha	11
2.2.1.2. Emissividade inferior da telha e superior do forro	11
2.2.1.3. Ventilação do ático	12
2.2.1.4. Resistência térmica da telha e do forro	13
2.2.1.5. Resfriamento por evaporação	14
2.2.2. <u>Coberturas leves sem forro</u>	14
3. DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DA BANCADA	16
3.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA	16
3.2. METODOLOGIA EMPREGADA	21
3.3. RESULTADOS	27
3.3.1. <u>Teste 1 - Controle (18 e 19 de fevereiro de 1983)</u> .	27
3.3.2. <u>Teste 2 - Diminuição da emissividade inferior do te- lhado (24 e 25 de março de 1983)</u>	32
3.3.3. <u>Teste 3 - Diminuição da absortância à radiação so-</u>	

<u>lar e da emissividade inferior do telhado (8 e 9 de abril de 1983)</u>	36
3.3.4. <u>Teste 4 - Diminuição da absortância à radiação solar do telhado (13 e 14 de abril de 1983)</u>	38
3.3.5. <u>Cálculo da condutibilidade térmica das coberturas testadas</u>	40
3.3.6. <u>Umidade das telhas</u>	41
3.4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	43
4. MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA BANCADA	47
4.1. INTRODUÇÃO	47
4.2. O MODELO EMPREGADO	49
4.2.1. <u>Desenvolvimento das equações</u>	51
4.2.2. <u>Cálculo das resistências térmicas utilizadas no modelo</u>	54
4.2.2.1. RT - resistência térmica do conjunto telhas + ripas	54
4.2.2.2. RF - resistência térmica do forro	55
4.2.2.3. RSTC, RITC, RSFC, RIFC - resistências térmicas por convecção	56
4.2.2.4. RSTR, RITR, RSFR, RIFR - resistências térmicas por radiação	57
4.2.2.5. Umidade da telha	57
4.3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL DISTTEMP	59
4.4. CONCLUSÃO	64
5. CONCLUSÃO	66
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	69
ANEXO I - Gráficos com as principais temperaturas levantadas no decorrer dos quatro testes realizados ...	71
ANEXO II - Determinação da massa específica, volume e capacidade de absorção de água das telhas francesas utilizadas	79
ANEXO III - Condutibilidade térmica da cerâmica e da madeira	81
ANEXO IV - Simulações realizadas para os testes 1, 2, 3 e 4 (cobertura padrão)	82
BIBLIOGRAFIA	92

LISTA DE FIGURAS

● Capítulo 2

- FIGURA 2.1 - Representação da transmissão de calor em cobertura com forro, através de analogia elétrica 10

● Capítulo 3

- FIGURA 3.1 - Planta baixa e cortes da bancada de testes . 17
- FIGURA 3.2 - Detalhe do sensor de temperatura e da colocação de um sensor para uma medida de temperatura superficial 19
- FIGURA 3.3 - Detalhe do termômetro de globo 20
- FIGURA 3.4 - Detalhe das sobreposições de montagem da telha francesa 21
- FIGURA 3.5 - Localização das temperaturas utilizadas no cálculo do índice L 24
- FIGURA 3.6 - Disposição dos sensores de temperatura no teste 1 28
- FIGURA 3.7 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - teste 1 ... 31
- FIGURA 3.8 - Disposição dos sensores de temperatura nos testes 2, 3 e 4 33
- FIGURA 3.9 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - teste 2 ... 34
- FIGURA 3.10 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - teste 3 ... 37
- FIGURA 3.11 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - teste 4 ... 39
- FIGURA 3.12 - Variação do conteúdo de umidade das telhas nos dois dias de cada teste 42

● Capítulo 4

- FIGURA 4.1 - Analogia elétrica do modelo utilizado 50
- FIGURA 4.2 - Fluxograma do programa computacional DISTTEMP 60

● Anexo I

FIGURA 1 - Principais temperaturas medidas em 18 e 19 de fevereiro - Teste 1	72
FIGURA 2 - Principais temperaturas medidas em 24 e 25 de março - Teste 2 - cobertura padrão (Oeste) ...	73
FIGURA 3 - Principais temperaturas medidas em 24 e 25 de março - Teste 2 - cobertura modificada (Leste)	74
FIGURA 4 - Principais temperaturas medidas em 08 e 09 de abril - Teste 3 - cobertura padrão (Oeste) ...	75
FIGURA 5 - Principais temperaturas medidas em 08 e 09 de abril - Teste 3 - cobertura modificada (Leste)	76
FIGURA 6 - Principais temperaturas medidas em 13 e 14 de abril - Teste 4 - cobertura padrão (Oeste) ...	77
FIGURA 7 - Principais temperaturas medidas em 13 e 14 de abril - Teste 4 - cobertura modificada (Leste)	78

LISTA DE TABELAS

● Capítulo 3

TABELA 3.1	- Análise das diferenças de 30 em 30 min entre duas temperaturas	29
TABELA 3.2	- Análise entre as diferenças entre os ΔT dos dois forros	30
TABELA 3.3	- Cálculo do índice L - dia 18 de fevereiro ..	32
TABELA 3.4	- Cálculo do índice L - dia 19 de fevereiro ..	32
TABELA 3.5	- Cálculo do índice L - dia 24 de março	35
TABELA 3.6	- Cálculo do índice L - dia 25 de março	35
TABELA 3.7	- Cálculo do índice L - dia 08 de abril	36
TABELA 3.8	- Cálculo do índice L - dia 09 de abril	38
TABELA 3.9	- Cálculo do índice L - dia 13 de abril	40
TABELA 3.10	- Cálculo do índice L - dia 14 de abril	40
TABELA 3.11	- Valores calculados de K_{COB} ($W/m^2 - K$)	41
TABELA 3.12	- Estimativa da energia gasta na evaporação da água contida nas telhas	43
TABELA 3.13	- Índices obtidos nos quatro testes	43

● Capítulo 4

TABELA 4.1	- Fator de umidade	58
TABELA 4.2	- Comparação entre valores reais e simulados de TST	63
TABELA 4.3	- Comparação entre valores reais e simulados de TAT	63

RESUMO

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de uma metodologia para o estudo do desempenho térmico de coberturas leves com ático. Para tal, foi construída uma bancada de testes e elaborado um modelo matemático para simulação da transmissão de calor através destas coberturas.

A bancada é constituída de dois telhados sobre uma câmara com grande inércia térmica. Um telhado foi mantido como padrão, com telhas de barro vermelhas. No outro, foram testadas três modificações neste tipo de cobertura. Os testes foram realizados em dias ensolarados de verão. Foi elaborado um índice que permitiu comparações objetivas de desempenho térmico.

O modelo matemático desenvolvido foi ajustado com base nos dados experimentais levantados.

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a methodology to study the thermal performance of light roofs with attic. The method of approach adopted was the construction of a test bed and the development of a mathematical model.

The test bed permitted the comparative analysis of two roof structures which were built alongside each other over a chamber with great heat capacity. A traditional roof with clay tiles covered one side of the chamber; this provided a standard against which three improved types of roof, built over the other side of the chamber, were tested.

A parameter was elaborated which enabled the thermal performance of the different roofs to be compared.

The mathematical model developed was calibrated using the data obtained during the course of this research work.

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais funções de uma habitação é exercer um efeito de filtro às variações climáticas, de modo que o ambiente interno mantenha-se dentro das margens de conforto térmico dos usuários. Atualmente registra-se a quase total desconsideração deste fato. A possibilidade de condicionamento artificial e o desconhecimento dos fenômenos condicionantes, aliado às pressões exercidas pela necessidade de barateamento da construção, são algumas das explicações plausíveis para esta inobservância. Como a grande maioria da população de nosso país não possui recursos para o uso de condicionamento artificial, cabe ao arquiteto a execução de um projeto adequado às condições climáticas locais. Para tal, necessita-se não só de um bom levantamento do desempenho térmico dos materiais de uso corrente, como também da criação de ferramentas simples, capazes de auxiliar neste sentido durante a fase preliminar do projeto.

Nas edificações térreas, o elemento construtivo que maior influência sofre das agressões climáticas externas é a cobertura: nas baixas latitudes, é extremamente castigada pela radiação solar e, durante a noite, as trocas por radiação de onda longa com o céu causam um esfriamento muito rápido de sua superfície externa. Por esta razão, é também a cobertura que maior influência exerce no condicionamento do clima interno da habitação e é justamente ela a parte mais desprotegida em termos de isolamento e inércia térmica nas construções atuais³¹.

Realizando uma análise do tipo de habitação mais comum em nosso estado, através de pesquisa recente⁶, constata-se que, na distribuição percentual da área a ser construída,

86% das construções são de apenas um pavimento. Neste tipo de construção, as coberturas mais utilizadas no Rio Grande do Sul são os telhados com telhas de barro, cimento amianto e ferro galvanizado. Cabe, pois, perguntar que tipo de estudos experimentais existem para a qualificação térmica de coberturas leves como as acima mencionadas.

Dois tipos básicos de trabalhos desta natureza podem ser destacados: testes de laboratório para a determinação do coeficiente global de transmissão de calor ("U") e estudos em protótipos. Em relação ao primeiro tipo, se os testes de "U" forem usados para comparar coberturas, o efeito da cor externa e da ventilação do ático, em certos casos, estará sendo negligenciado. Quanto aos estudos em protótipos, estes possibilitam que não só a cobertura, mas também as paredes externas e aberturas influenciem no clima interno gerado. Como então analisar experimentalmente o desempenho térmico de uma cobertura isoladamente, levando em conta a absorvidade à radiação solar e ventilação do ático?

A nível nacional, dispõe-se apenas de sugestões do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), em trabalho realizado para o Banco Nacional da Habitação (BNH) e apresentado sob a forma de documento preliminar²², onde o seguinte procedimento é aconselhado: medição do "U" em teste padronizado, determinação da absorvância e enquadramento da cobertura em uma de três faixas de inércia. Entretanto, como exposto acima, o teste de "U" negligencia a ventilação do ático, sendo necessária uma série de levantamentos do movimento de ar no interior de áticos expostos a condições naturais para que se possa validá-lo⁴.

Tendo em vista esta situação, este trabalho apresenta duas propostas: a construção de uma bancada de testes para coberturas leves com ático e o desenvolvimento de um modelo matemático. A bancada consiste basicamente em uma câmara de alta inércia térmica sobre a qual são colocadas duas coberturas expostas às condições naturais. Uma destas é mantida como

padrão, sendo a outra alterável de acordo com o que se deseja avaliar. A variação da temperatura interna da câmara ocorre apenas pela entrada e saída de calor através da cobertura. São executados sempre testes comparativos da cobertura modificada com a padrão, de maneira a englobar todas as variações climáticas na resposta da cobertura padrão. Variáveis como absorvância, ventilação do ático, emissividade do telhado, umidificação da camada externa são englobadas no fluxo passante pelo forro. Foi criado um índice que possibilitasse comparações entre a cobertura padrão e a alterada. As medidas feitas permitem também a determinação do "U" das coberturas.

A idéia de desenvolver um modelo matemático, que no decorrer de vários testes possa ser adaptado à realidade, objetiva possibilitar, no futuro, avaliações dinâmicas de desempenho térmico, prescindindo do uso da bancada. Este modelo será muito útil para análise de custo x benefício na otimização do desempenho de uma determinada cobertura e, também, em cálculos de carga térmica horária.

A bancada foi construída no Campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em área cedida pelo Grupo de Energia Solar (Faculdade de Engenharia). A escolha do local foi devida ao empréstimo de instrumentação e à intersecção de interesses entre o referido grupo e o nosso.

Um desafio encontrado à realização deste trabalho foi a escolha de instrumentação adequada. Isto gerou uma pesquisa preliminar (Lamberts e Aroztegui²⁷) e o desenvolvimento de equipamentos com a assessoria de professores da Faculdade de Física desta Universidade.

Este trabalho possui como limitação o fato da bancada ter sido testada poucas vezes e durante o verão. As conclusões, em conseqüência, estarão restringidas pelas particularidades do clima a que esteve exposta a mesma. Porém, como o objetivo principal do trabalho em relação à bancada foi testar sua operacionalidade, testes de verão, com maior número

de dados e coberturas, e testes de inverno ficam como encargo para futuros trabalhos. Destacam-se, outrossim, como contribuições deixadas a possibilidade de comparação do desempenho térmico de coberturas diferentes através de um índice simples, a elaboração do modelo matemático e seu ajuste através dos dados levantados na bancada e o desenvolvimento de instrumentação adequada a este tipo de estudo.

CONCEITUAÇÃO TEÓRICA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS
NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS COBERTURAS

2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS COBERTURAS

A cobertura de uma habitação é o elemento funcional mais exposto às agressões do clima. A radiação solar em dias claros de verão, a perda de calor por radiação de onda longa em noites claras de inverno e a chuva afetam-na bem mais que aos outros elementos funcionais (estrutura, vedações exteriores, janelas).

O desempenho térmico de uma cobertura está ligado não só ao clima interno gerado, como também à deterioração do material que constitui sua camada externa. A chegada de grandes quantidades de radiação solar e as trocas noturnas geram uma grande oscilação das temperaturas superficiais externas, sujeitando o material não só a tensões que muitas vezes podem causar fissuração, como também a um envelhecimento acelerado causado pela radiação ultravioleta. Estes problemas são solúveis ou, pelo menos, minimizáveis através de um projeto adequado.

Pela influência significativa da massa na performance térmica dos elementos construtivos sujeitos a grandes variações de temperatura pelas trocas de ar e pela radiação solar incidente, divide-se a análise em duas: coberturas pesadas e coberturas leves.

2.1. COBERTURAS PESADAS

As coberturas pesadas geralmente são horizontais e de concreto. A capacidade térmica é grande e a transferência de calor é por condução, a menos que exista uma câmara de ar.

Desta forma, as principais características para melhorar o seu desempenho térmico são a cor externa, resistência e capacidade térmicas e resfriamento por evaporação.

2.1.1. Cor externa

A cor e a natureza da superfície externa determinam a quantidade de radiação solar absorvida pela cobertura durante o dia, e a perda de calor para o céu durante a noite. Logo, a sua influência é direta na temperatura superficial exterior e nas trocas internas com o ambiente.

A energia do espectro solar se distribui entre ultravioleta (4% a 5%), visível (~40%) e infravermelho (~55%). Superfícies brancas refletem grande parte da faixa visível, mas absorvem ultravioleta e um pouco de infravermelho. Cores escuras absorvem progressivamente mais da faixa visível e a maioria das superfícies pretas absorvem mais do que 95% do total¹⁸. O alumínio, tanto em metal quanto em tintas, quando novo tem uma boa reflexão desde o ultravioleta até o infravermelho (~65%), entretanto, a perda do poder reflexivo com o tempo e o bloqueio à saída de calor nas noites de verão, exercido pela baixa emissividade, reduzem o seu desempenho no nosso clima.

A melhora causada por uma cor clara em relação a uma escura fica reduzida com o aumento da resistência e da capacidade térmica da cobertura (espessura), mas mesmo assim continua existindo.

Estudos experimentais¹⁹ em Israel - clima seco - mostram que, ao pintar-se uma cobertura de concreto de branco, pode-se obter inclusive um resfriamento do ambiente, pois a média das temperaturas superficiais externas é mais baixa do que a média das temperaturas do ar.

Entretanto, pintar uma superfície de branco é uma solução temporária em vista da deterioração pela intempérie,

cabendo portanto uma análise comparativa com os outros métodos a seguir citados.

2.1.2. Resistência e capacidade térmica

Em muitos materiais tradicionais de construção, estas duas características aparecem associadas, porém a diferença conceitual é grande. Enquanto a resistência térmica pressupõe, em regime uniforme, uma barreira à passagem do fluxo térmico por condução, a capacidade térmica se refere a uma redução do fluxo em regime periódico através do armazenamento e devolução de calor à fonte pela massa.

A ponderação adequada entre resistência e capacidade térmica é bastante complexa. Pode-se, entretanto, salientar que as variáveis principais são a cor externa e as oscilações da temperatura do ar.

2.1.3. Resfriamento por evaporação

O gotejamento de água ou mesmo a colocação de uma película de água sobre a cobertura são soluções baseadas no resfriamento da temperatura superficial externa, podendo inclusive inverter o sentido do fluxo térmico, causando assim um resfriamento da habitação. O trabalho de Jain e Rao²⁴ mostra as melhoras práticas que podem ser obtidas com este tipo de solução. Entretanto, tal solução é geralmente inviável por ser útil em zonas áridas, onde a água é escassa e cara. Por outro lado, a colocação de uma película de água poderia criar um foco de mosquitos, ficando assim esta medida restrita a condições muito específicas.

2.2. COBERTURAS LEVES

As coberturas leves podem ser constituídas simplesmente pela telha ou pelo conjunto telha, colchão de ar e forro. As telhas mais comuns são as de barro, de cimento amian-

to, de ferro galvanizado e de alumínio. Em termos de forro, conta-se hoje com uma variedade muito grande.

2.2.1. Coberturas leves com forro

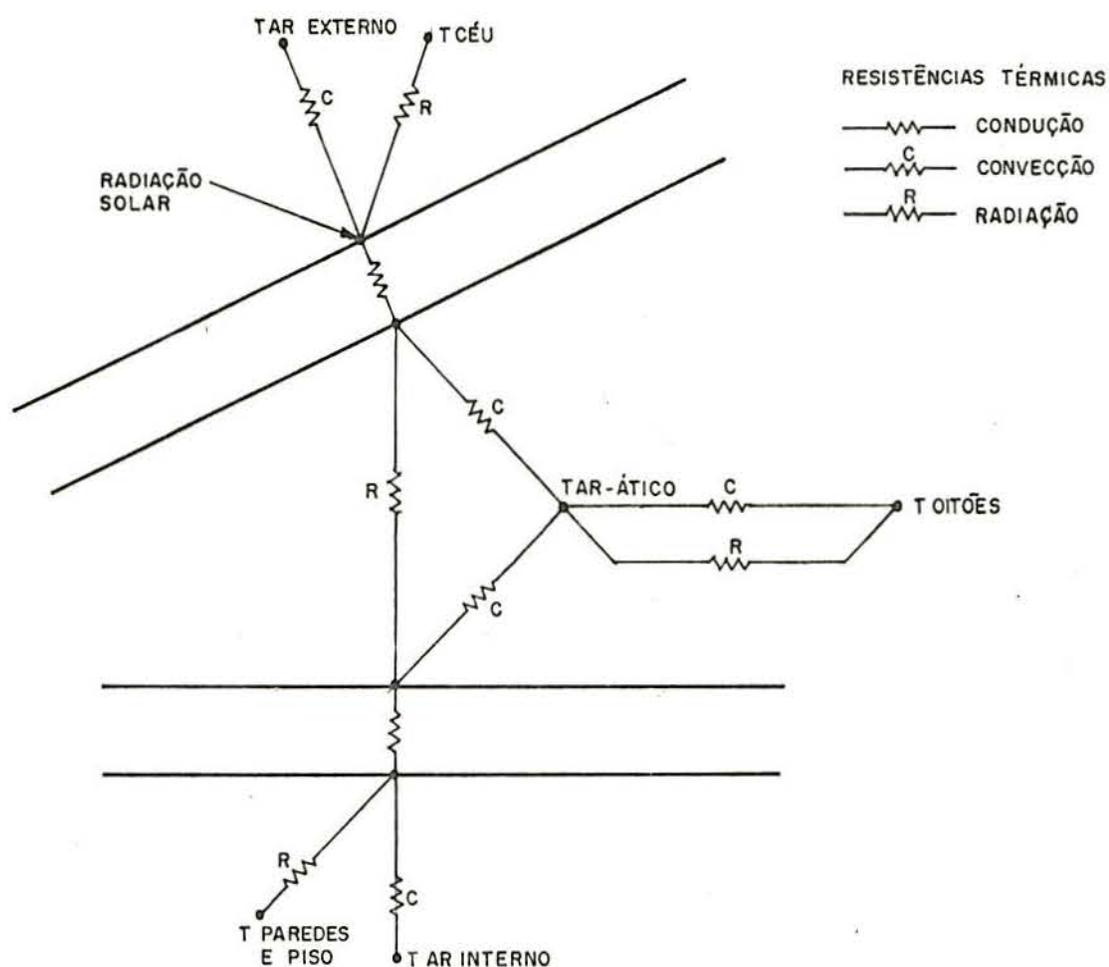


FIGURA 2.1 - Representação da transmissão de calor em cobertura com forro, através de analogia elétrica

A Figura 2.1 mostra de forma esquemática, através da analogia elétrica, as trocas que ocorrem na transmissão de calor numa cobertura com forro. Cabe salientar que, no ático, a principal troca é por radiação.

Os fatores que mais influenciam e podem contribuir para a melhora do desempenho destas coberturas são o material e a cor externa da telha, emissividade inferior da telha e superior do forro, ventilação do ático, resistência térmica da telha e do forro e resfriamento por evaporação.

2.2.1.1. Material e cor externa da telha

Neste tipo de cobertura, a influência da cor é bem maior do que nas coberturas pesadas, pois as telhas são muito finas, fazendo com que a temperatura superficial interna quase se iguale com a superficial externa.

Em Beer-Sheba (Israel), num estudo com telhas de cimento vermelhas sobre casas com forro de gesso¹⁸, obteve-se uma redução de 3,5°C às 13 horas, na temperatura do forro, com a pintura das telhas com tinta branca.

Na África do Sul, uma pesquisa nas temperaturas alcançadas por chapas de ferro galvanizadas, pintadas com diferentes cores⁴⁴, mostrou o seguinte: quando preta, atingia 70°C; vermelha, 63°C; cor natural, 60°C; alumínio, 51°C; creme, 48°C; e branca, 44°C.

No Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), foi realizado um estudo comparativo entre coberturas de fibrocimento e de barro, ambas com forro⁴⁵. A cobertura de fibrocimento pintada de branco mostrou um desempenho melhor do que uma cobertura de barro em sua cor natural.

Deve-se salientar, todavia, que os problemas de manutenção de uma cor branca são os mesmos citados anteriormente (vide item 2.1.1). Cabe, assim, uma comparação e, até mesmo, uma associação com outros métodos, como os que seguem, para que seu desempenho seja melhorado.

2.2.1.2. Emissividade inferior da telha e superior do forro

Sendo a transmissão de calor entre a telha e o forro principalmente por radiação⁴⁴, a manipulação de suas emissividades é uma forma eficaz de reduzir a entrada de calor. A colocação de alumínio polido na superfície superior do forro é uma solução que fica totalmente inviabilizada pelo acúmulo

de pó, que com o tempo eliminaria o poder reflexivo do mesmo. Já a colocação deste material na face inferior do telhado (preso nas terças) não sofreria o problema do pó, pelo menos na face inferior. Na Austrália, é comum o uso de papel alumínio na face inferior do telhado, com o lado polido para baixo. Entretanto, esta prática apresenta o problema da degradação do alumínio sob certas condições de umidade⁴⁴.

Um estudo realizado na África do Sul, em telhados de ferro galvanizado corrugado e forro de gesso¹⁹, mostrou que a colocação de material reflexivo no ático equivalia a um isolamento de 7,5 cm de lã de rocha.

Robert e Thirst³⁹, em pesquisa realizada na Grã-Bretanha, com um ático em escala reduzida, sugerem o uso de lâminas reflexivas em suas superfícies internas. Aconselham também o uso, em áticos sem ventilação, de uma estrutura em "T" invertido, pendurada na cumeeira, causando assim não só um sobreamento nas trocas por radiação, como também uma inibição das correntes convectivas.

2.2.1.3. Ventilação do ático

A eficiência deste método está diretamente ligada à cor externa da telha. Embora a principal troca no ático seja realizada por radiação - a qual não é afetada diretamente pela ventilação - este recurso possibilita uma diminuição da temperatura superficial interna da telha, causando assim uma diminuição no fluxo térmico para o forro.

No estudo de Beer-Sheba, citado anteriormente, com telhas de cimento vermelhas, foi analisada também a ventilação natural do ático. Mesmo em condições incomuns de ventilação, a redução na temperatura do forro foi de apenas 0,5°C. Van Straaten⁴⁴ (África do Sul), porém, estudando a ventilação mecânica em um ático sob cobertura de ferro galvanizado corrugado e forro de cimento amianto, obteve uma diminuição de 3°C na temperatura do forro. Givoni¹⁸, comparando estes estudos,

conclui que, à medida em que a telha torna-se mais fina, sua capacidade térmica menor e a estanqueidade do ar maior, o efeito resfriador da ventilação torna-se mais pronunciado. Deve-se considerar também a cor externa da telha, pois, quanto mais escura, maior será a diferença entre a temperatura interna da telha e a do ar de ventilação, aumentando assim a eficiência da mesma.

Dutt e Harrje¹⁶, num trabalho sobre eficácia de ventilação forçada em áticos (New Jersey, USA), em casas com isolamento de forro de $1,94 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ e $5,29 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, chegaram à conclusão de que a ventilação forçada gastava mais energia do que reduzia a carga térmica do forro. Afirmam ainda que, mesmo que a resistência térmica do forro fosse menor, ao invés de ventilação forçada seria mais vantajoso, em termos de custo-benefício, aumentar o isolamento. Grot e Siu²⁰, Burch e Treado¹⁰, Brewster e Arkfeld⁸ igualmente concluíram não haver vantagem no uso de ventilação forçada no ático.

Um estudo realizado pelo IPT (São Paulo) em telhados de barro²³ mostrou que a ventilação é prejudicial, pois elimina o efeito inercial. Entretanto, outro trabalho realizado pela mesma instituição⁴⁵ demonstra que a ventilação em telhados de fibrocimento é uma solução vantajosa.

Conclui-se, desta forma, que a ventilação só é necessária em telhados com telhas de baixa resistência térmica e impermeáveis ao ar (fibrocimento, alumínio, ferro galvanizado) e, como discute Rivero⁴¹, a sua função fundamental é evitar o superaquecimento do ar do ático no verão e reduzir a condensação no inverno.

2.2.1.4. Resistência térmica da telha e do forro

A resistência térmica das telhas de uso corrente é consideravelmente baixa. Já a do forro varia muito entre os produtos oferecidos no mercado, restando ainda, conforme o desempenho exigido, a possibilidade de suplementação com cama-

das de material isolante. Convém ressaltar que a melhora obtida, embora proporcional, varia de forma não linear com a espessura do isolante, chegando a um ponto que os aumentos de espessura não trazem melhora alguma. Sendo assim, o cálculo da espessura ideal de isolante é de grande importância econômica.

Wetherington⁴⁷, em estudos de temperaturas no interior de áticos na Flórida (USA), conclui que, de uma maneira geral, o isolamento do forro é provavelmente mais valioso do que a ventilação do ático, cor e textura externa do telhado. Entretanto, esta conclusão parece ser mais apropriada em edifícios condicionados artificialmente.

2.2.1.5. Resfriamento por evaporação

Mantendo-se as telhas molhadas, grande parte da energia solar incidente será gasta na evaporação desta água, podendo-se inclusive obter um resfriamento do ambiente. Cheema¹¹, em pesquisa realizada na Paraíba, com telhado de barro (colonial) sem forro, obteve, através de um sistema gotejador de água, a diminuição de 2°C na temperatura interna durante o dia e 4°C durante a noite. Porém, como já mencionado anteriormente, nas zonas onde este método seria útil, a água geralmente é escassa e cara, tendo-se pois, como ponto negativo, o custo de manutenção do sistema.

2.2.2. Coberturas leves sem forro

Os telhados sem forro são muito comuns nas habitações de baixo custo. Os fatores primordiais para o condicionamento do clima interno são o tipo de telha e sua cor externa.

É conveniente salientar que, em noites claras, devido ao rápido resfriamento por radiação para o céu, as temperaturas internas cairão muito durante a noite e, conseqüentemente, ocorrerá o problema de condensação na parte inferior da telha.

DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DA BANCADA

3. DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DA BANCADA

Atualmente, existem muitos poucos métodos para determinação da qualificação térmica de cobertura. O mais conhecido entre estes, o teste padronizado para a obtenção do coeficiente global de transmissão de calor ("U"), além de apresentar valores incongruentes com aqueles registrados na prática (Anderson⁴), isoladamente, não permite comparações, pois, junto à resistência térmica do conjunto, também são variáveis muito importantes a absorvidade à radiação solar, as condições de ventilação da câmara de ar, a troca por radiação com o céu e a absorção de água da camada exterior da cobertura.

Frente ao exposto, constatou-se a necessidade de construção de uma bancada de testes para coberturas leves com ático, sujeita à exposição natural ao clima. Esta bancada constituiu-se basicamente de uma câmara inercial com duas coberturas, lado a lado, uma das quais foi mantida como padrão para comparações.

3.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA

Uma alvenaria de pedras de granito com altura aproximada de 1,4 m foi construída sobre um contrapiso de concreto, formando uma câmara. A partir desta alvenaria, executou-se um talude, como mostra a Figura 3.1, para aumentar a massa estabilizadora da temperatura. A adoção de uma câmara inercial deve-se ao interesse de que, durante as horas de pique da temperatura do ar e radiação solar, o fluxo térmico pelas coberturas fosse o maior possível sem condicionamento artificial. A fachada Norte foi deixada sem o talude, rebocada e pintada de branco para simular as condições normais sob um beiral para futuros estudos de ventilação.

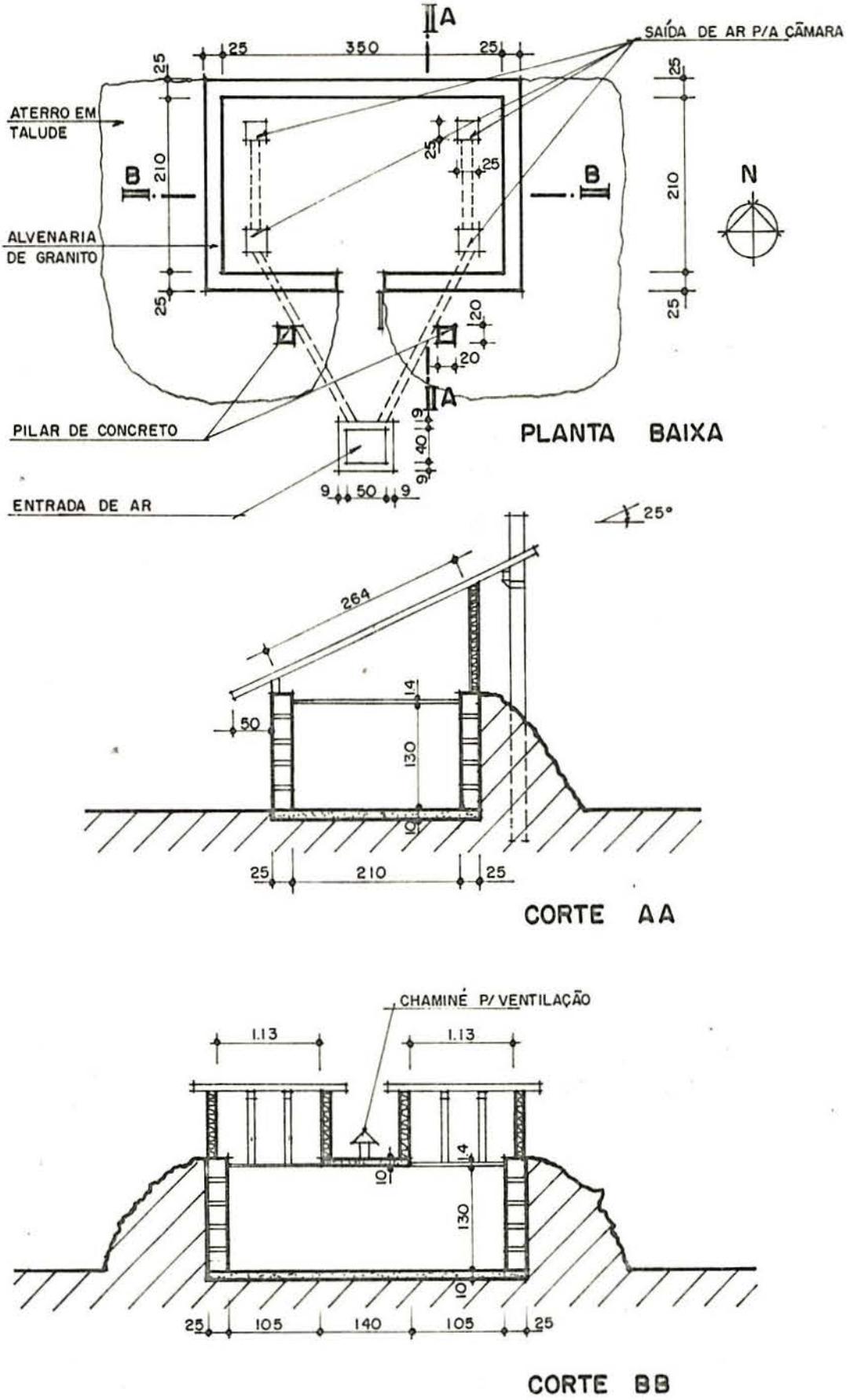


FIGURA 3.1 - Planta baixa e cortes da bancada de testes.

Sobre a câmara, foram executadas duas coberturas separadas por uma laje (Figura 3.1). Esta laje (10 cm) de concreto pouco adensado recebeu sombreamento adicional através de telhas de barro colocadas em sua superfície, de forma que sua influência no clima interno não fosse significativa.

O madeiramento das coberturas forma um quadro rígido, que permite a mudança do tipo de telha com pequenas alterações. Este quadro está ligado à cinta de amarração da alvenaria através de dobradiças, permitindo assim a fácil mudança de inclinação. Para tal, é necessário apenas a troca dos oitões e da altura da viga de apoio da cobertura.

A orientação das coberturas foi Norte para que se contasse com a maior carga solar possível.

Os oitões foram executados com 10 cm de isopor e revestidos com compensado (1,2 cm) nas duas faces. O lado externo foi pintado de branco e o interno revestido com lâmina de alumínio. Aqueles localizados nos lados Leste e Oeste da bancada receberam sombreamento adicional com telhas de cimento amianto, devido à forte radiação solar incidente. Desta forma, pode-se considerar desprezível a entrada de calor pelos oitões. A ligação entre estes e as telhas foi executada com solo cimento, de maneira a garantir a estanqueidade ao ar.

O forro das duas coberturas foi feito com chapas de compensado (1,4 cm), com filme plástico, que o torna impermeável, desvinculando então a resistência térmica da umidade.

Com o intuito de evitar a estratificação e retirar o excesso de umidade, foi executado um sistema de ventilação para a câmara. Esta realiza-se através de manilhas subterrâneas, que trazem o ar de um local sombreado ao sul da bancada. A exaustão ocorre por intermédio de duas chaminés de tiragem regulável na laje que separa as duas coberturas.

A câmara possui uma porta no Sul, que permite o acesso para colocação da instrumentação.

Os instrumentos empregados foram os que seguem abaixo:

- 2 termômetros digitais, marca ECI²⁷, com 11 canais, utilizando transistores como transdutores, incerteza de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$;
- 1 anemômetro de conchas, marca King Marine, divisão de escala de 1 m/s;
- 1 indicador de direção do vento;
- 1 piranômetro (construído pelo Grupo de Energia Solar da UFRGS);
- 1 balança, sensibilidade 0,5 g;
- 1 registrador gráfico de força eletromotriz com 12 canais.

Para as medições de temperatura, optou-se pelo transistor como transdutor não só pela boa precisão ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$), como também pela perfeita adaptabilidade para medidas de temperaturas superficiais (Figura 3.2).

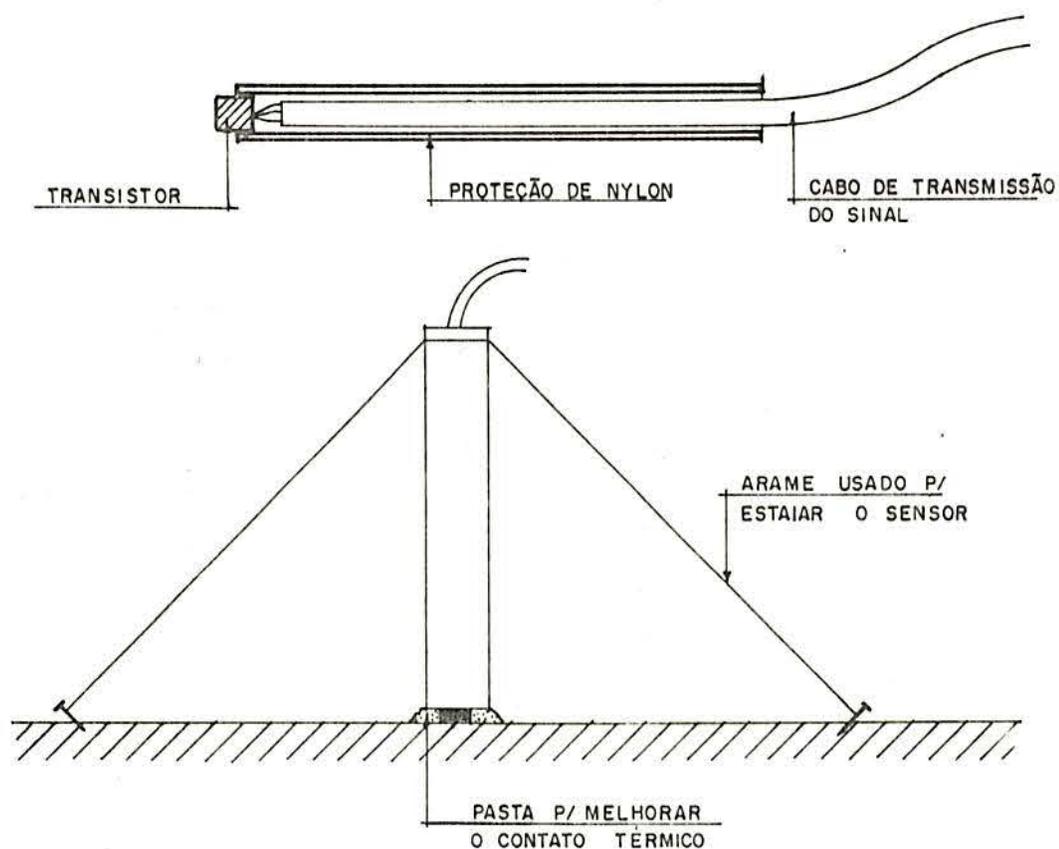


FIGURA 3.2 - Detalhe do sensor de temperatura e da colocação de um sensor para uma medida de temperatura superficial.

A temperatura interna da câmara foi medida sob o forro com o sensor colocado à meia altura em relação ao pé direito e na vertical que passa pelo centro do forro. Utilizou-se termômetro de globo com proteção contra a radiação do forro (Figura 3.3), visando criar um índice do ambiente interno para futuro uso no modelo matemático. Ao invés do globo de 15 cm de diâmetro, optou-se por um globo de 3,8 cm, como sugerido por Humphreys²¹, que possui resposta mais rápida e, para ambientes com pouca assimetria térmica ($TAR - TRM < 5^{\circ}C$), não mostra diferença significativa em relação ao globo grande.

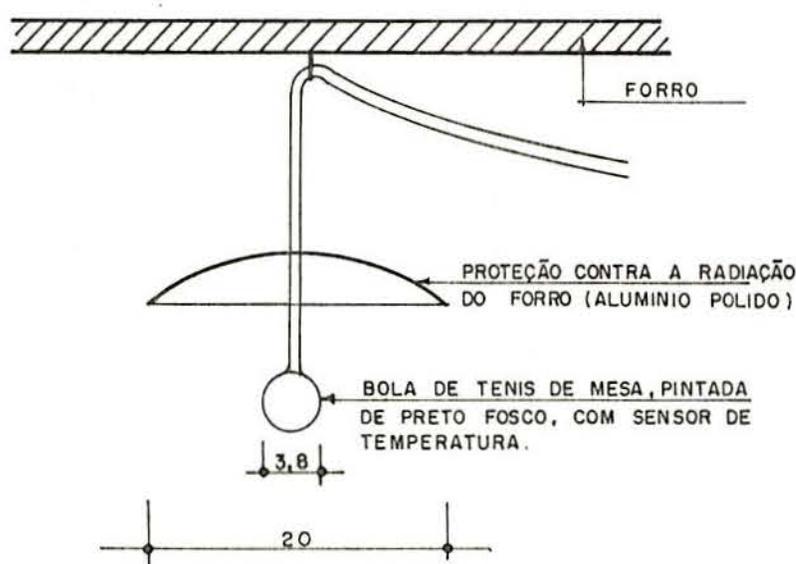


FIGURA 3.3 - Detalhe do termômetro de globo.

A cobertura Oeste foi mantida como padrão durante os ensaios, e as suas características são as seguintes:

- telha: barro, tipo Marselha (francesa);
- cor externa: normal da telha (vermelha);
- inclinação: 25° ;
- ventilação do ático: somente microventilação natural pelas frestas entre as telhas.

As características específicas da telha estão listadas abaixo:

- origem: cerâmica Aita;

- montagem: 16,34 telhas/m²
 - . proporção de sobreposição em relação à área (Figura 3.4):
 - 40% telha simples
 - 55% telha dupla (sobreposição transversal e longitudinal)
 - 5% telha dupla com ripa
- propriedades físicas ensaiadas (ver Anexo II):
 - . volume = 1.242 cm³
 - . densidade = 1.542 kg/m³
 - . absorção máxima de água = 37,14% (por volume)

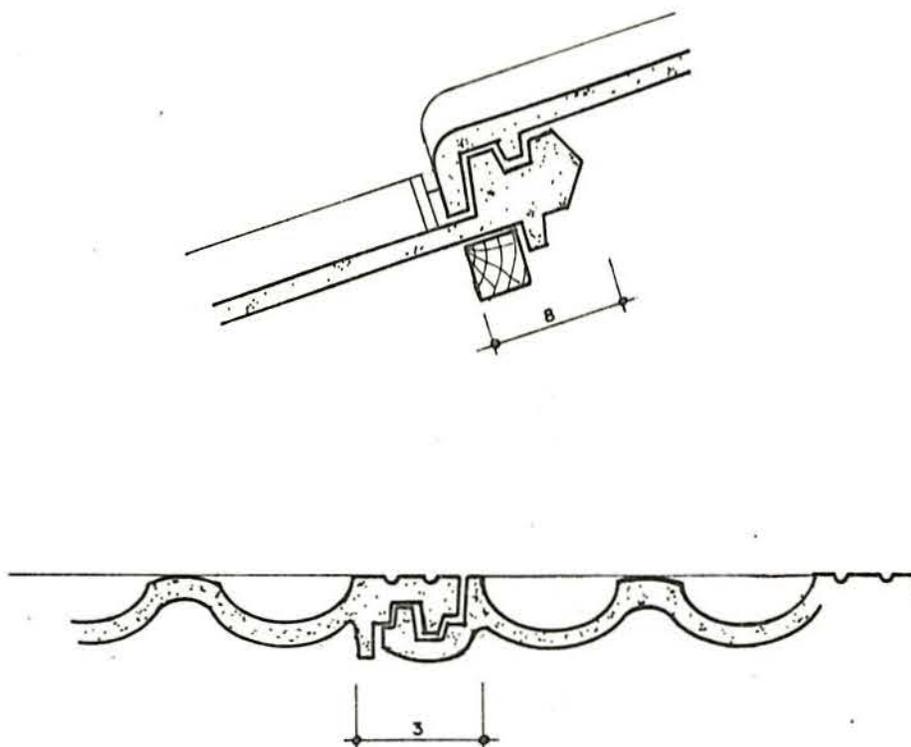


FIGURA 3.4 - Detalhe das sobreposições de montagem da telha

3.2. METODOLOGIA EMPREGADA

Para testar a operacionalidade da bancada, realizaram-se quatro testes de dois dias cada. O primeiro constituiu-se em um levantamento de controle, no qual as duas cober

turas foram mantidas idênticas. O objetivo básico deste teste foi provar a igualdade das duas coberturas no que diz respeito às condições de exposição ao clima. No segundo ensaio, uma lâmina de alumínio polido foi colocada na superfície inferior do telhado Leste. No terceiro, manteve-se esta lâmina de alumínio e pintou-se a superfície externa das telhas do mesmo telhado de branco. No último teste, a lâmina de alumínio foi retirada, sendo mantidas, porém, as telhas brancas.

Nas quatro etapas de experimentação, as grandezas medidas, sua periodicidade e locais de medição foram os abaixo citados:

- temperatura: medida em diversos pontos, variáveis conforme o teste, com periodicidade de 30 min, durante o dia (das 6 às 19 h), e graficação contínua de 10 canais, durante a noite;

- velocidade do vento: medida em altura equivalente à da cumeeira da cobertura, com periodicidade de 30 min durante o dia;

- direção do vento: observada também em altura equivalente à da cumeeira da cobertura, com periodicidade de 60 min durante o dia;

- radiação solar: medida a uma inclinação igual à do telhado, com graficação contínua no registrador (radiação direta + difusa);

- peso úmido da telha: medida em 3 amostras, com periodicidade de 60 min durante o dia.

É importante salientar que, por não haver disponibilidade de um registrador compatível com a precisão requerida para a operação da bancada, tornou-se necessária a entrada do operador no interior da câmara para leitura e registro das temperaturas levantadas. Cada abertura de porta ocasionava uma pequena entrada de ar exterior, geralmente mais quente, alterando assim as condições inerciais da câmara.

Frente ao acima exposto, atualmente encontra-se em desenvolvimento um sistema de aquisição de dados, com gravação em fita cassete (Lamberts e Aroztegui²⁷), visando um maior aprimoramento da bancada. Isto viabilizará o trabalho de um volume de dados ainda maior, que, através de uma análise estatística, possibilitará uma qualificação das coberturas de uso corrente, facilitando assim a normalização na área.

Para quantificar a melhora no desempenho térmico obtido com cada uma das modificações executadas na cobertura Leste, foi criado um índice (L) que permitisse a análise comparativa entre as diversas situações, mesmo que em dias diferentes. O índice engloba todas as variáveis climáticas através da resposta originada na cobertura padrão.

O índice criado seria, então, a relação percentual entre o fluxo que entra pelo forro da cobertura modificada e o fluxo na cobertura padrão.

$$L = \frac{q_{\text{for}}}{q_{\text{cob}}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 1})$$

onde q_{for} = fluxo no forro da cobertura modificada;

q_{cob} = fluxo na cobertura padrão.

Na análise dos resultados, observou-se um atraso de meia hora na resposta do forro em relação à excitação externa. Desta forma,

$$L = \frac{\Delta T_{\text{for}}^{t+a} \cdot K_{\text{for}}}{\Delta T_{\text{cob}}^t \cdot K_{\text{cob}}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 2})$$

onde $\Delta T_{\text{for}}^{t+a}$ = diferença entre a temperatura superficial superior e inferior do forro ($T_{\text{SF}_m} - T_{\text{IF}_m}$) (Figura 3.5), no instante $t+a$, onde "a" é o atraso considerado;

ΔT_{cob}^t = diferença entre a temperatura superficial superior da cobertura e a inferior do forro ($TST_p - TIF_p$) (Figura 3.5);

K_{for} = condutibilidade térmica do forro de superfície a superfície;

K_{cob} = condutibilidade térmica da cobertura, da superfície superior da telha à superfície inferior do forro.

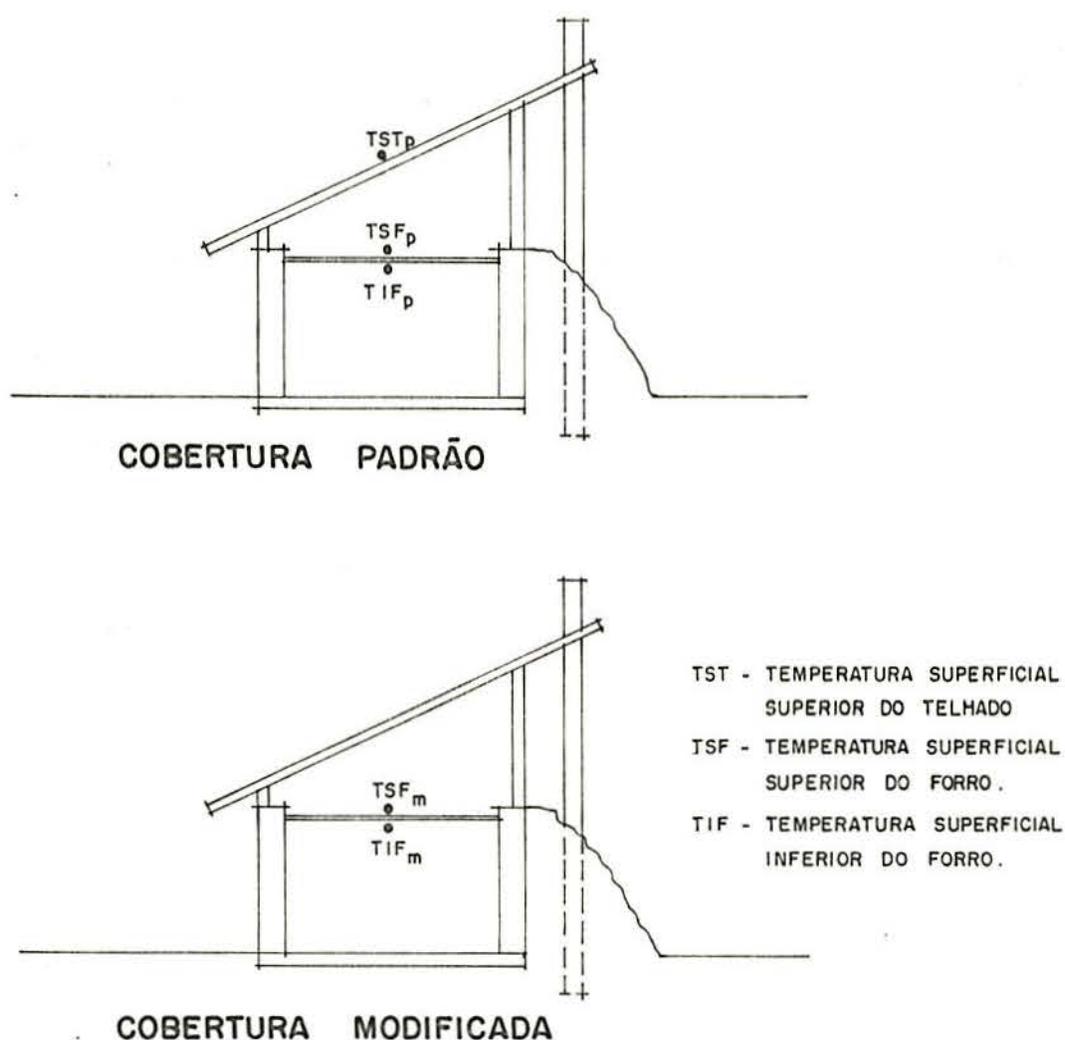


FIGURA 3.5 - Localização das temperaturas utilizadas no cálculo do índice L.

Sendo K_{for} uma constante, não havendo disponibilidade de equipamento para medi-la e, tampouco, existindo concordância entre os valores encontrados na bibliografia, o índice L foi resumido. Assim,

$$L = \frac{\Delta T_{\text{for}}^{t+a}}{\Delta T_{\text{cob}}^t} \cdot 100 \quad (\text{eq. 3})$$

O valor assumido por este índice será tanto menor quanto melhor for o desempenho térmico da cobertura. Assim, torna-se viável a comparação entre as mais diversas coberturas leves com ático.

Adotou-se como referência a telha de barro francesa, por constituir-se esta no material de cobertura mais difundido em nosso meio. Esta escolha poderá ser modificada sem que, com isto, o método perca sua validade.

Utilizou-se, nas comparações, um índice médio (\bar{L}), que vem a ser a média entre os índices calculados na meia hora anterior ao pique de ΔT_{cob} , no pique e na meia hora posterior ao mesmo.

O índice L , como definido acima, foi calculado para cada uma das coberturas modificadas ($L(m)$). Calculou-se também o índice L para a cobertura padrão ($L(p)$), sendo, neste caso, $\Delta T_{\text{for}}^{t+a}$ e ΔT_{cob}^t valores da mesma cobertura. Desta maneira, além do índice padrão para comparações, foi obtida uma avaliação da condutibilidade térmica da cobertura padrão, pois $q_{\text{for}} = q_{\text{cob}}$ (para uma mesma cobertura, considerando estado estacionário). Logo,

$$K_{\text{cob}} = \frac{\Delta T_{\text{for}}^{t+a}}{\Delta T_{\text{cob}}^t} \cdot K_{\text{for}} \quad (\text{eq. 4})$$

Como K_{for} é constante e o índice L é a relação entre os ΔT multiplicada por 100, também uma constante, obtém-se uma idéia do comportamento do K_{cob} (padrão) sob diferentes condições climáticas, através dos valores de L . Logo,

$$K_{\text{cob}} = 100 \cdot L_{(p)} \cdot K_{\text{for}} \quad (\text{eq. 5})$$

Outro subsídio proporcionado pela bancada de testes foi a possibilidade de avaliação do K_{cob} das coberturas modificadas. Esta estimativa foi realizada com base na equação 4 e em um K_{for} calculado como segue:

$$K_{\text{for}} = \frac{k}{e} \quad (\text{eq. 6})$$

onde k = condutibilidade térmica do material do forro (compensado);

e = espessura do forro.

Obtiveram-se, assim valores de K_{cob} para cada dia e para cada cobertura. A relação $\Delta T_{\text{for}}/\Delta T_{\text{cob}}$ (eq. 4) foi calculada para três instantes sucessivos de tempo e realizada a média entre estes valores, à semelhança da metodologia empregada na obtenção do índice médio (\bar{L}). No caso da cobertura padrão, adotou-se a equação 5.

A umidade das telhas foi analisada com base na fórmula abaixo:

$$UT = \frac{P_m - P_s}{\text{VOLT}} \quad (\text{eq. 7})$$

onde P_m = peso medido;

P_s = peso seco;

VOLT = volume da telha.

Para o cálculo da energia gasta na evaporação da água contida nas telhas durante o dia, seguiu-se o seguinte raciocínio. Supondo-se que a água a ser evaporada estivesse a 20°C, o calor latente de vaporização (C.L.V.) seria 2.454 KJ/Kg (Duffie e Beckman¹⁵). Assim,

$$\text{C.L.V.} = 2.454 \text{ KJ/Kg} = 2.454 \text{ J/g} = 0,682 \text{ Wh/g}$$

Pode-se, então, calcular a energia gasta na evaporação por metro quadrado de telhado (EEVAP):

$$EEVAP = \Delta Ph \cdot 16,34 \cdot 0,682 \quad (\text{eq. 8})$$

sendo ΔPh = diferença entre o máximo e o mínimo peso úmido da telha (g);

16,34 = número de telhas por metro quadrado;

0,682 = calor latente de vaporização (Wh/g).

Logo,

$$EEVAP = 11,14 \cdot \Delta Ph \quad (\text{Wh/m}^2). \quad (\text{eq. 9})$$

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Teste 1 - Controle (18 e 19 de fevereiro de 1983)

Com o intuito de provar a igualdade das duas coberturas no que diz respeito às condições de exposição ao clima e fazer uma análise dos dados mais importantes a serem levantados posteriormente, realizou-se um levantamento com as duas coberturas em iguais condições quanto a material, inclinação e situação de ventilação do ático.

Sendo as condições de exposição ao clima idênticas, deveriam ser obtidos resultados iguais nas duas coberturas em relação aos seguintes parâmetros:

- temperatura do ar nos áticos;
- temperatura superficial interna nos oitões Leste e Oeste;
- temperatura do ar interior sob cada forro;
- densidade de fluxo nos dois forros.

Neste teste, os sensores de temperatura foram dispostos conforme demonstra a Figura 3.6.

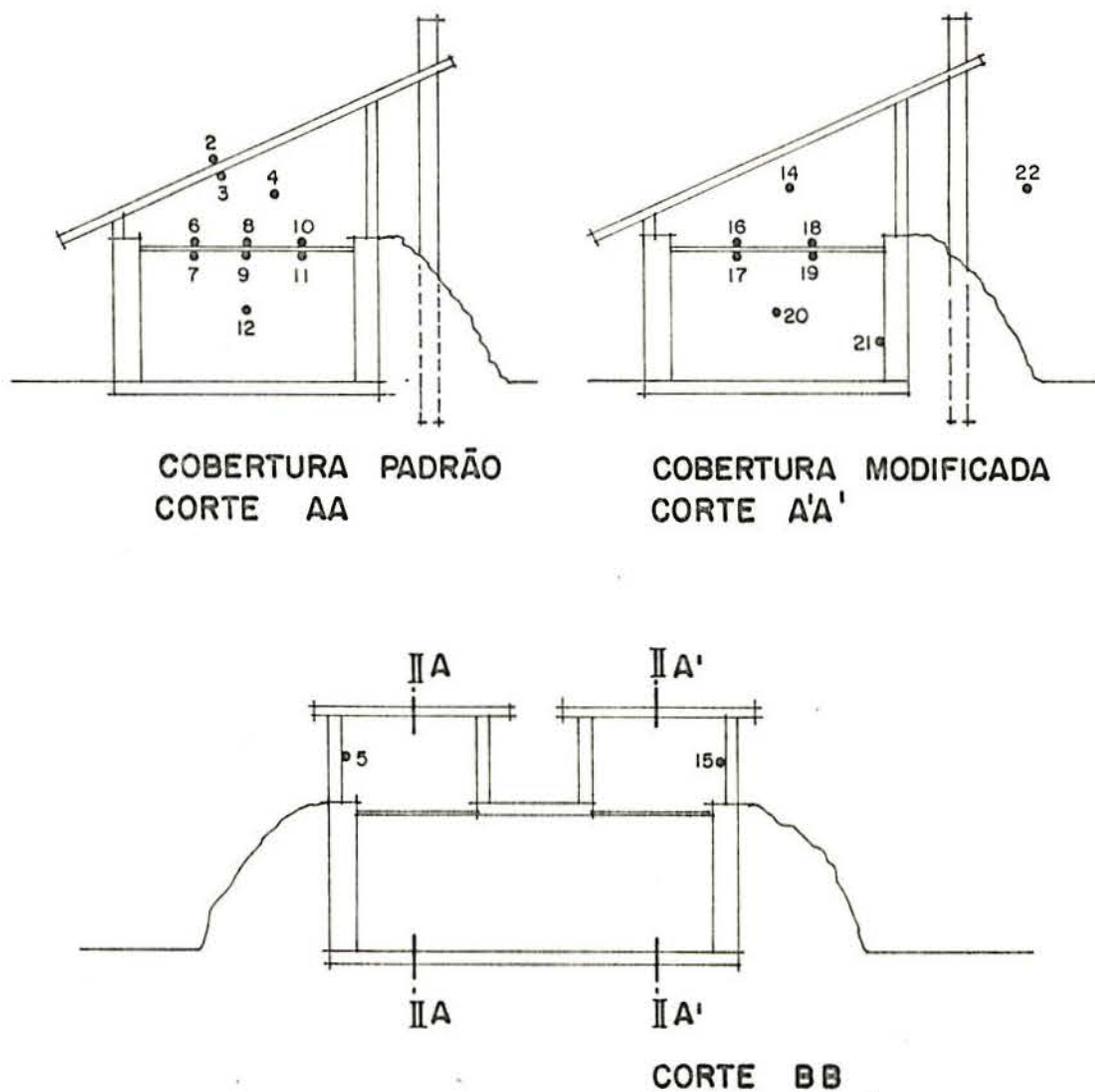


FIGURA 3.6 - Disposição dos sensores de temperatura no teste 1.

A Tabela 3.1 foi construída com base nos levantamentos diurnos. Cabe salientar que, sendo a incerteza das leituras do termômetro de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, quando se trabalha com diferenças entre medidas, este valor, devido à propagação desta incerteza, transforma-se em $\pm 0,28^{\circ}\text{C}$.

TABELA 3.1 - Análise das diferenças de 30 em 30 min entre duas temperaturas

Dia	Ar no ático		Oitões E-O		Ar interior	
	T14 ^t	T4 ^t	T15 ^t	T5 ^t	T20 ^t	T12 ^t
18.02	19.02	18.02	19.02	18.02	19.02	
\bar{d}	0,04	0,14	0,00	0,22	0,02	0,17
d_{\max}^+	0,5	0,7	0,8	0,7	0,3	0,1
d_{\max}^-	-0,7	-0,6	-0,8	-0,4	-0,2	-0,4

\bar{d} = diferença média da amostra

d_{\max}^+ = diferença máxima positiva

d_{\max}^- = diferença máxima negativa

Pode-se verificar que, embora as médias se situem dentro da incerteza de medida, os valores máximos, positivos e negativos, não o estão. Se fosse adotado como incerteza de medida para comparações o valor de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, seriam abrangidas 96% das diferenças apresentadas na amostra de temperaturas do ar do ático, 82% das diferenças das temperaturas dos oitões e 100% das diferenças nas temperaturas do ar interior sob os forros. Como a temperatura dos oitões não exerce uma influência marcante (devido a baixa emissividade) no fluxo passante pelo forro, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ parece ser um bom valor para a incerteza.

Em relação à análise da densidade de fluxo térmico nos diversos pontos dos dois forros, pode-se afirmar que esta varia somente com a diferença de temperatura das duas faces ($q = \Delta t \cdot k/l$), pois tanto o "k" do forro na faixa de temperatura considerada quanto a espessura são constantes.

Na cobertura Oeste, mediram-se as temperaturas superficiais do forro em três pontos e, na cobertura Leste, em dois pontos, como pode ser constatado na Figura 3.6. Na cober

tura Oeste, os dois pontos mais próximos ao frechal (6-7 e 8-9) não apresentaram diferença. O terceiro ponto (10-11), entretanto, apresentou valores de Δt mais baixos.

Para confrontar os dois forros, comparam-se os Δt máximos e mínimos de um forro com o outro (Tabela 3.2).

TABELA 3.2 - Análise das diferenças entre os Δt dos dois forros

	$\Delta t_{\max E} - \Delta t_{\max O}$		$\Delta t_{\min E} - \Delta t_{\min O}$	
	18.02	19.02	18.02	19.02
\bar{d}	0,14	0,20	0,15	0,17
d_{\max}	0,4	0,5	0,5	0,4

\bar{d} = diferença média

d_{\max} = diferença máxima

Como aqui são analisadas diferenças entre diferenças de temperaturas, a incerteza passa a $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Todavia, pode-se observar, na tabela acima, que alguns valores atingem $0,5^{\circ}\text{C}$. Recomenda-se, pois, a adoção de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ como incerteza desta diferença.

Com base nos dados acima, pode-se concluir que as condições de exposição nas duas coberturas e as respectivas respostas térmicas podem ser consideradas iguais, com uma incerteza de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas no ático e diferenças de temperaturas entre as superfícies superior e inferior do forro.

Na Figura 3.7 está representado o comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} durante os dois dias de ensaio. As principais temperaturas levantadas estão expostas na Figura 1 do Anexo I.

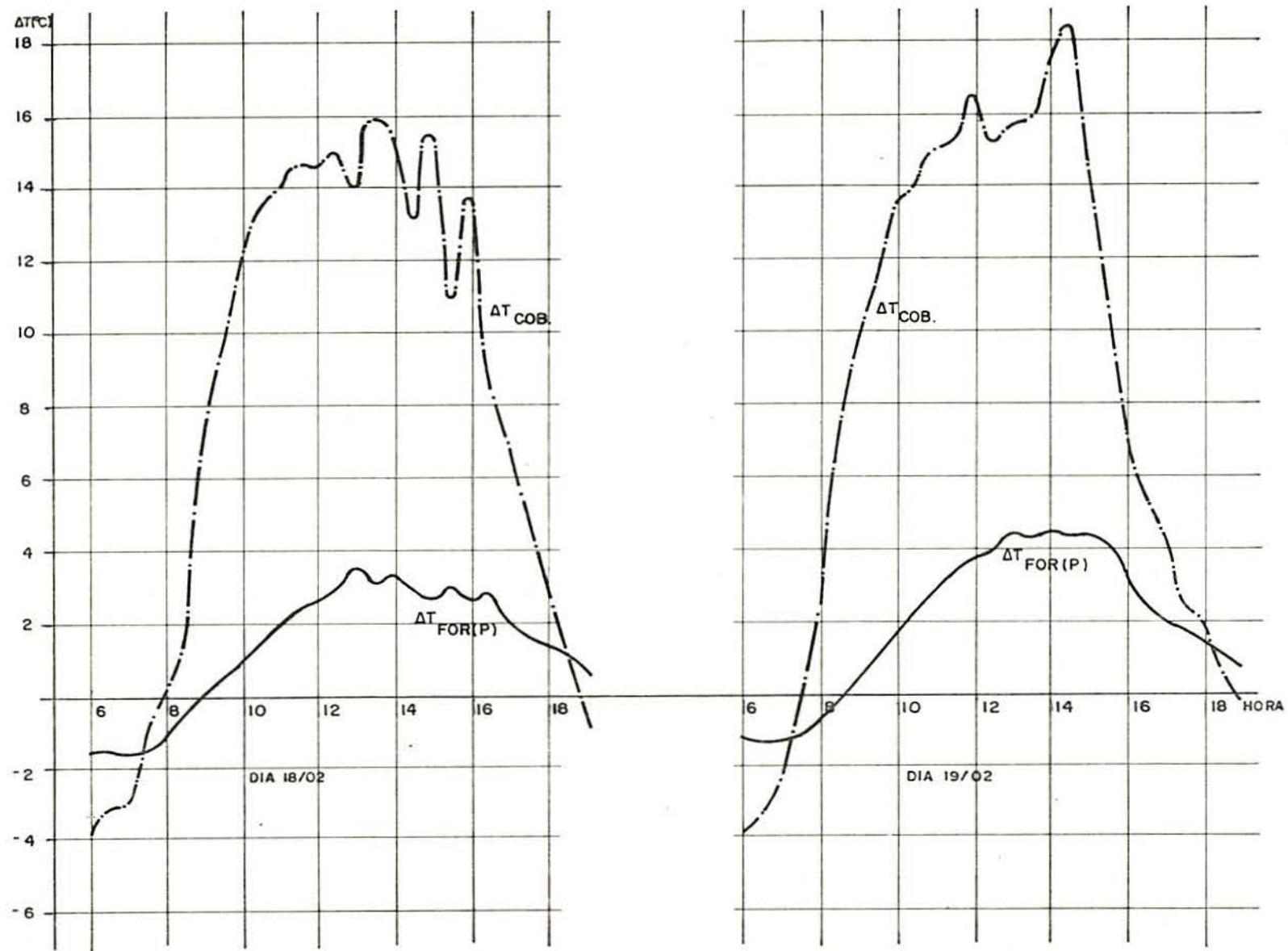


FIGURA 3.7 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - Teste 1.

O índice L da cobertura padrão foi calculado como demonstram as Tabelas 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 - Cálculo do índice L - dia 18 de fevereiro

	13:00	13:30	14:00	14:30
ΔT_{cob}	14,0	16,0	15,5	
$\Delta T_{for(p)}$		3,1	3,3	2,9
$L(p)$	22,14	20,63	18,71	
$\bar{L}(p) = 20,49$				

TABELA 3.4 - Cálculo do índice L - dia 19 de fevereiro

	14:00	14:30	15:00	15:30
ΔT_{cob}	17,3	18,6	15,4	
$\Delta T_{for(p)}$		4,4	4,4	4,1
$L(p)$	25,43	23,66	26,62	
$\bar{L}(p) = 25,24$				

3.3.2. Teste 2: Diminuição da emissividade inferior do telhado (24 e 25 de março de 1983)

Neste teste, procurou-se detectar qual a influência exercida por uma redução na troca por radiação entre o telhado e o forro no desempenho térmico da cobertura padrão. Adotou-se uma das soluções sugeridas no item 2.1.2: uma lâmina de alumínio polido (0,1 mm) foi fixada no lado inferior das ripas do telhado.

No presente e nos demais testes, os sensores de temperatura foram dispostos conforme está esquematizado na Figura 3.8.

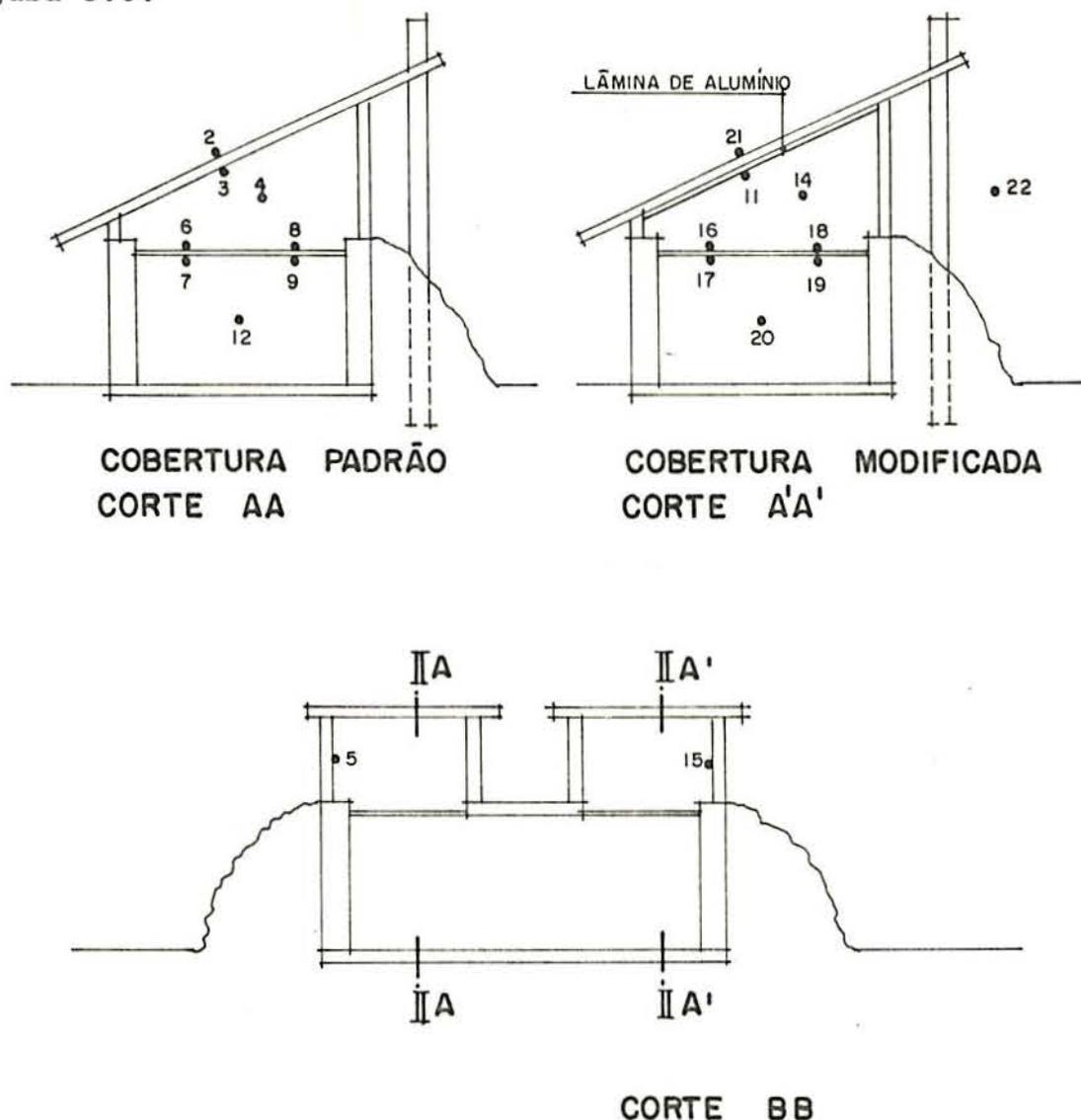


FIGURA 3.8 - Disposição dos sensores de temperatura nos testes 2, 3 e 4.

Na Figura 3.9, está representado o comportamento de ΔT_{cob} , $\Delta T_{for(p)}$ e $\Delta T_{for(m1*)}$. Como pode-se constatar, é nítida a melhora obtida com a colocação do alumínio. Nas Figuras 2 e 3 do Anexo I, estão demonstradas as variações das principais temperaturas nas duas coberturas.

*m1 = referente à modificação efetuada na cobertura Leste no segundo teste.

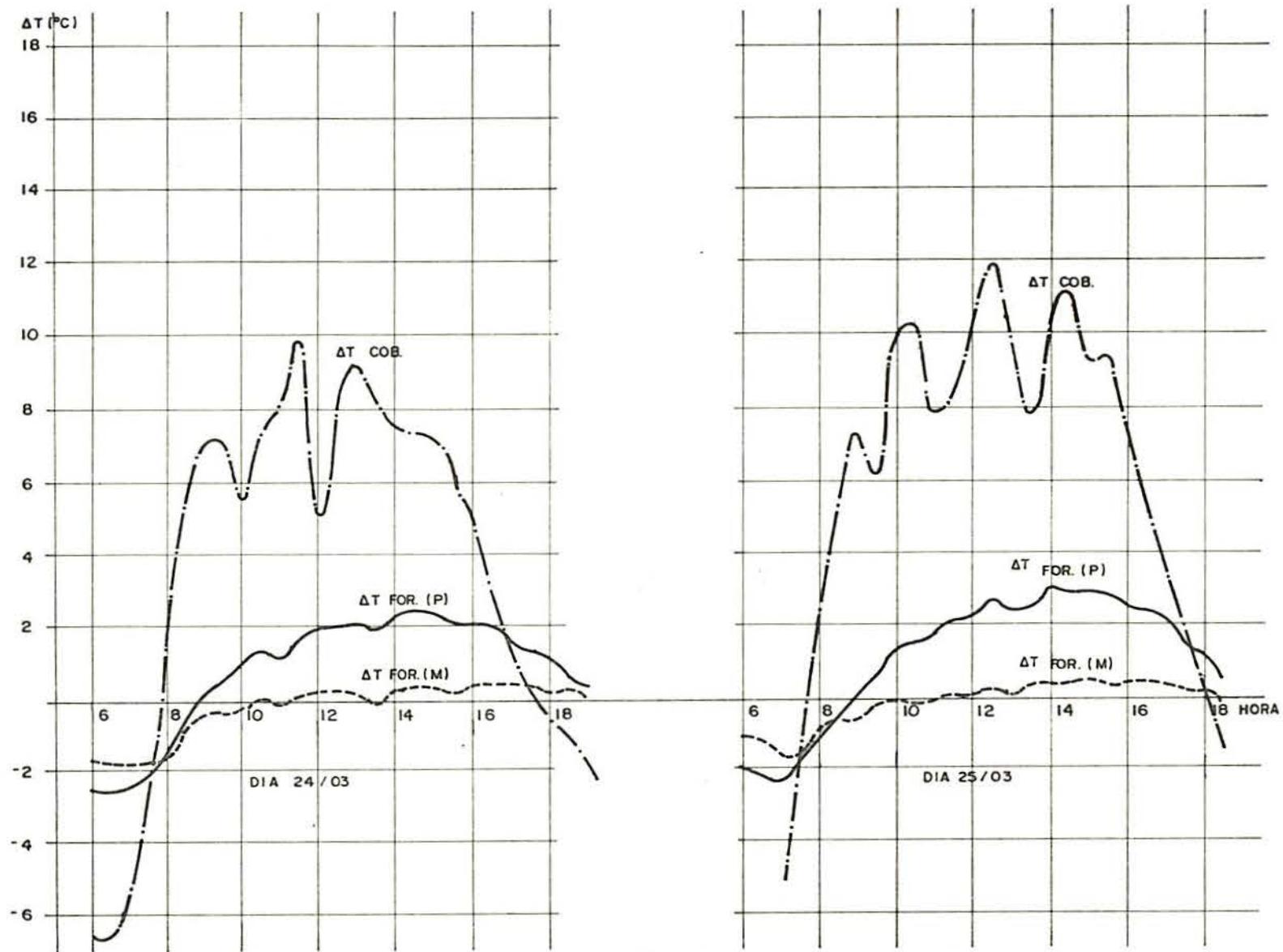


FIGURA 3.9 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - Teste 2.

Da mesma forma que no teste anterior, foi efetuado o cálculo dos índices de cada dia (Tabelas 3.5 e 3.6).

TABELA 3.5 - Cálculo do índice L - dia 24 de março

	11:00	11:30	12:00	12:30
ΔT_{cob}	8,1	9,9	5,1	
$\Delta T_{for(p)}$		1,7	2,0	2,0
$\Delta T_{for(m1)}$		0,2	0,3	0,3
$L_{(p)}$	20,99	20,20	39,22	
$L_{(m1)}$	2,47	3,03	5,88	
		$\bar{L}_{(p)} = 26,80$		
		$\bar{L}_{(m1)} = 3,79$		

TABELA 3.6 - Cálculo do índice L - dia 25 de março

	12:00	12:30	13:00	13:30
ΔT_{cob}	10,0	12,0	10,0	
$\Delta T_{for(p)}$		2,9	2,5	2,6
$\Delta T_{for(m1)}$		0,3	0,1	0,4
$L_{(p)}$	29,0	20,83	26,0	
$L_{(m1)}$	3,0	0,83	4,0	
		$\bar{L}_{(p)} = 25,28$		
		$\bar{L}_{(m1)} = 2,61$		

3.3.3. Teste 3: Diminuição da absorvância à radiação solar e da emissividade inferior do telhado (8 e 9 de abril de 1983)

Neste teste, outra modificação foi adicionada àquela da segunda etapa. Assim, a lâmina de alumínio polido já colocada na superfície inferior do telhado Leste, somou-se uma pintura branca nas telhas do mesmo. A tinta usada foi à base de cal.

A partir deste ensaio, uma das telhas utilizadas para verificação do teor de umidade foi pintada de branco, visando detectar diferenças conseqüentes no comportamento da absorção e evaporação de água (vide itens 3.3.6 e 3.4).

O comportamento de ΔT_{cob} , $\Delta T_{for(p)}$ e $\Delta T_{for(m2*)}$ está representado na Figura 3.10. As temperaturas obtidas em cada cobertura estão registradas nas Figuras 4 e 5 do Anexo I. Cabe salientar um fato ocorrido no segundo dia do teste: a cobertura modificada retirou calor do ambiente durante praticamente todo o dia.

O cálculo dos índices está esquematizado nas Tabelas 3.7 e 3.8.

TABELA 3.7 - Cálculo do índice L - dia 8 de abril

	13:00	13:30	14:00	14:30
ΔT_{cob}	12,3	13,3	13,2	
$\Delta T_{for(p)}$		3,1	3,2	2,4
$\Delta T_{for(m2)}$		0,1	0,2	0,0
L(p)	25,20	24,06	18,18	
L(m2)	0,81	1,50	0,00	
		$\bar{L}(p) = 22,48$		
		$\bar{L}(m2) = 0,77$		

*m2 = referente à modificação efetuada na cobertura Leste no terceiro teste.

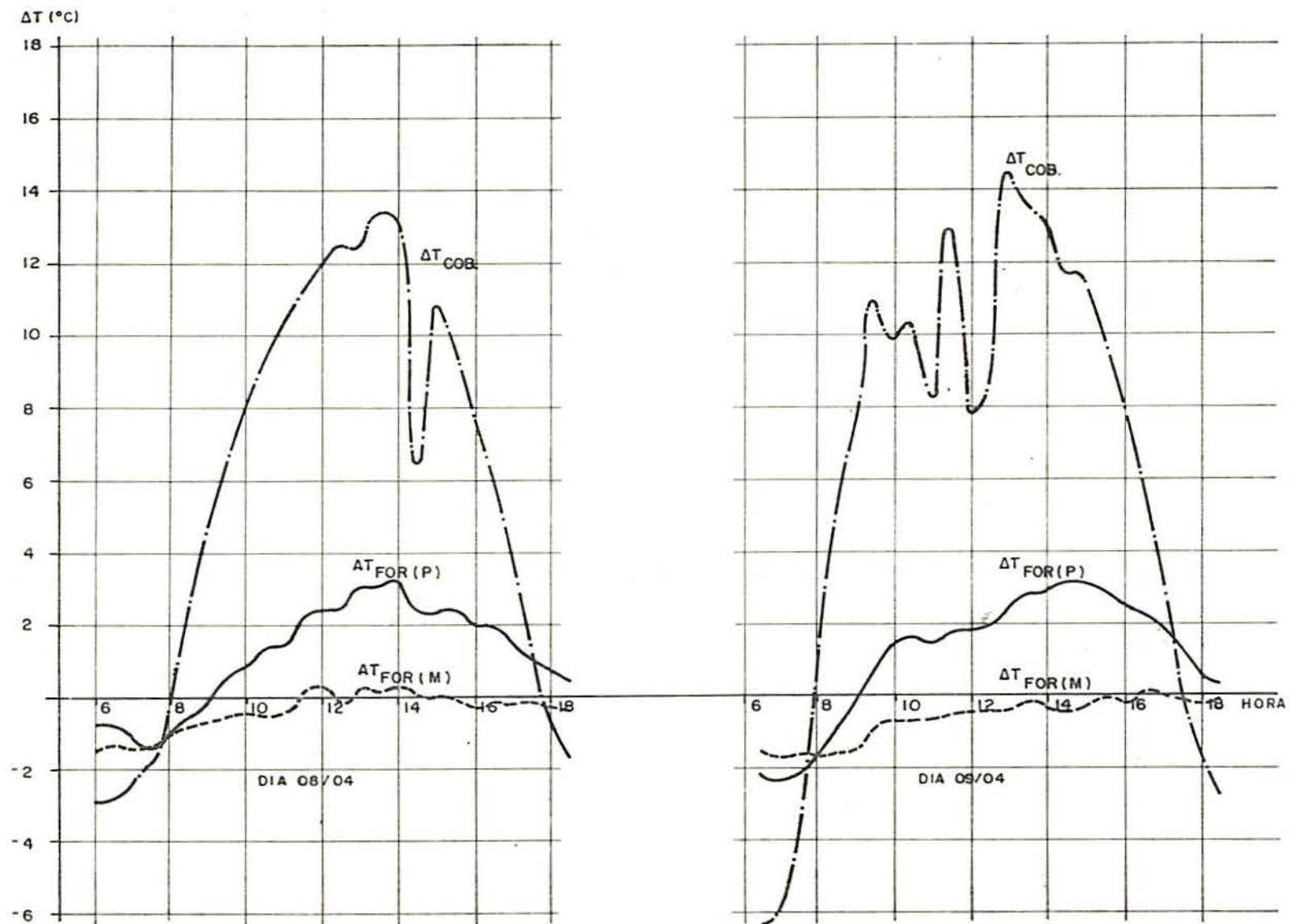


FIGURA 3.10 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - Teste 3.

TABELA 3.8 - Cálculo do índice L - dia 9 de abril

	12:30	13:00	13:30	14:00
ΔT_{cob}	8,6	14,5	13,7	
$\Delta T_{for(p)}$		2,3	2,9	2,9
$\Delta T_{for(m2)}$		-0,3	-0,1	-0,3
$L(p)$	26,74	20,00	21,17	
$L(m2)$	-3,49	-0,69	-2,19	
		$\bar{L}(p) = 22,64$		
		$\bar{L}(m2) = -2,12$		

3.3.4. Teste 4: Diminuição da absorvância à radiação solar do telhado (13 e 14 de abril de 1983)

Para a realização desta etapa, foi retirada a lâmina de alumínio polido, ficando a cobertura Leste diferente da Oeste unicamente pela cor branca.

O comportamento de ΔT_{cob} , $\Delta T_{for(p)}$ e $\Delta T_{for(m3*)}$ está representado na Figura 3.11. As temperaturas obtidas em cada cobertura estão registradas nas Figuras 6 e 7 do Anexo I.

*m3 = referente à modificação efetuada na cobertura Leste no quarto teste.

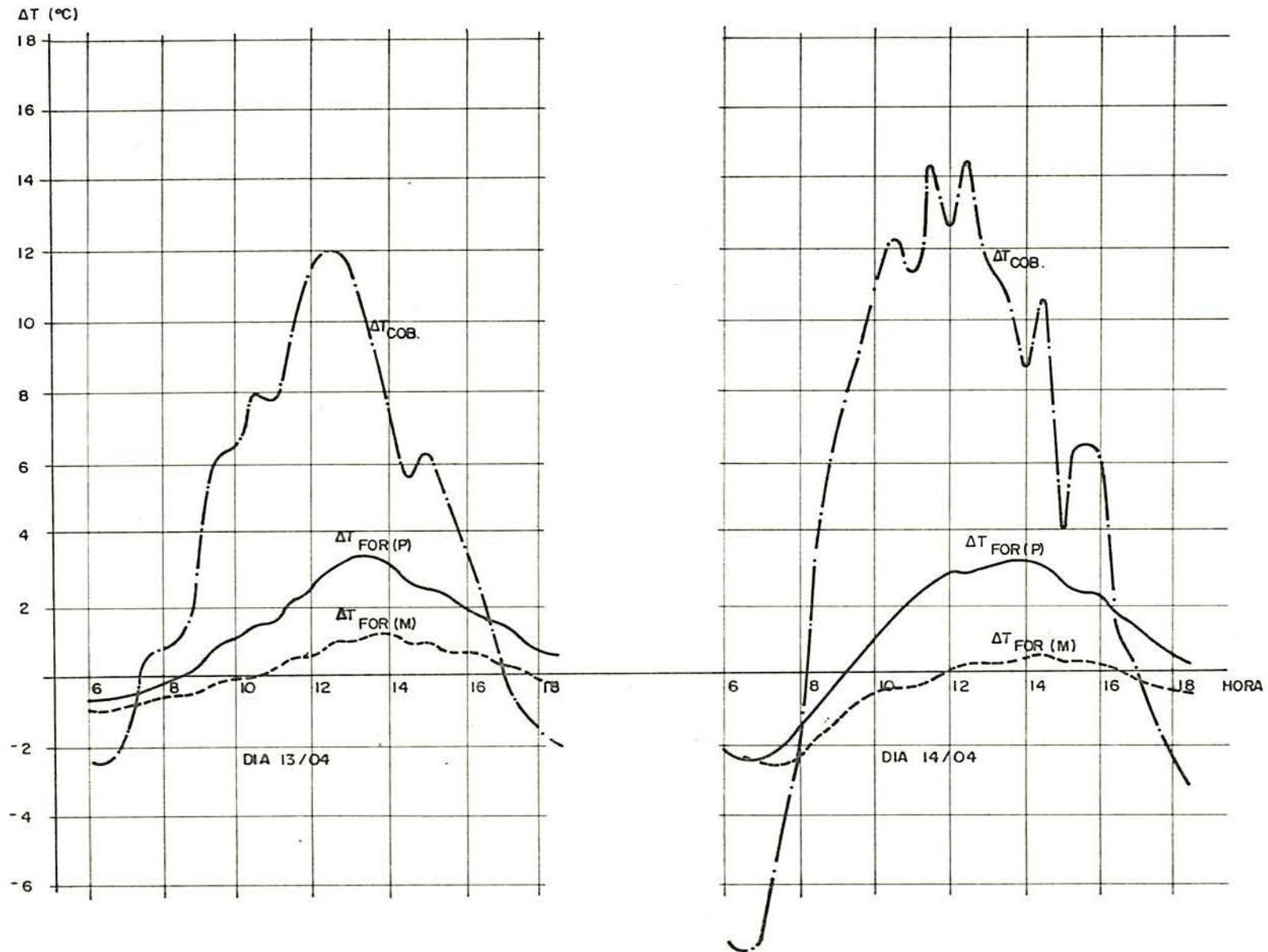


FIGURA 3.11 - Comportamento de ΔT_{cob} e ΔT_{for} - Teste 4.

As Tabelas 3.9 e 3.10 demonstram o cálculo dos índices L.

TABELA 3.9 - Cálculo do índice L - dia 13 de abril

	12:00	12:30	13:00	13:30
ΔT_{cob}	11,4	12,0	11,5	
$\Delta T_{for (p)}$		3,0	3,2	3,3
$\Delta T_{for (m3)}$		0,9	0,9	1,1
L (p)	26,32	26,67	28,70	
L (m3)	7,89	7,50	9,57	
	$\bar{L}_{(p)} = 27,23$			
	$\bar{L}_{(m3)} = 8,32$			

TABELA 3.10 - Cálculo do índice L - dia 14 de abril

	12:00	12:30	13:00	13:30
ΔT_{cob}	12,6	14,3	11,5	
$\Delta T_{for (p)}$		2,8	3,0	3,1
$\Delta T_{for (m3)}$		0,1	0,1	0,2
L (p)	22,22	20,98	26,96	
L (m3)	0,79	0,70	1,74	
	$\bar{L}_{(p)} = 23,39$			
	$\bar{L}_{(m3)} = 1,08$			

3.3.5. Cálculo da condutibilidade térmica das coberturas testadas

Seguindo a metodologia exposta anteriormente (eq. 4 e eq. 6):

$$K_{\text{cob}} = \frac{\Delta T_{\text{for}}^{t+a}}{\Delta T_{\text{cob}}^t} \cdot K_{\text{for}}$$

$$K_{\text{for}} = \frac{k}{e} = \frac{0,157^*}{0,014} = 11,21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

TABELA 3.11 - Valores calculados de K_{cob} (W/(m² . K))

	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4	
	18.02	19.02	24.03	25.03	08.04	09.04	13.04	14.04
$K_{\text{cob}}(p)$	2,30	2,82	3,00	2,84	2,52	2,53	3,05	2,62
$K_{\text{cob}}(m)$	-	-	0,33	0,26	0,17	**	1,74	0,29

Calculando-se os valores médios dos K_{cob} , com base na Tabela 3.11, teremos:

$$\bar{K}_{\text{cob}}(p) = 2,71 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\bar{K}_{\text{cob}}(m1) = 0,30 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$K_{\text{cob}}(m2) = 0,17 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\bar{K}_{\text{cob}}(m3) = 1,02 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.3.6. Umidade das telhas

A Figura 3.12 representa graficamente a variação dos valores obtidos para o percentual de água em relação ao volume da telha nos diferentes testes.

* Vide Anexo III.

**Vide Discussão, item 3.4

UMIDADE RELATIVA DO AR (%)

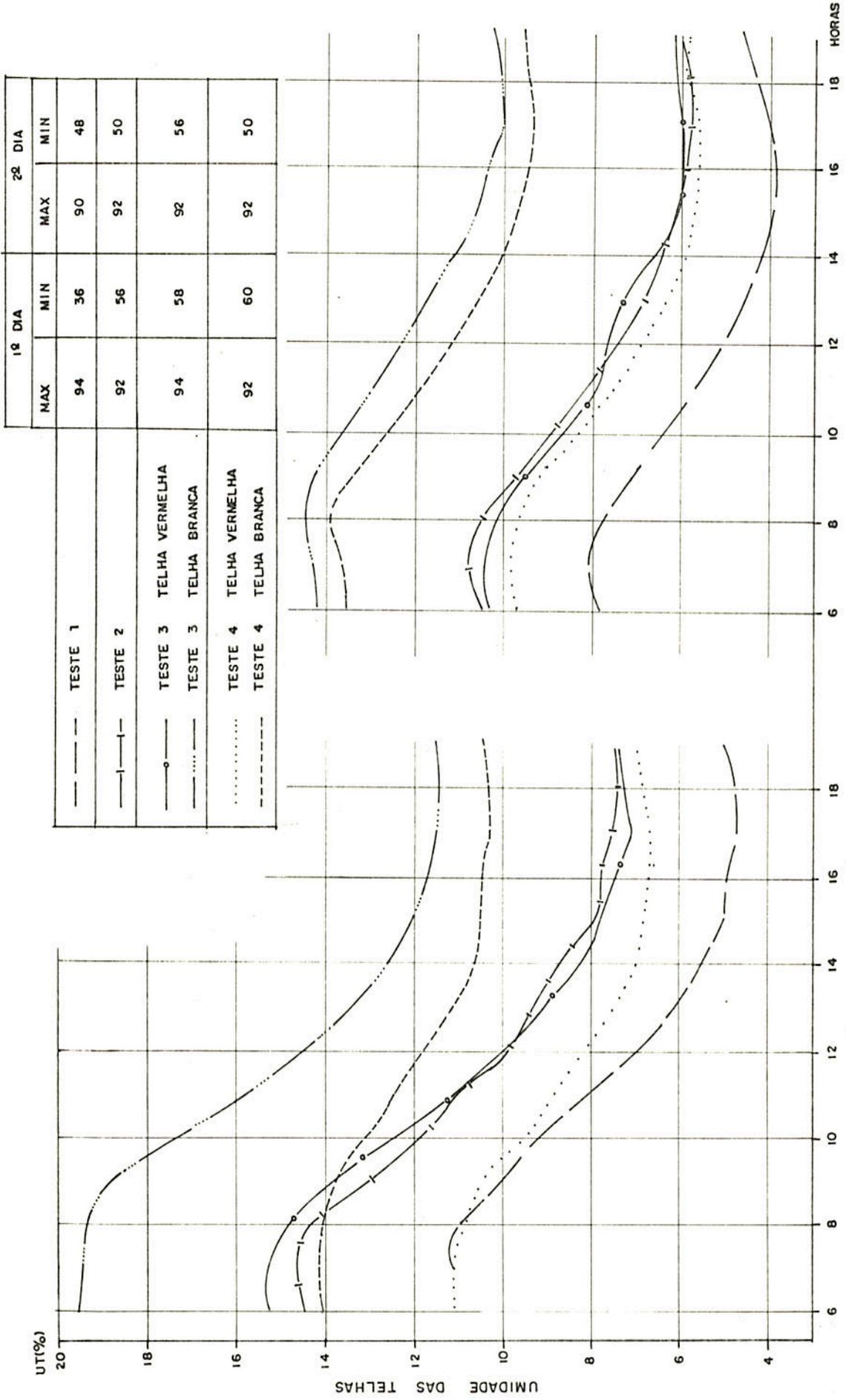


FIGURA 3.12 - Variação do conteúdo de umidade das telhas nos dois dias de cada teste.

Na tabela abaixo, estão compilados os valores estimados para a energia gasta na evaporação ocorrida nos telhados.

TABELA 3.12 - Estimativa da energia gasta na evaporação da água contida nas telhas

	Teste 1		Teste 2		Teste 3				Teste 4			
Cor da telha	Vermelha		Vermelha		Vermelha	Branca			Vermelha		Branca	
Data	18.02	19.02	24.03	25.03	08.04	09.04	08.04	09.04	13.04	14.04	13.04	14.04
EEVAP (Wh/m ²)	891	578	1.002	690	1.148	624	1.075	584	625	579	512	591
Nº de horas	10	8	11	10	10	10	12	9	9	9	10	9

3.4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A tabela abaixo compila os índices obtidos nos quatro testes.

TABELA 3.13 - Índices obtidos nos quatro testes

	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4	
	18.02	19.02	24.03	25.03	08.04	09.04	13.04	14.04
$\bar{L}_{(p)}$	20,5	25,2	26,8	25,3	22,5	22,6	27,2	23,4
$\bar{L}_{(m^*)}$	-	-	3,8	2,6	0,8	-2,1	8,3	1,1

Considerando, inicialmente, apenas os dados da cobertura padrão, pode-se concluir que o K_{COB} , apreciado indiretamente pelo índice L, não é constante de um dia para outro. Esta variação pode ser atribuída às diferentes respostas da cobertura frente às peculiaridades do clima de cada dia. To-

*m = referente às coberturas modificadas.

davia, para correlacionar os diferentes valores assumidos por L com as variáveis climáticas, seriam necessários estudos com maior volume de dados.

Analisando os índices calculados, em conjunto, observa-se que, embora existam oscilações, a melhora resultante das alterações na cobertura é nítida.

Ainda com base nos valores expostos na Tabela 3.13, pode-se verificar que o melhor desempenho térmico foi obtido no teste 3, quando à colocação da lâmina de alumínio polido sob o telhado foi somada a pintura branca de suas telhas. Seguindo-se esta classificação, teríamos em segundo lugar só a colocação da lâmina de alumínio (teste 2) e, em terceiro, a pintura branca apenas (teste 4).

Muito embora as melhoras estudadas tenham sido efetuadas em uma cobertura cujo desempenho térmico é considerado bom, o índice L mostrou-se sensível às modificações. Este fato sugere, pois, que a aplicação deste índice em outros tipos de coberturas leves, tais como cimento amianto e ferro galvanizado, deve resultar em diferenças mais marcantes entre a cobertura padrão e as modificadas.

No segundo dia do teste 3 (09.04), ocorreu um fato que merece especial atenção: ao longo de quase todo este dia, o $\Delta T_{for(m2)}$ foi negativo, muito embora desde as 8:30 h a temperatura do ar externo tenha-se mantido mais elevada do que a do ar da câmara. A Figura 5 do Anexo I fornece subsídios para explicar isto. A temperatura do ar do ático baixou durante a noite (08 - 09.04), assumindo o valor de 16,6°C pela manhã. A lâmina de alumínio presa às ripas do telhado formava uma pequena câmara de ar entre si e as telhas. Estando esta lâmina nova e tendo sido colocada há pouco tempo, não houvera ainda acúmulo de pó em sua superfície, apresentando, então, uma emissividade baixíssima. Por outro lado, a presença do alumínio junto às ripas eliminou a microventilação do ático. Tudo isto contribuiu para que a resistência térmica do telhado fos

se muito acentuada. Desta forma, a temperatura do ar do ático só se elevou mais – e, mesmo assim, apenas um pouco – do que a do ar da câmara a partir das 15 h, ou seja, durante quase todo o dia o ar do ático ganhou calor do exterior e da câmara. Cabe lembrar, entretanto, que ΔT menor do que $0,4^{\circ}\text{C}$ pode ser atribuído à incerteza do aparelho utilizado nas medidas.

O fato acima impossibilitou o cálculo de K_{cob} para este dia, pois não chegou a haver regime próximo do permanente de troca entre o exterior e a câmara. Esta situação fez com que o K_{cob} perdesse o sentido.

De uma maneira geral, os K_{cob} calculados (item 3.3.5) são apenas aproximações do K de verão (entrada de calor). Valores para uso em projetos e normalização deverão ser baseados em um volume maior de dados e, também, em levantamentos para o período de inverno.

Os valores da energia gasta na evaporação da água contida nas telhas, expostos na Tabela 3.12, demonstram a importância do fenômeno como proteção contra a insolação. Assim, a não-representatividade dos testes padronizados de "U" para situações reais é mais uma vez reforçada, enfatizando a necessidade de testes com exposição ao ambiente natural.

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA BANCADA

4. MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DA BANCADA

4.1. INTRODUÇÃO

Os mecanismos da transmissão do calor, radiação, convecção e condução estão suficientemente bem compreendidos para permitir o uso de modelos matemáticos no estudo do comportamento de construções. Com a utilização do computador, a complexidade destes modelos pode ser incrementada, possibilitando simulações que se aproximam em alto grau da realidade.

Basicamente, foram desenvolvidos dois tipos de modelos, propostos em duas partes diferentes do mundo, os quais, em sua forma mais sofisticada, levam a resultados semelhantes para um mesmo tipo de problema³². Um destes, o método de **diferenças finitas**, trata os efeitos do armazenamento de energia, dividindo a estrutura da construção em um certo número de camadas e calculando a distribuição de temperaturas a espaços de tempo determinados. Neste método, as excitações podem variar livremente, facilitando assim a consideração de variáveis climáticas reais. Uma versão deste enfoque é a técnica do **fator de resposta**, desenvolvida por Stephenson e Mitalas^{34, 43}. No Canadá e adotada pela "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE)³. Esta técnica consiste essencialmente no cálculo de fatores de resposta durante o tempo, para uma excitação instantânea, para cada elemento construtivo. Em uma série real de excitações, considera-se o princípio da superposição dos efeitos.

O segundo tipo de modelo pode ser chamado de **solução harmônica**. Fornece o comportamento das temperaturas para uma construção, assumindo que esta tenha atingido um estado de equilíbrio para uma dada seqüência climática e uso. Neste

método, as excitações são consideradas periódicas estacionárias, ou seja, senoidais. A resolução deste modelo é análoga à empregada em problemas de engenharia elétrica para as equações de Kirchhoff em correntes alternadas. Os trabalhos de Mackey e Wright^{28,29} enquadram-se nesta linha. Da mesma forma, a técnica da **admitância**, desenvolvida por Danter no "Building Research Station" (BRS)³³ e adotada pelo "Institute of Heating and Ventilating Engineers" (IHVE), é típica deste tipo de solução. Em linhas gerais, consiste esta última no desenvolvimento de três fatores. O primeiro destes, a admitância, representa a quantidade de energia que entra na superfície para cada grau de elevação na temperatura ambiental. O segundo, fator de decremento, é o quociente entre a transmitância cíclica e a estacionária. O último, fator de superfície, significa a proporção do ganho térmico da superfície que é readmitida para o ambiente. A vantagem deste método é sua fácil utilização em cálculos manuais.

No presente trabalho, optou-se pelo método das **diferenças finitas**, uma vez que a intenção era a simulação de situações reais, nas quais as variações das excitações não são regulares. Na elaboração deste modelo, foram consideradas as sugestões de Wilkes⁴⁹, que compara seis modelos matemáticos de transmissão de valor através de áticos* e sugere implementações.

Segundo Wilkes, as características potencialmente desejáveis em um modelo de ático são as que seguem:

- a) considerar o fluxo transiente;
- b) levar em conta a ventilação, preferencialmente considerando que a mistura do ar de ventilação com o ar do ático não seja homogênea ao longo do percurso;
- c) considerar a capacidade térmica do telhado, do forro e do ar do ático;

*Os seis modelos são os seguintes: ASHRAE Handbook, Joy, OSU-EPRI, NBSLD, TRNSYS e Peavy.

d) considerar a troca por radiação entre o telhado e o forro;

e) considerar que os coeficientes de troca de calor por convecção e radiação devem ser variáveis com a variação do ΔT ;

f) considerar a entrada de calor pelos oitões.

Partindo destas sugestões, montou-se um modelo que englobasse os itens "a", "d" e "e". Quanto ao item "b", considerou-se a mistura como homogênea, ou seja, $T_{\text{ático}} = (T_{\text{exterior}} + T_{\text{saída}})/2$. No que tange ao item "c", só não se levou em conta a capacidade térmica do ar do ático por considerá-la pequena. O item "f" não foi considerado, pois o oitão da bancada é sombreado e possui uma alta resistência térmica ($R_{\text{oitão}} = 3,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).

4.2. O MODELO EMPREGADO

O processo da transmissão de calor através da cobertura da bancada foi representado por um modelo unidimensional. Para resolvê-lo, empregou-se o método das diferenças finitas^{19,25,46}.

A Figura 4.1 mostra, através da analogia elétrica, o modelo utilizado.

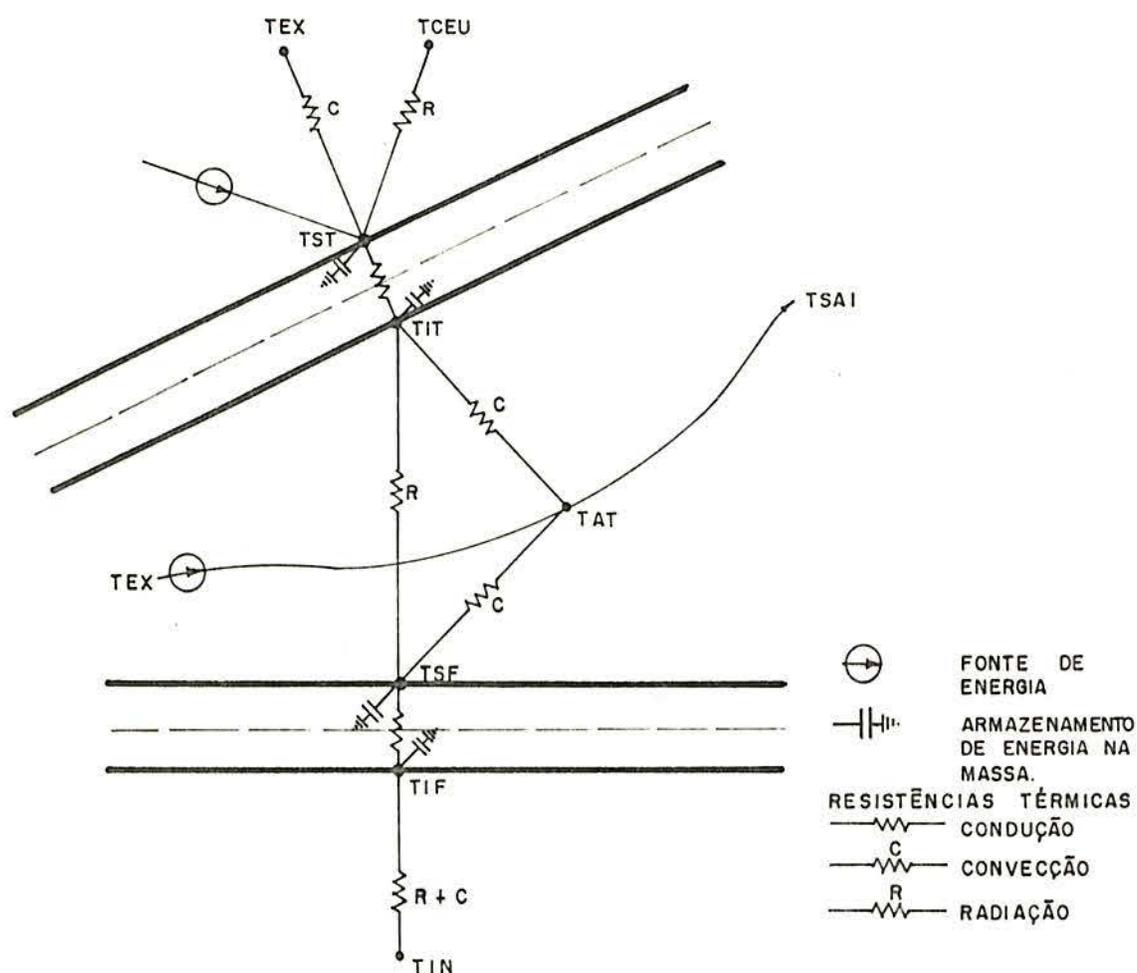


FIGURA 4.1 - Analogia elétrica do modelo utilizado.

Para um modelo unidimensional, a equação de Fourier fica reduzida a

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

onde:

- T = temperatura;
- θ = tempo;
- c = calor específico;
- ρ = massa específica;
- k = condutibilidade térmica.

Esta equação, colocada em termos de incrementos discretos de tempo $\Delta\theta$, pode ser expressa semanticamente com um balanço de energia.

$$\left| \begin{array}{l} \text{fluxo líquido de calor} \\ \text{dos nós vizinhos em di} \\ \text{reção ao nó considera-} \\ \text{do durante } \Delta\theta \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{aumento na energia inter} \\ \text{na do material associado} \\ \text{ao nó considerado} \end{array} \right|$$

4.2.1. Desenvolvimento das equações

A simbologia utilizada daqui para diante será a adotada no programa computacional seguindo abaixo:

- AB - absortividade à radiação solar
- AF - área do forro
- AT - área do telhado
- CAF - calor específico do forro
- CAR - calor específico do ar
- CDT - condutância térmica do conjunto telhas + ripas
- CT - calor específico da telha
- DAR - massa específica do ar
- DF - massa específica do forro
- DT - massa específica da telha
- EF - emissividade do forro no ático
- ET - emissividade do telhado no ático
- KF - condutibilidade térmica do material do forro
- NR - número de renovações do ar no ático por hora
- RF - resistência do forro
- RIF - resistência inferior do forro à convecção e à radiação
- RITC - resistência inferior do telhado à convecção
- RITR - resistência inferior do telhado à radiação
- RS - radiação solar
- RSFC - resistência superior do forro à convecção
- RSFR - resistência superior do forro à radiação
- RSTC - resistência superior do telhado à convecção
- RSTR - resistência superior do telhado à radiação
- RT - resistência do conjunto telhas + ripas
- TAT - temperatura do ar no ático
- TATF - temperatura do ar no ático futura
- TCEU - temperatura fictícia do céu para trocas por radiação

TETA - intervalo de tempo
 TEX - temperatura do ar exterior
 TIF - temperatura superficial inferior do forro
 TIFF - temperatura superficial inferior do forro futura
 TIN - temperatura do ar interna
 TIT - temperatura superficial inferior da telha
 TITF - temperatura superficial inferior da telha futura
 TSAI - temperatura de saída do ar do ático em caso de ventilação
 TSF - temperatura superficial superior do forro
 TSFF - temperatura superficial superior do forro futura
 TST - temperatura superficial superior da telha
 TSTF - temperatura superficial superior da telha futura
 VAT - volume do ático
 VF - volume do forro
 VT - volume do telhado

A seguir, executa-se o balanço de energia e a resolução em função da temperatura futura para cada um dos nós do modelo proposto. Realiza-se o desenvolvimento completo para o primeiro; nos demais, apresenta-se apenas o balanço de energia e a equação final da temperatura futura.

● NÓ TST

$$\left[RS \cdot AB \cdot AT + \frac{(TEX - TST) \cdot AT}{RSTC} + \frac{(TCEU - TST) \cdot AT}{RSTR} + \frac{(TIT - TST) \cdot AT}{RT} \right] \cdot TETA = \\
 = CT \cdot DT \cdot \frac{VT}{2} \cdot (TSTF - TST)$$

$$TSTF = \frac{2 \cdot AB \cdot AT \cdot TETA}{CT \cdot DT \cdot VT} \cdot RS + \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RSTC \cdot CT \cdot DT \cdot VT} \cdot TEX + \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RSTR \cdot CT \cdot DT \cdot VT} \cdot TCEU + \\
 + \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RT \cdot CT \cdot DT \cdot VT} \cdot TIT + \left[1 - \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RSTC \cdot CT \cdot DT \cdot VT} - \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RSTR \cdot CT \cdot DT \cdot VT} - \frac{2 \cdot AT \cdot TETA}{RT \cdot CT \cdot DT \cdot VT} \right] \cdot TST$$

ou seja: $TSTF = A \cdot RS + B \cdot TEX + C \cdot TCEU + D \cdot TIT + F \cdot TST$

onde

$$E = VT.CT.DT/(2.AT)$$

$$A = TETA.AB/E$$

$$B = TETA/(RSTC.E)$$

$$C = TETA/(RSTR.E)$$

$$D = TETA/(RT.E)$$

$$F = 1 - (B+C+D)$$

● NÓ TIT

$$\left[\frac{(TST-TIT).AT}{RT} + \frac{(TAT-TIT).AT}{RITC} + \frac{(TSF-TIT).AT}{RITR} \right] . TETA = CT.DT.\frac{VT}{2} . (TITF-TIT)$$

Logo: $TITF = A.TST + B.TAT + C.TSF + D.TIT$

onde

$$E = VT.CT.DT/(2.AT)$$

$$A = TETA/(RT.E)$$

$$B = TETA/(RITC.E)$$

$$C = TETA/(RSTR.E)$$

$$D = 1 - (A+B+C)$$

● NÓ TSF

$$\left[\frac{(TIT-TSF).AF}{RSFR} + \frac{(TAT-TSF).AF}{RSFC} + \frac{(TIF-TSF).AF}{RF} \right] . TETA = CAF.DF.\frac{VF}{2} . (TSFF-TSF)$$

Logo: $TSFF = A.TIT + B.TAT + C.TIF + D.TSF$

onde

$$E = CAF.DF.VF/(2.AF)$$

$$A = TETA/(RSFR.E)$$

$$B = TETA/(RSFC.E)$$

$$C = TETA/(RF.E)$$

$$D = 1 - (A+B+C)$$

● NÓ TAT

Neste nó, não há massa associada, ficando do lado direito da equação apenas a energia retirada por ventilação.

$$\left[\frac{(TIT-TAT).AT}{RITC} + \frac{(TSF-TAT).AF}{RSFC} \right] \cdot TETA = \frac{NR.TETA}{3600} \cdot VAT \cdot DAR \cdot CAR \cdot (TSAI-TEX)$$

Para simplificar, considera-se $TAT = \frac{TSAI + TEX}{2}$.

Logo: $TAT = A.TIT + B.TSF + C.TEX$

onde $G = NR.VAT.DAR.CAR/1800$

$$F = AF/RSFC$$

$$E = AT/RITC$$

$$D = G + F + E$$

$$A = E/D$$

$$B = F/D$$

$$C = G/D$$

• NÓ TIF

$$\left[\frac{(TSF-TIF).AF}{RF} + \frac{(TIN-TIF).AF}{RIF} \right] \cdot TETA = CAF \cdot DF \cdot \frac{VF}{2} \cdot (TIFF-TIF)$$

Logo: $TIFF = A.TSF + B.TIN + C.TIF$

onde $E = CAF.DF.VF/(2.AF)$

$$A = TETA/(RF.E)$$

$$B = TETA/(RIF.E)$$

$$C = 1 - (A+B)$$

4.2.2. Cálculo das resistências térmicas utilizadas no modelo

4.2.2.1. RT - resistência térmica do conjunto telhas + ripas

Uma vez que este elemento é complexo, dividiu-se a análise em três partes:

- telha simples (RA);
- telha sobreposta (RB);
- telha sobreposta com ripa (RC).

Estas três resistências são consideradas em paralelo e ponderadas conforme a percentagem da área total, segundo recomendação da ASHRAE. Face da não-disponibilidade de aparelhos para medição da condutividade térmica, adotaram-se os seguintes valores segundo o método exposto no Anexo III:

$$\text{Telha } k = 0,574 \text{ W/(m . K)}$$

$$\text{Madeira } k = 0,155 \text{ W/(m . K)}$$

$$R_A = \frac{0,01}{0,574} = 0,0174216$$

$$R_B = \frac{0,02}{0,574} = 0,0348432$$

$$R_C = \frac{0,02}{0,574} = 0,1987142$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_A} \cdot a + \frac{1}{R_B} \cdot b + \frac{1}{R_C} \cdot c$$

sendo a, b e c as percentagens da área total.

Como a = 0,40, b = 0,55 e c = 0,05:

$$\frac{1}{R_T} = \text{CDT}^* = 38,997$$

$$R_T = 0,025643 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

4.2.2.2. RF - resistência térmica do forro

A condutividade térmica do compensado foi assumida como sendo h = 0,157 W/(m . K), após as considerações colocadas no Anexo III.

$$R_F = \frac{0,014}{0,157}$$

$$R_F = 0,089172 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

*CDT = condutância térmica do conjunto telhas + ripas.

4.2.2.3. RSTC, RITC, RSFC, RIFC - resistências térmicas por convecção

Na determinação destas resistências, utilizou-se o formulário sugerido por Peavy³⁸, com adaptação das constantes para utilizar unidades do Sistema Internacional.

• Convecção forçada

$$h_f = 0,997 V^{0,8} \cdot L^{-0,2}$$

sendo: V = velocidade do ar, em m/s;

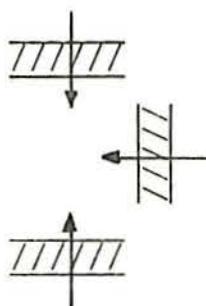
L = comprimento da superfície, em m.

• Convecção natural

$$h_n = 0,268 (\Delta T)^{1/3}$$

$$h_n = 0,231 (\Delta T)^{1/3}$$

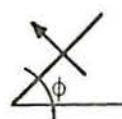
$$h_n = 0,134 (\Delta T)^{1/3}$$



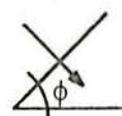
sendo: ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o ar, em °C.

Para a superfície interna do telhado, que não é nem vertical nem horizontal, usa-se:

$$h_n = \frac{1,695 (\Delta T)^{1/3}}{7,333 - \cos \phi}$$



$$h_n = \frac{0,318 (\Delta T)^{1/3}}{1,375 + \cos \phi}$$



sendo: ϕ = ângulo de inclinação do telhado.

• Convecção (fórmula global)

$$h_c = h_f + \frac{(9,295 - V^2)}{9,295} \cdot h_n$$

sendo: $h_n = 0$, para $V > 3$ m/s.

A resistência térmica para convecção é o inverso de h_c .

4.2.2.4. RSTR, RITR, RSFR, RIFR - resistências térmicas por radiação

$$h_r = 4 \sigma \cdot \overline{F}_{12} (T_m + 273)^3$$

sendo: σ = constante de Stefan-Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m².K⁴)

$$T_m = (T_1 + T_2)/2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

\overline{F}_{12} = fator de forma para radiação entre as superfícies 1 e 2, levando em conta as suas emitâncias e considerando as demais superfícies refratárias, calculado segundo a fórmula:

$$\overline{F}_{12} = \frac{1}{\frac{1}{ET} - 1 + \frac{AT}{AF} \left(\frac{1}{EF} - 1 \right) + \frac{1 + (1 - 2F_{12}) AT/AF}{1 - F_{12}^2 \cdot AT/AF}}$$

em que: ET = emissividade do telhado por dentro;

EF = emissividade do forro para cima;

F_{12} = fator de forma para radiação entre as superfícies 1 e 2 em função da dimensão e do ângulo de inclinação do telhado (calculado por Sub-rotina (retirada de Peavy³⁸)).

A resistência térmica por radiação é o inverso de h_r .

4.2.2.5. Umidade da telha

A condutividade térmica da telha muda conforme o seu teor de umidade. Para levar em conta este fato, adotou-se

a metodologia utilizada pelo BRE. Multiplica-se a condutividade do material a 1% de umidade pelo "fator de umidade" correspondente à umidade real e divide-se pelo "fator de umidade" para 1%.

TABELA 4.1 - Fator de umidade (BRE⁹)

Umidade (%/volume)	1	2,5	5	10	15	20	25
"Fator de umidade"	1,30	1,55	1,75	2,10	2,34	2,55	2,75

Por exemplo, se a telha estiver com 5% de umidade:

$$k = 0,54 \cdot \frac{1,75}{1,3} = 0,727 \text{ W(m} \cdot \text{K)}$$

Como a umidade da telha diminui muito durante o período de insolação e aumenta durante a noite, pode-se supor que parte da radiação solar absorvida é gasta na evaporação da água. Durante a noite, como a superfície do telhado está mais fria que o ar, devido às trocas por radiação com o céu, ocorre condensação e, conseqüentemente, um incremento no teor de umidade das telhas.

Para encarar o fenômeno acima, propõe-se uma correção na radiação solar (VAR RS), que será posteriormente utilizada nas equações. Esta correção se constituiria, basicamente, em avaliar a quantidade de água evaporada ou depositada por metro quadrado de telhado por hora (QA), multiplicar este valor pelo calor latente de vaporização (CLV) e pelo inverso da absorvidade (pois a correção proposta é na radiação solar absorvida).

$$\text{VAR RS} = \text{QA} \cdot \text{CLV} \cdot \frac{1}{\text{AB}}$$

$$\text{VAR RS} = 0,682 \cdot \frac{\text{QA}}{\text{AB}} \text{ W/m}^2$$

Se a água for depositada, o QA será positivo; se for evaporada, o QA será negativo. Desta forma, ao somarmos o VAR RS ao RS, estaremos diminuindo a radiação solar durante o dia e aumentando durante a noite.

4.3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL DISTTEMP

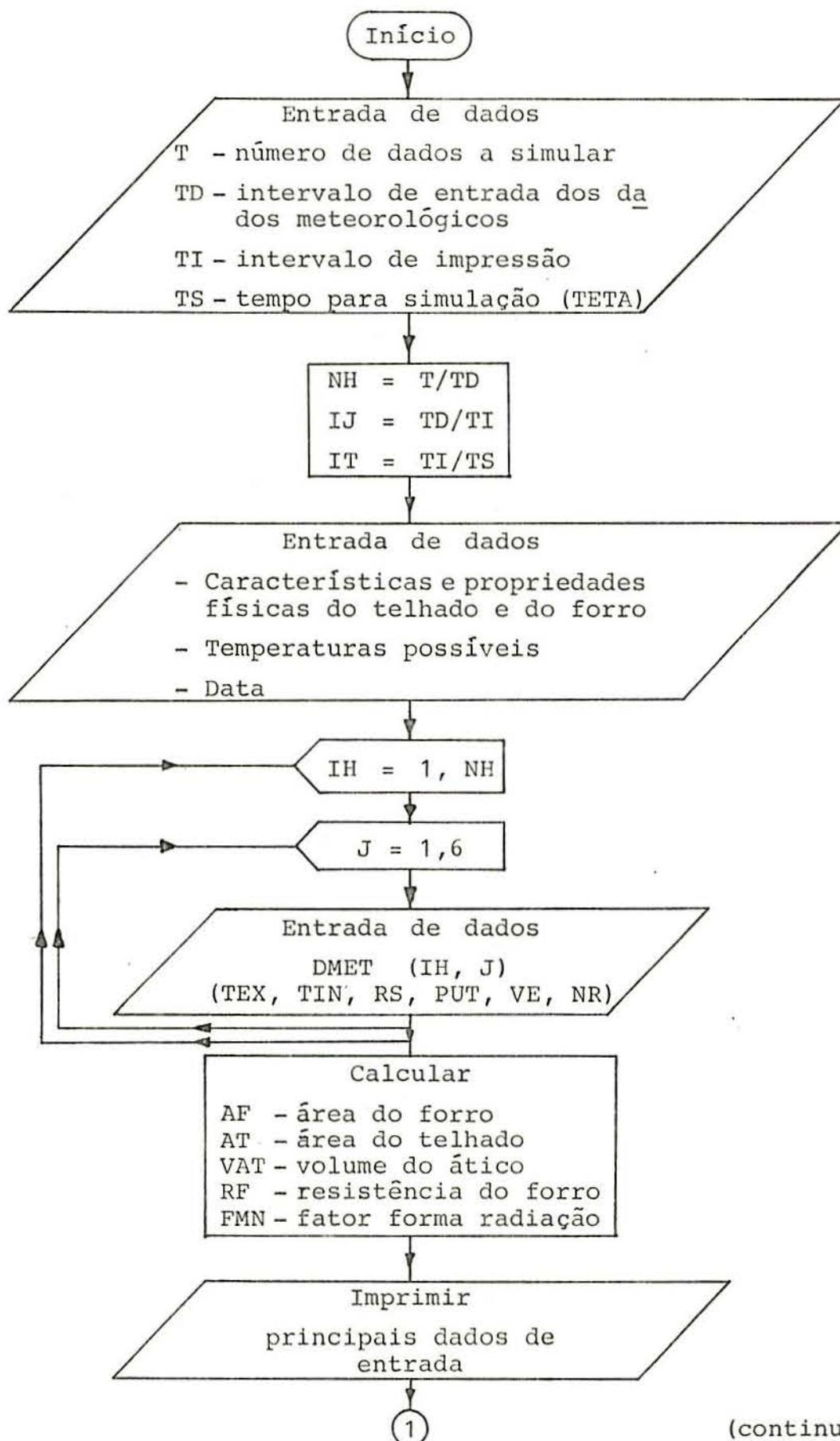
Para resolver o modelo proposto, criou-se um programa computacional em linguagem FORTRAN, que calcula todas as resistências variáveis e executa as correções propostas, resolvendo, a seguir, o conjunto de equações relativas à temperatura futura dos nós. O fluxograma deste programa está representado na Figura 4.2.

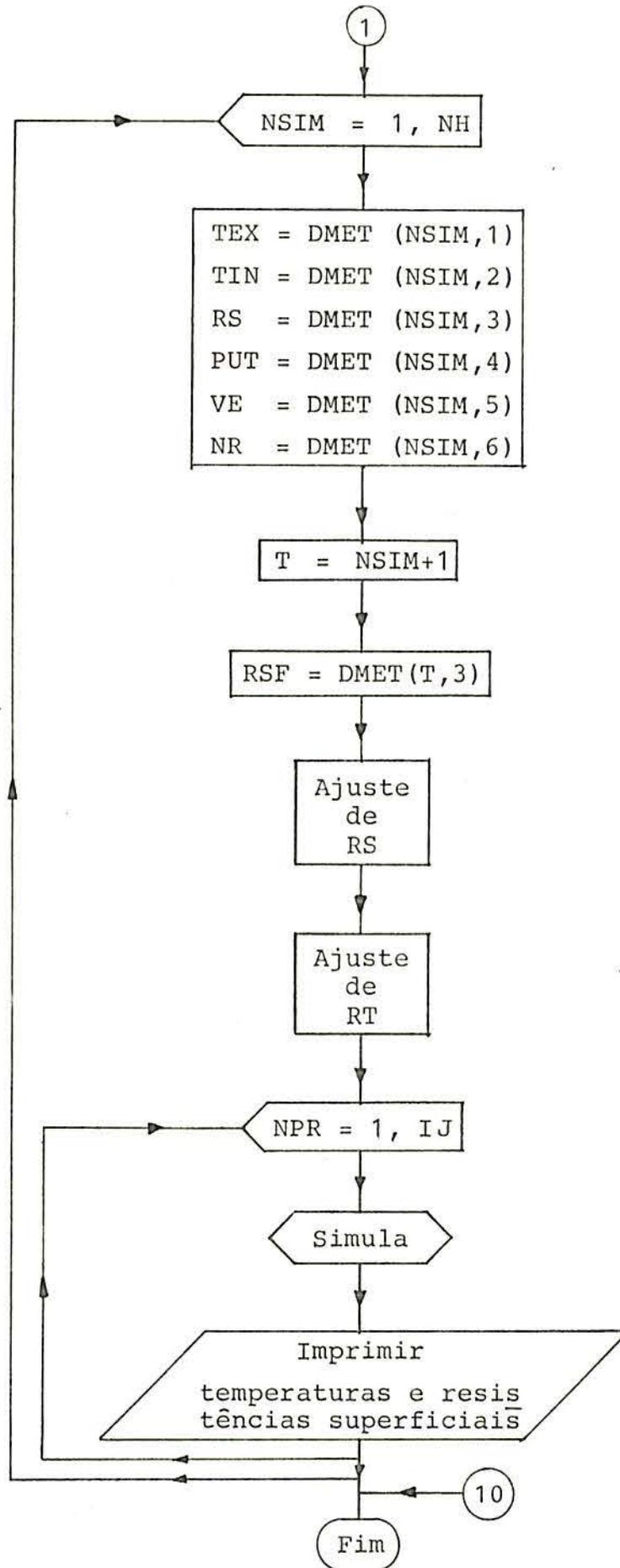
O programa visa simular as principais temperaturas levantadas na bancada. Inicialmente, entra-se com a definição das características e propriedades físicas dos materiais constituintes do telhado e do forro. Depois, as variáveis medidas - temperatura exterior (TEX), temperatura interior (TIN), radiação solar (RS), peso úmido da telha (PUT), número de renovações do ar no ático por hora (NR) e velocidade do vento (VE) - são introduzidas no programa, conforme o seu intervalo de medição, sendo consideradas constantes durante este período. Em relação à radiação solar, entretanto, realizou-se uma interpolação linear durante os intervalos de medição, uma vez que esta exerce grande influência como fonte de energia.

O programa foi rodado com TETA = 60 segundos e as seguintes características físicas:

● <u>Telhado</u>	● <u>Forro</u>
AB = 0,65	EF = 0,9
ET = 0,90	DF = 600 kg/m ³
DT = 1.542 kg/m ³	CAF = 2.390 kg/m ³
CT = 921 J/(kg . K)	VF = 0,028 J/(kg . K)
VT = 0,061 m ³	KF = 0,157 W/(m . K)
CDT = 38,997 m ² . K/W	

PROGRAMA DISTTEMP





(continua)

SUB-ROTINA SIMULA

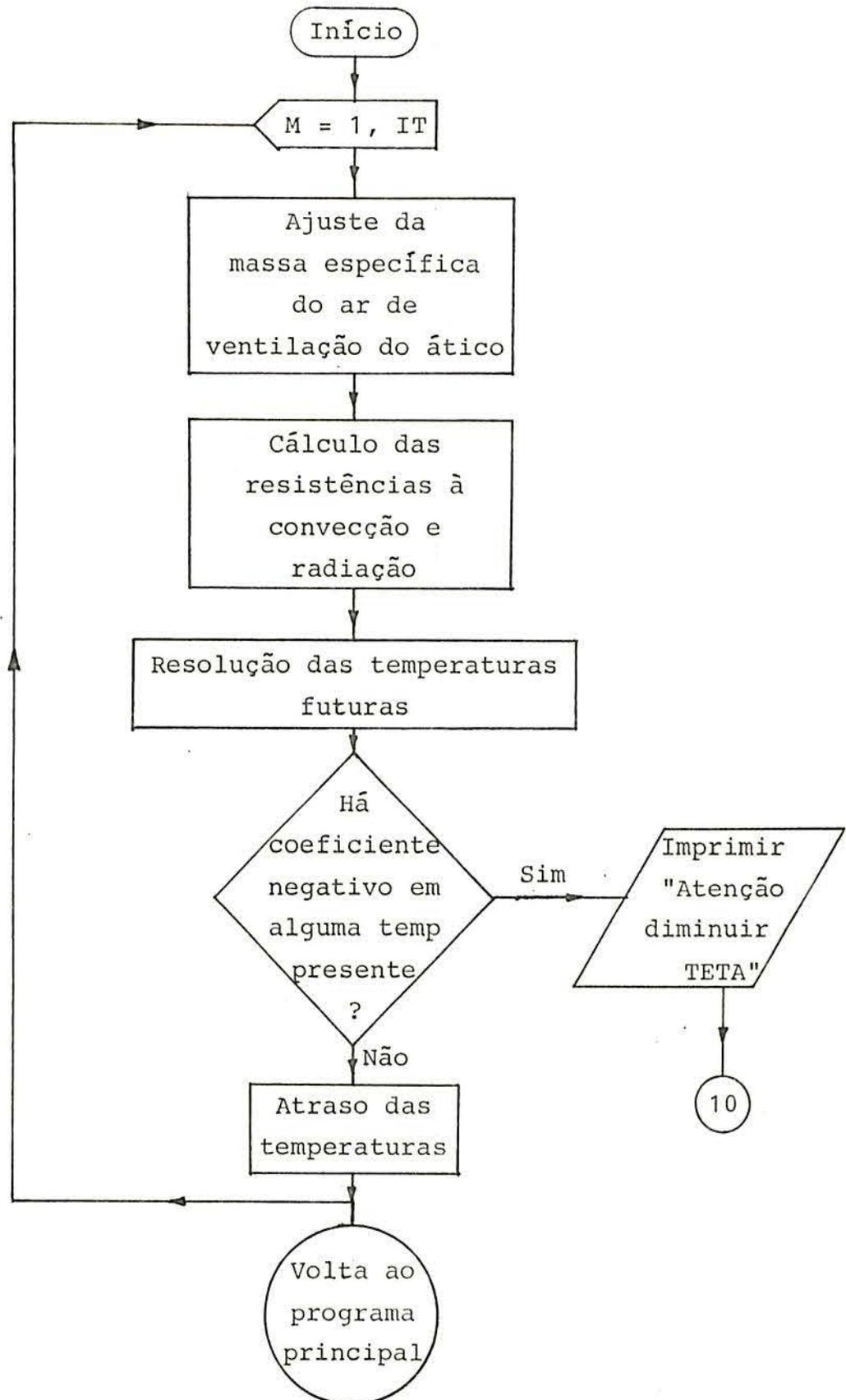


FIGURA 4.2 - Fluxograma do programa computacional DISTEMP.

As demais informações de entrada (TEX, TIN, RS, PUT e VE) receberam os valores levantados no primeiro teste. O valor de NR inicial foi considerado zero. Os resultados obtidos para o primeiro dia, com estas informações, apresentaram um valor máximo para TST (73°C) muito superior ao medido (44°C). A diferença foi atribuída a uma alta resistência de troca por convecção natural. Reduziu-se, então, esta resistência para 0,05 m² . k/W. Os valores assim obtidos para TST_{max} aproximaram-se dos reais, todavia, o TAT_{max} obtido (38°C) manteve-se alto em relação ao medido (33°C). Este problema foi solucionado alterando-se o valor de NR de zero para 2, o que é possível devido às frestas existentes entre as telhas.

O programa ajustado desta forma foi processado para os quatro testes (cobertura padrão). Os resultados podem ser observados no Anexo IV e comparados com os dados reais (Anexo I). As tabelas abaixo sintetizam esta comparação para TST e TAT.

TABELA 4.2 - Comparação entre valores reais e simulados de TST

	TESTE 1		TESTE 2		TESTE 3		TESTE 4	
	Real	Simu lado						
1º dia: 06:00 h	16,9	16,5	11,7	12,4	15,1	14,7	17,9	17,4
Máximo	43,9	46,3	32,5	34,9	37,0	37,4	36,6	39,5
18:00 h	30,4	29,6	23,1	22,8	22,3	22,2	21,9	21,3
2º dia: 06:00 h	18,6	18,1	12,9	14,2	11,6	13,5	11,5	13,7
Máximo	49,9	50,3	35,8	38,1	36,8	39,6	38,2	40,1
18:00 h	31,1	30,1	23,8	23,6	20,4	21,4	19,5	19,5

TABELA 4.3 - Comparação entre valores reais e simulados de TAT

	TESTE 1		TESTE 2		TESTE 3		TESTE 4	
	Real	Simu lado						
1º dia: 06:00 h	18,0	17,4	15,3	13,5	16,0	15,6	19,1	18,4
Máximo	33,2	34,0	28,3	27,4	29,2	28,2	30,9	30,1
18:00 h	29,7	28,3	24,7	22,5	23,9	21,5	24,5	21,4
2º dia: 06:00 h	20,5	18,9	16,6	14,6	14,8	14,5	16,1	13,8
Máximo	38,6	37,3	29,7	29,2	28,4	28,4	28,5	28,3
18:00 h	31,9	29,2	25,9	23,0	23,3	20,9	22,3	19,4

Com base nestas tabelas, pode-se constatar que as implementações aplicadas ao programa causaram uma aproximação da simulação à realidade. Salienta-se, contudo, que esta é apenas uma primeira fase de ajuste.

4.4. CONCLUSÃO

O método das **diferenças finitas** mostrou-se adequado para a solução deste problema, pois há pouca massa envolvida no sistema, e este método permite acompanhar variações muito rápidas, como é o caso da temperatura superior do telhado.

O ajuste feito pode ser considerado como uma aproximação inicial do modelo. Para um ajuste rigoroso, será fundamental, em primeiro lugar, realizar a medição da condutibilidade térmica dos materiais envolvidos e avaliar sua variação frente a diferentes teores de umidade no caso da telha. Determinações igualmente importantes são a do número de renovações do ar do ático (microventilação), o desenvolvimento de fórmulas empíricas para a variação das resistências de troca por convecção e a medição da absorvância à radiação solar da telha. Também seria de utilidade a realização de medidas do calor específico da telha e do forro. Para a simulação do teste, no qual se utilizou alumínio preso às ripas, seria necessário incluir mais um nó no modelo, de forma a representar a câmara de ar formada.

Os aspectos acima citados, aliados a um maior volume de dados, medidos a menores intervalos de tempo, conduziriam o modelo a um ajuste capaz de promover simulações muito semelhantes ao fenômeno real.

CONCLUSÃO

CONCLUSÃO

Em construções térreas, a cobertura é o elemento da envolvente mais agredido pelas variações climáticas. Entretanto, a conscientização deste importante aspecto parece não ser difundida atualmente, pois as soluções construtivas e os materiais usualmente empregados nesta parte das edificações transformam-na no principal ponto tanto de entrada como de saída de calor.

Entretanto, não é simples avaliar o desempenho térmico das coberturas. A aplicação do teste padronizado para obtenção de "U" não conduz a valores confiáveis, pois negligencia algumas características que podem ser muito importantes. Assim, tendo em vista o estado atual de conhecimentos na área, o mais indicado é a realização de testes com exposição natural ao clima. Com isto em mente, foi criada uma bancada de testes.

O objetivo principal deste trabalho – provar a operacionalidade e potencialidade desta bancada para determinação do desempenho térmico de coberturas – foi plenamente atingido. No decurso da série de testes realizados, com quatro tipos de telhados, provou-se a eficiência do método de comparação entre diferentes coberturas leves com ático através do índice L. Embora este índice necessite ainda de alguns testes para sua total validação, já antecipa bons resultados, viabilizando comparações objetivas de desempenho térmico, muito difíceis até então.

O termômetro digital desenvolvido em conjunto com professores da Faculdade de Física, motivado pela inexistência de instrumentação adequada, demonstrou ter sido uma ótima

escolha pela precisão e perfeita adaptabilidade ao tipo de me di da requerida. O sistema de aquisição de dados, atualmente em fase final de desenvolvimento, abrirá portas para a realização de estudos experimentais de longa duração e, mais especificamente, para a operação da bancada de uma forma muito fã ci l e eficaz. Criará, pois, subsídios para o ajuste do modelo matemático e para a normalização na área.

O modelo matemático apresentou resultados próximos aos obtidos nos levantamentos. Para a realização de seu ajuste definitivo, contudo, serão necessárias medições das propriedades físicas dos materiais envolvidos, determinação de fórmulas empíricas para as resistências por convecção e, também, medições do número de renovações do ar do ático.

O presente trabalho pode ser considerado como o iní ci o de uma linha de pesquisas em coberturas leves, que objetiva fundamentalmente obter embasamento para a normalização das qualidades térmicas por desempenho. Isto permitirá que se efetue um balanço racional entre custo x benefício nas diversas soluções construtivas, o que não só protegerá o usuário como fornecerá também diretrizes para elaboração de projetos adequados ao clima.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Testes de inverno na bancada, com coberturas de barro.

- Testes de verão e inverno na bancada, com coberturas de fibrocimento e ferro galvanizado, com e sem ventilação do ático.

- Determinação das condutibilidades térmicas médias, para verão e para inverno, das coberturas de uso corrente através da bancada, como forma de subsídio ao projeto construtivo.

- Ajuste definitivo do modelo matemático.

- Aplicação do modelo matemático na criação de subsídios para a fase inicial de projeto e normalização.

- Levantamento de dados meteorológicos necessários para o uso em modelos matemáticos e determinação de seqüências típicas de verão e inverno.

- Estudo da viabilidade de uso das diversas soluções para minimizar a carga térmica de verão causada por coberturas leves.

ANEXOS

ANEXO I - Gráficos com as principais temperaturas levantadas
no decorrer dos quatro testes realizados
(ver itens 3.3 e 3.4)

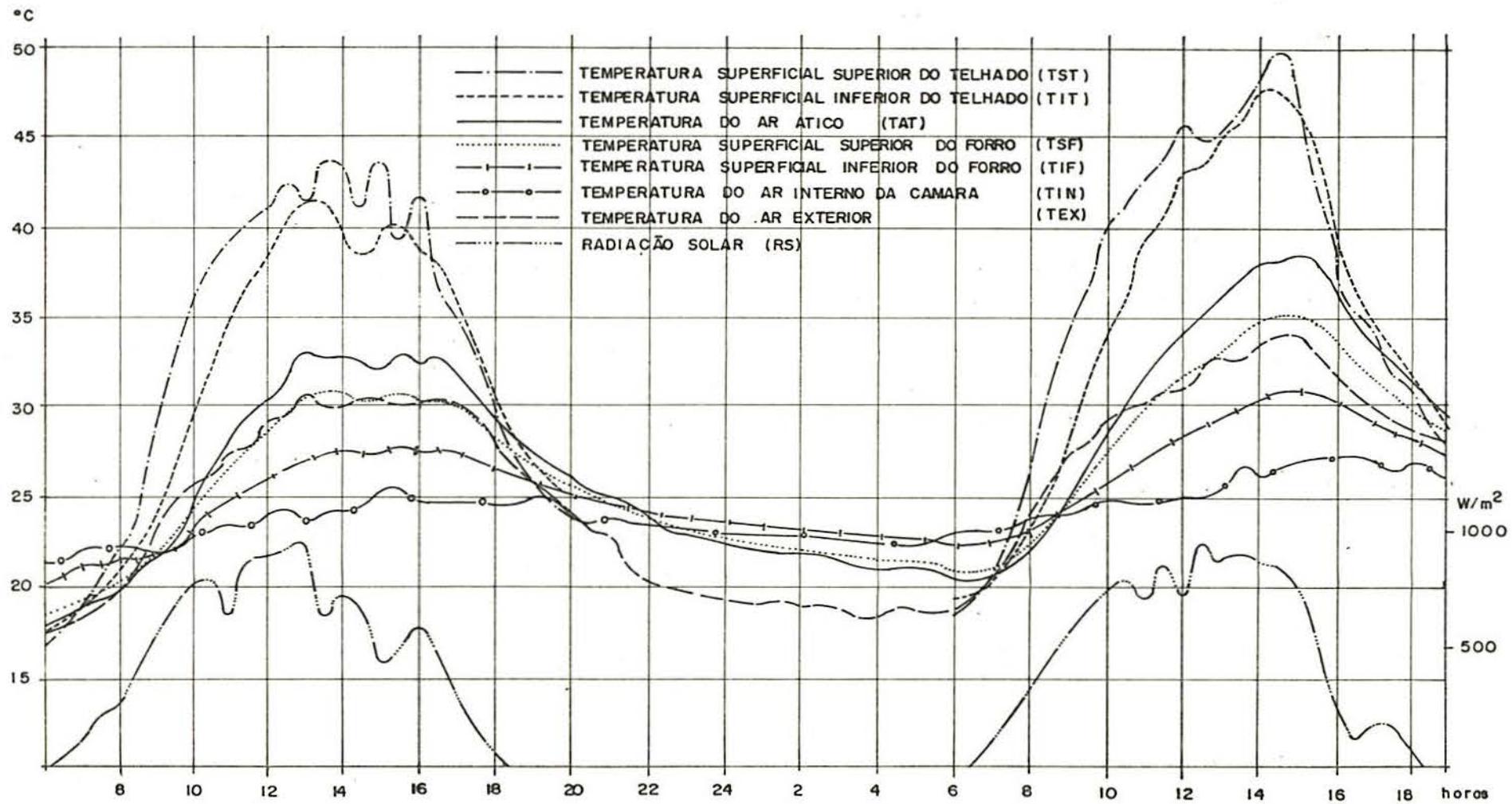


FIGURA 1 - Principais temperaturas medidas em 18 e 19 de fevereiro - Teste 1.

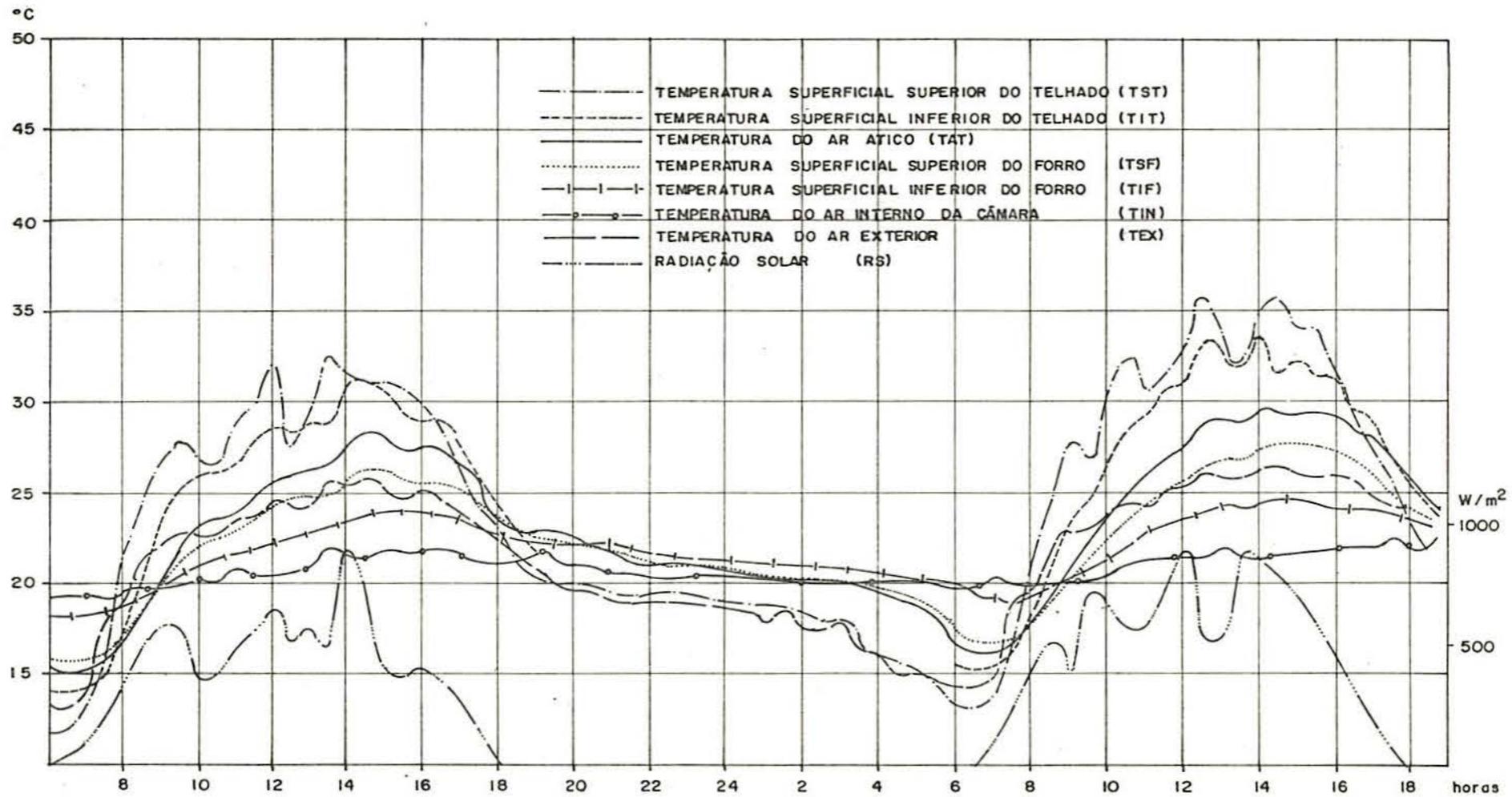


FIGURA 2 - Principais temperaturas medidas em 24 e 25 de março -
 Teste 2 - cobertura padrão (Oeste).

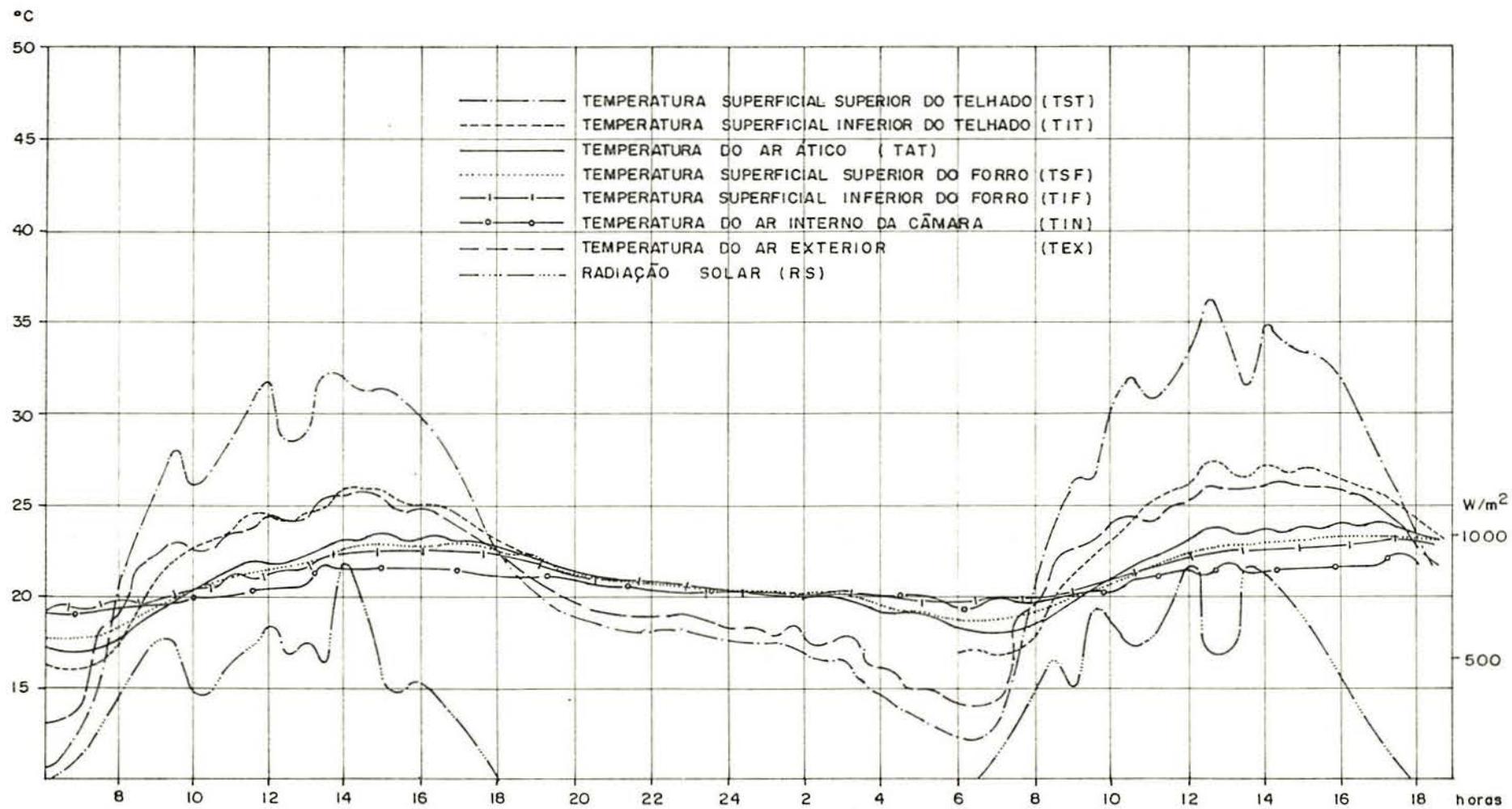


FIGURA 3 - Principais temperaturas medidas em 24 e 25 de março -
 Teste 2 - cobertura modificada (Leste).

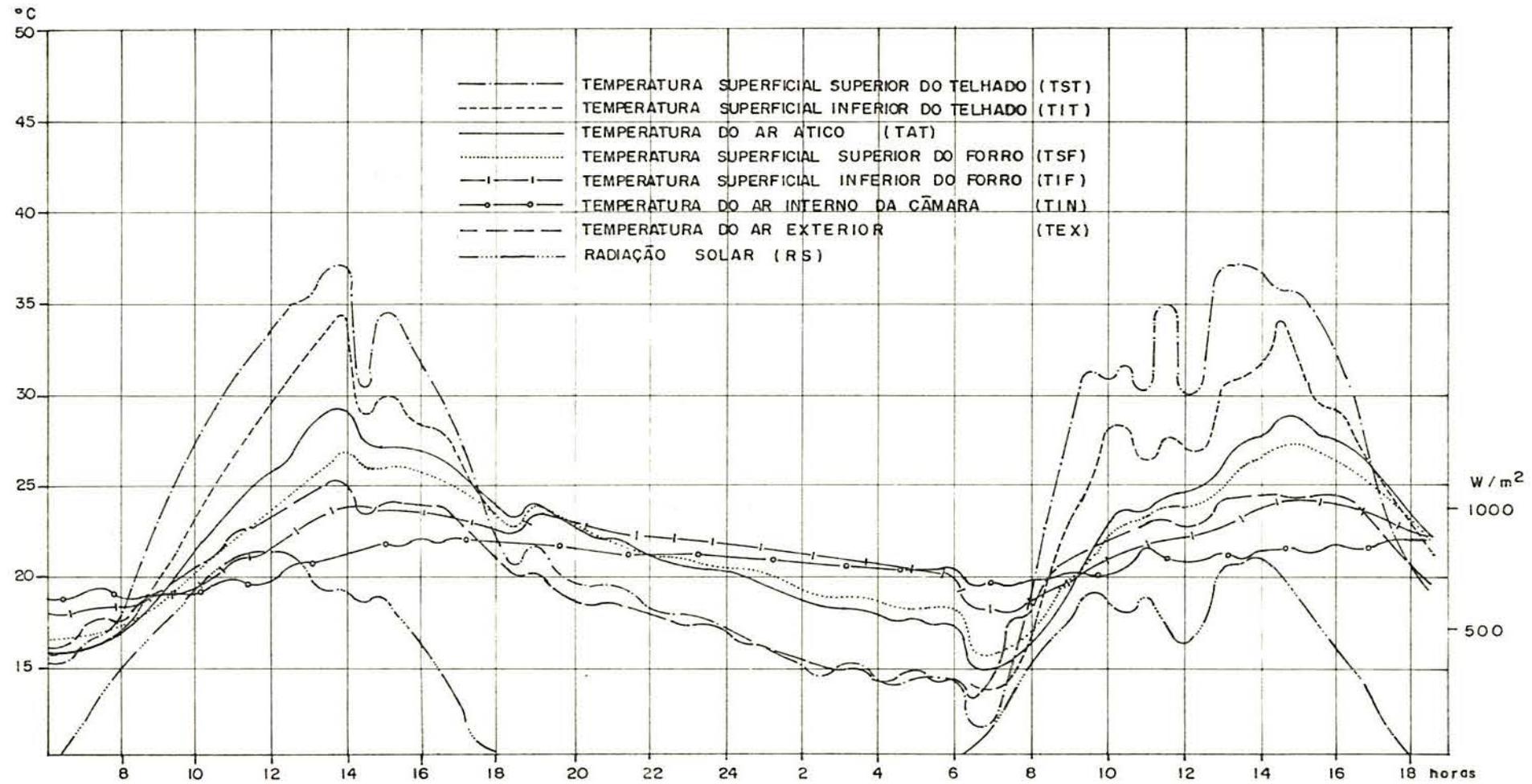


FIGURA 4 - Principais temperaturas medidas em 08 e 09 de abril -
 Teste 3 - cobertura padrão (Oeste).

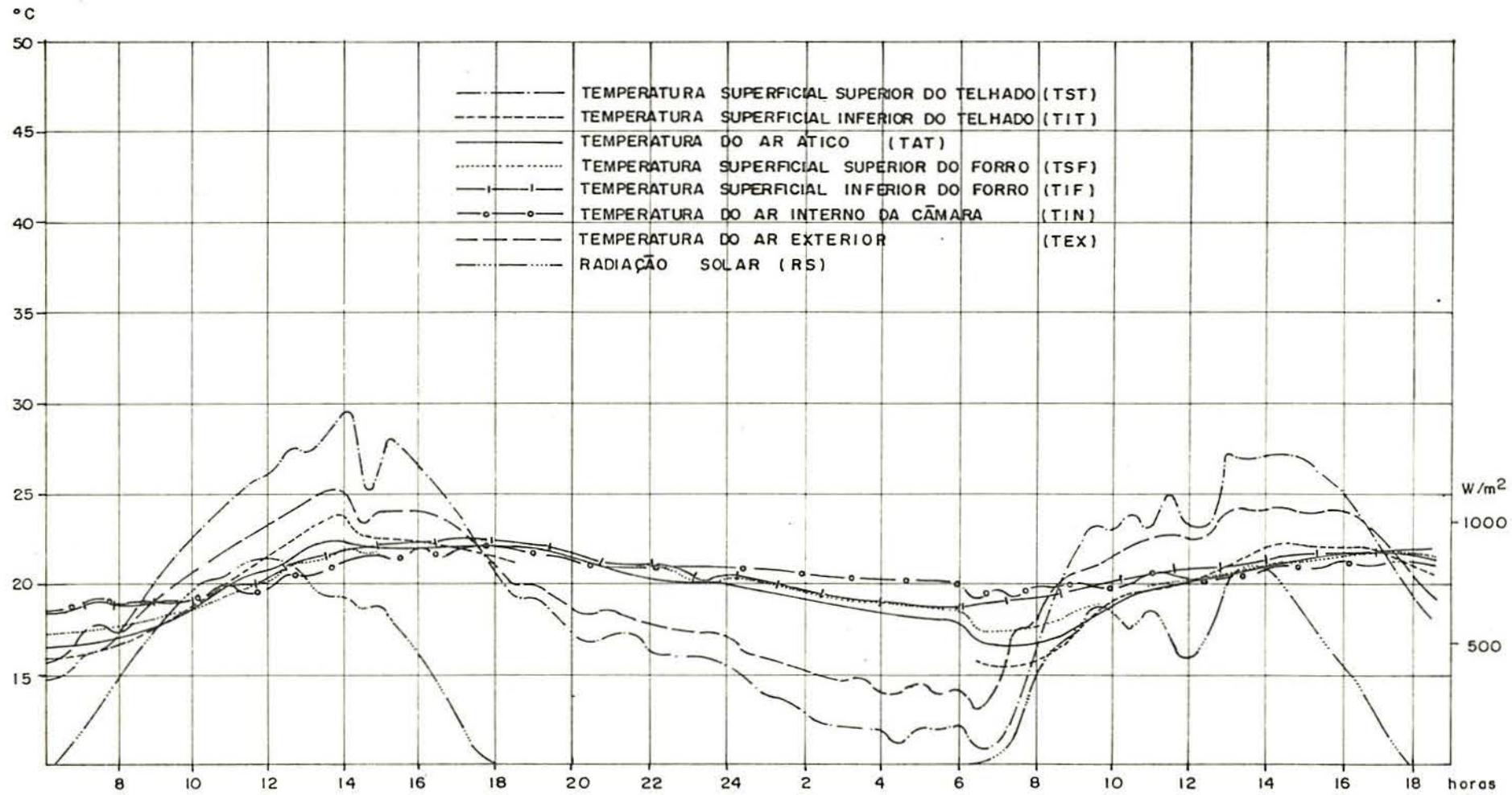


FIGURA 5 - Principais temperaturas medidas em 08 e 09 de abril -
 Teste 3 - cobertura modificada (Leste).

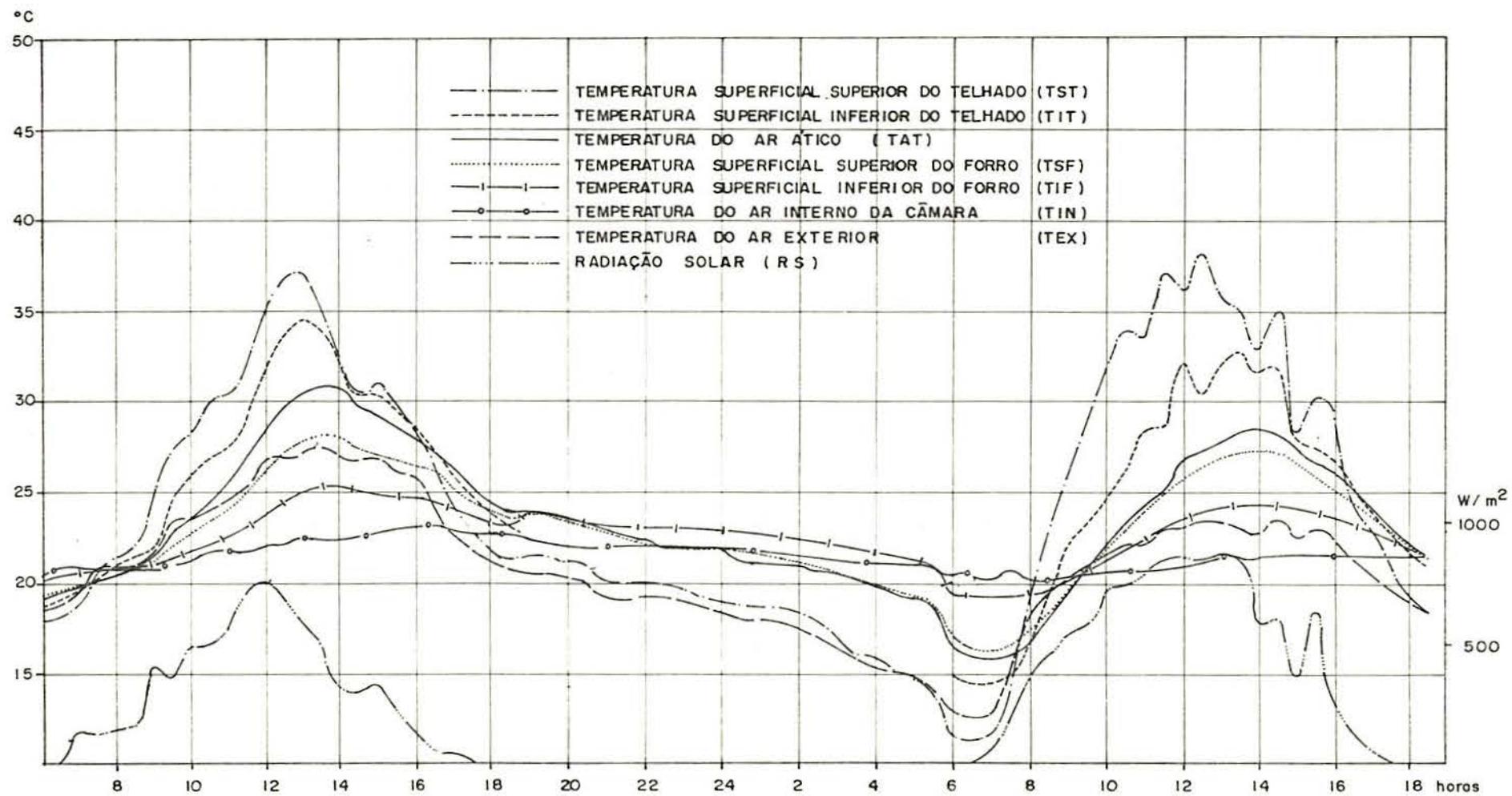


FIGURA 6 - Principais temperaturas medidas em 13 e 14 de abril -
 Teste 4 - cobertura padrão (Oeste).

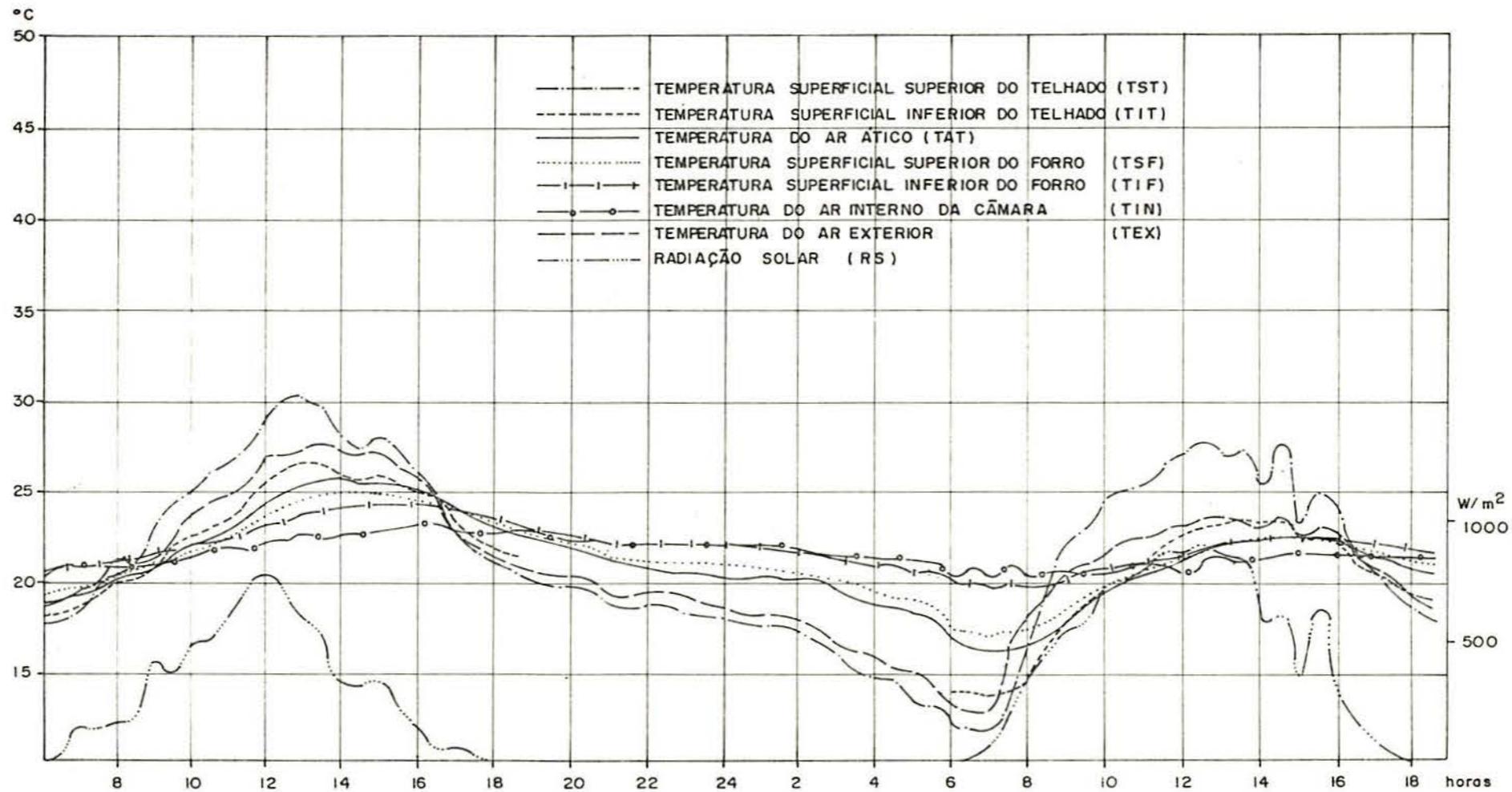


FIGURA 7 - Principais temperaturas medidas em 13 e 14 de abril -
 Teste 4 - cobertura modificada (Leste).

ANEXO II - Determinação da massa específica, volume e capacidade de absorção de água das telhas francesas utilizadas (ver item 3.1)

O ensaio foi realizado com uma amostra de três telhas.

As telhas foram mantidas imersas em água, durante 24 horas. Passado este período, foram retiradas, uma a uma, secadas e pesadas, obtendo-se assim o P_h . A seguir, foi registrado seu peso submerso (P_i). Mediu-se a temperatura da água para correção de sua massa específica. A seguir, as telhas foram secadas em estufa a 110°C. Após um período de 24 horas, foram novamente pesadas, obtendo-se agora o P_s .

A massa específica (DT)* de cada telha foi então determinada:

$$DT = \frac{P_s}{P_h - P_i} \cdot DA$$

onde DA = massa específica da água.

Obteve-se, então,

$$DT_1 = 1.538,5 \text{ kg/m}^3$$

$$DT_2 = 1.529,5 \text{ kg/m}^3$$

$$DT_3 = 1.557,1 \text{ kg/m}^3$$

$$\overline{DT} = 1.541,7 \text{ kg/m}^3$$

*Nomenclatura utilizada no modelo matemático.

Para determinar o volume da telha (VOLT)*, usou-se:

$$VOLT = \frac{P_s}{DT}$$

Assim:

$$VOLT_1 = 1.269,09 \text{ cm}^3$$

$$VOLT_2 = 1.259,30 \text{ cm}^3$$

$$VOLT_3 = 1.197,10 \text{ cm}^3$$

$$\overline{VOLT} = 1.241,83 \text{ cm}^3$$

A absorção máxima de água em relação ao volume (UT_{\max}) foi determinada como segue:

$$UT_{\max} = \frac{P_h - P_s}{V} \cdot 100$$

Logo:

$$UT_{\max} = 37,38\%$$

$$UT_{\max} = 37,63\%$$

$$UT_{\max} = 36,42\%$$

$$\overline{UT}_{\max} = 37,14\%$$

*Nomenclatura utilizada no modelo matemático.

ANEXO III - Condutibilidade térmica da cerâmica e da madeira
(ver item 3.3.5)

Devido a falta de disponibilidade de equipamento para a medição da condutibilidade térmica dos materiais usados, foi realizado um levantamento bibliográfico. Todas as fontes consultadas (ASHRAE³, BRE⁹, CSTB¹⁷, Costa¹³, Rivero⁴², Kreith²⁵) apresentam os valores da condutibilidade associados à massa específica do material. Visto haver uma considerável disparidade entre alguns valores, realizou-se uma regressão linear como forma de aproximação.

Obtiveram-se as seguintes equações, onde

x = condutibilidade térmica

y = massa específica

● Madeira

$$y = 0,000135507x + 0,0760358656$$

Logo, para as massas específicas medidas:

- pinho: $x = 580 \text{ kg/m}^3$; $y = 0,155 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

- compensado: $x = 600 \text{ kg/m}^3$; $y = 0,157 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

● Cerâmica

$$y = 0,0009377925x - 0,8715783007$$

Logo, para $x = 1.542 \text{ kg/m}^3$; $y = 0,574 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

ANEXO IV - Simulações realizadas para os testes 1, 2, 3 e 4
(cobertura padrão)
(ver item 4.3)

Simulação do teste 1, dia 18 de Fevereiro, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																	
DATA: 18/2/1993																	
HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSP	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITH	RSFC	RSFA	RIF	RT	VARPS	LT
6.00	17.40	16.46	15.57	17.42	19.14	19.81	21.10	0.05	0.19	4.02	0.32	6.24	0.35	0.17	0.014	0.00	11.26
6.50	17.40	17.07	17.12	17.81	19.23	19.85	21.10	0.05	0.19	4.27	0.32	6.50	0.35	0.17	0.014	0.00	11.26
7.00	17.80	18.56	18.30	18.39	19.65	20.19	21.50	0.05	0.18	16.79	0.32	6.93	0.35	0.17	0.014	0.00	11.26
7.50	18.20	20.65	20.49	19.57	20.44	20.01	22.00	0.05	0.18	7.48	0.31	7.80	0.34	0.17	0.014	-10.26	11.18
8.00	19.30	22.95	22.73	20.42	21.41	21.49	22.20	0.05	0.18	5.46	0.31	7.54	0.34	0.17	0.014	-10.26	11.10
8.50	19.70	26.15	25.75	21.92	22.49	22.13	22.10	0.05	0.18	4.60	0.30	9.00	0.33	0.17	0.014	-10.26	11.01
9.00	20.70	30.29	29.70	24.66	23.96	23.04	22.20	0.05	0.17	4.20	0.29	4.10	0.32	0.16	0.014	-41.05	10.89
9.50	23.20	34.78	34.04	26.93	25.73	24.10	22.10	0.05	0.17	3.74	0.28	3.47	0.31	0.16	0.014	-51.31	10.29
10.00	24.70	37.81	37.00	28.60	27.44	25.29	22.30	0.05	0.16	3.54	0.28	3.50	0.31	0.16	0.016	-61.57	9.51
10.50	25.70	39.86	39.07	29.75	29.01	26.59	23.10	0.05	0.16	3.41	0.27	4.00	0.30	0.16	0.016	-71.83	9.24
11.00	26.20	38.25	37.88	30.25	29.70	27.30	23.30	0.05	0.16	3.64	0.27	4.54	0.30	0.16	0.016	-71.83	8.88
11.50	27.50	42.56	41.52	31.53	30.56	27.80	23.60	0.05	0.16	3.34	0.27	3.70	0.29	0.15	0.016	-71.83	8.12
12.00	27.70	44.14	43.27	32.97	31.69	28.50	23.50	0.05	0.15	3.30	0.26	3.44	0.29	0.15	0.016	-61.57	7.83
12.50	29.10	46.30	45.32	34.05	32.82	29.36	24.00	0.05	0.15	3.20	0.26	3.47	0.29	0.15	0.016	-71.83	7.07
13.00	29.60	43.30	42.78	33.98	32.97	29.51	24.40	0.03	0.15	3.47	0.26	3.74	0.29	0.15	0.016	-51.31	6.07
13.50	30.80	37.91	37.77	32.06	31.61	29.05	23.90	0.02	0.16	4.01	0.27	4.90	0.30	0.15	0.016	-61.57	6.18
14.00	30.20	40.31	39.55	32.35	31.21	28.71	24.40	0.03	0.16	3.70	0.27	3.57	0.30	0.15	0.016	-41.05	5.56
14.50	30.00	42.22	41.51	33.27	31.73	28.94	24.40	0.05	0.15	3.56	0.26	3.20	0.29	0.15	0.016	-41.05	5.54
15.00	30.60	35.53	35.50	31.50	30.72	28.67	24.50	0.02	0.16	4.51	0.27	4.00	0.30	0.15	0.016	-30.78	5.20
15.50	30.50	38.37	37.75	31.86	30.63	28.66	25.40	0.05	0.16	3.98	0.27	3.47	0.30	0.15	0.016	-30.78	5.06
16.00	30.20	40.72	39.84	33.00	31.32	29.07	25.00	0.05	0.15	3.79	0.27	3.10	0.30	0.15	0.019	-10.26	4.98
16.50	31.10	37.84	37.55	32.14	31.16	28.97	25.00	0.03	0.16	4.08	0.27	3.70	0.30	0.15	0.019	-10.26	4.90
17.00	30.60	35.23	35.09	31.15	30.29	28.84	24.80	0.03	0.16	4.54	0.28	3.94	0.30	0.15	0.019	-10.26	4.51
17.50	30.20	31.87	31.37	29.82	29.10	27.78	24.90	0.02	0.16	5.62	0.28	4.21	0.31	0.15	0.019	-10.26	4.73
18.00	29.50	29.63	29.55	28.31	27.97	27.05	24.90	0.02	0.16	6.47	0.29	5.44	0.32	0.16	0.019	10.26	4.51

Simulação do teste 1, dia 19 de fevereiro, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																	
DATA: 19/2/1983																	
HORA	TEX	TST	TI1	TAT	TS1	TI2	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITH	RSPL	RSPR	RIF	RT	VAZS	UT
6.00	19.50	18.12	19.25	19.91	20.72	21.37	22.60	0.05	0.18	4.36	0.31	0.14	0.35	0.17	0.016	10.26	7.79
6.50	19.50	18.52	19.50	19.57	20.86	21.53	22.90	0.05	0.18	3.82	0.31	0.80	0.35	0.17	0.016	10.26	7.87
7.00	19.70	20.75	20.51	20.60	21.33	21.80	23.00	0.05	0.18	13.45	0.31	8.34	0.34	0.17	0.016	10.26	7.95
7.50	20.50	23.45	23.13	22.46	22.15	22.28	23.00	0.05	0.18	8.16	0.30	0.40	0.34	0.17	0.016	20.52	8.12
8.00	22.40	27.39	25.90	24.46	23.56	23.28	23.60	0.05	0.17	5.37	0.30	3.03	0.33	0.17	0.016	20.52	7.95
8.50	24.10	31.25	30.55	25.71	25.27	24.46	23.90	0.05	0.17	4.56	0.29	3.29	0.32	0.16	0.016	20.52	7.79
9.00	25.00	35.24	34.50	28.77	27.12	25.72	24.20	0.05	0.16	4.02	0.28	3.14	0.31	0.16	0.016	41.05	7.47
9.50	27.40	38.33	37.55	30.41	28.89	26.98	24.50	0.05	0.16	3.73	0.27	3.23	0.30	0.16	0.016	41.05	7.15
10.00	28.30	38.45	37.91	31.30	29.58	27.76	24.50	0.03	0.16	3.83	0.27	3.31	0.30	0.15	0.016	41.05	6.83
10.50	29.40	43.20	42.20	33.06	31.37	28.73	25.00	0.05	0.15	3.44	0.26	3.14	0.29	0.15	0.016	51.31	6.43
11.00	30.00	43.07	42.44	33.40	32.35	29.44	24.80	0.05	0.15	3.44	0.26	3.60	0.29	0.15	0.016	41.05	6.10
11.50	30.10	45.55	44.59	34.56	33.11	29.91	24.90	0.05	0.15	3.33	0.26	3.29	0.29	0.15	0.016	51.31	5.70
12.00	30.90	41.38	41.07	33.74	33.02	30.27	25.40	0.03	0.15	3.69	0.26	4.17	0.29	0.15	0.016	30.78	5.46
12.50	31.20	47.79	46.50	34.08	33.83	30.46	25.40	0.05	0.15	3.29	0.26	2.84	0.28	0.15	0.016	41.05	5.14
13.00	32.50	48.41	47.82	37.08	35.06	31.27	25.40	0.05	0.15	3.25	0.25	2.94	0.28	0.15	0.019	30.78	4.90
13.50	33.30	50.30	49.09	37.33	35.86	31.87	25.60	0.05	0.15	3.16	0.25	3.20	0.28	0.15	0.019	30.78	4.65
14.00	32.70	45.90	45.35	36.63	35.81	32.55	27.00	0.03	0.15	3.48	0.25	4.00	0.28	0.15	0.019	20.52	4.49
14.50	33.40	49.15	48.00	37.74	35.00	32.33	26.40	0.05	0.15	3.31	0.25	3.10	0.28	0.15	0.019	30.78	4.25
15.00	34.10	41.75	41.59	35.89	34.95	32.21	27.00	0.02	0.15	4.01	0.26	3.84	0.29	0.15	0.019	20.52	4.09
15.50	34.20	39.95	39.73	34.65	33.83	31.54	27.20	0.03	0.15	4.17	0.26	4.01	0.29	0.15	0.019	20.52	3.93
16.00	33.20	38.03	37.53	33.29	32.95	31.07	27.50	0.05	0.15	4.31	0.27	0.40	0.30	0.15	0.019	0.00	3.93
16.50	31.90	34.33	34.83	31.54	31.81	30.47	27.60	0.05	0.16	4.98	0.27	11.24	0.30	0.15	0.019	0.00	3.93
17.00	30.70	32.47	32.41	30.67	30.48	29.48	27.20	0.02	0.16	5.96	0.28	6.79	0.31	0.15	0.019	10.26	4.01
17.50	30.30	33.10	32.55	30.06	30.02	29.11	27.40	0.05	0.16	5.09	0.28	12.37	0.31	0.15	0.019	10.26	4.09
18.00	29.30	30.05	30.17	29.18	29.11	28.38	26.60	0.02	0.16	7.16	0.28	10.04	0.31	0.15	0.019	10.26	4.17

Simulação do teste 2, dia 24 de março, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																	
HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSP	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITH	MSPL	MSPR	MIF	RT	VAIRS	UI
6.00	13.20	12.44	12.50	13.48	15.36	17.32	19.20	0.05	0.19	3.96	0.33	0.20	0.37	0.17	0.014	0.00	14.48
6.50	13.20	13.07	13.15	13.56	15.43	17.35	19.20	0.05	0.19	5.10	0.33	0.20	0.36	0.17	0.014	0.00	14.48
7.00	13.10	14.32	14.32	14.41	15.71	17.49	19.20	0.05	0.19	8.05	0.33	0.00	0.35	0.17	0.014	10.26	14.56
7.50	14.00	16.75	16.51	17.72	17.30	17.78	19.10	0.05	0.19	3.63	0.32	4.97	0.35	0.17	0.014	10.26	14.64
8.00	18.40	22.70	22.15	19.53	15.72	18.56	19.20	0.05	0.18	5.26	0.31	3.97	0.34	0.17	0.014	-20.52	14.48
8.50	19.10	25.79	25.34	21.95	20.43	19.75	19.40	0.05	0.18	4.79	0.30	3.23	0.33	0.17	0.014	-20.52	14.32
9.00	21.50	30.13	29.47	23.67	22.15	20.85	19.40	0.05	0.17	4.01	0.29	3.23	0.33	0.17	0.014	-82.09	13.67
9.50	27.20	31.61	31.12	24.77	23.56	21.89	19.50	0.05	0.17	3.88	0.29	3.40	0.32	0.16	0.014	-82.09	13.03
10.00	22.90	28.07	25.33	24.03	23.90	22.41	19.70	0.05	0.17	4.24	0.29	7.13	0.32	0.16	0.014	-82.09	12.38
10.50	22.50	26.93	25.33	23.55	23.50	22.40	20.20	0.03	0.17	4.80	0.30	10.00	0.33	0.16	0.014	-71.83	11.82
11.00	27.60	28.52	25.13	24.36	23.41	22.16	19.90	0.03	0.17	4.60	0.29	3.80	0.33	0.16	0.014	-51.31	11.42
11.50	23.50	30.02	29.55	24.83	24.02	22.72	20.70	0.03	0.17	4.25	0.29	3.90	0.32	0.16	0.014	-51.31	11.01
12.00	23.50	31.65	31.21	25.87	24.59	22.96	20.30	0.03	0.17	4.11	0.29	3.43	0.32	0.16	0.014	-71.83	10.45
12.50	24.50	31.50	31.17	25.73	24.98	23.30	20.40	0.03	0.17	4.08	0.29	4.07	0.32	0.16	0.016	-71.83	9.89
13.00	24.10	31.95	31.53	25.97	25.17	23.47	20.50	0.03	0.17	4.05	0.29	4.04	0.32	0.16	0.016	-41.05	9.57
13.50	24.30	29.30	29.15	26.07	24.84	23.39	20.50	0.02	0.17	4.92	0.29	3.47	0.32	0.16	0.016	-30.78	9.32
14.00	25.60	34.90	34.12	27.35	25.89	24.18	21.90	0.02	0.16	3.80	0.28	3.27	0.31	0.16	0.016	-41.05	9.00
14.50	25.40	33.34	33.03	25.99	25.49	24.65	21.50	0.02	0.16	3.94	0.28	4.60	0.31	0.16	0.016	-30.78	8.76
15.00	25.00	29.10	29.14	26.10	25.82	24.45	21.50	0.02	0.17	4.93	0.29	0.87	0.32	0.16	0.016	-51.31	8.36
15.50	25.30	29.03	28.53	25.49	25.18	24.00	21.60	0.02	0.17	4.81	0.29	0.30	0.32	0.16	0.016	-51.31	7.95
16.00	24.60	28.85	28.53	25.68	24.86	23.71	21.50	0.02	0.17	5.01	0.29	4.00	0.32	0.16	0.016	-10.26	7.87
16.50	25.10	28.43	28.25	25.22	24.70	23.53	21.60	0.02	0.17	4.95	0.29	4.60	0.32	0.16	0.016	-10.26	7.79
17.00	24.50	27.10	27.01	24.58	24.35	23.44	21.60	0.02	0.17	5.33	0.29	0.10	0.33	0.16	0.016	-20.52	7.63
17.50	24.00	24.98	25.02	23.61	23.68	23.01	21.40	0.02	0.17	6.37	0.30	16.07	0.33	0.16	0.016	-10.26	7.55
18.00	23.30	22.83	22.93	22.50	22.91	22.41	21.20	0.02	0.18	9.32	0.30	10.80	0.33	0.16	0.016	-10.26	7.47

Simulação do teste 2, dia 25 de março, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																	
HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSI	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITR	RSPL	RSPR	RIF	RT	VAIRS	UI
6.00	14.60	14.15	14.32	14.64	17.71	18.53	20.00	0.05	0.19	5.58	0.33	5.15	0.36	0.17	0.014	10.26	10.53
6.50	14.10	13.84	14.00	14.53	17.43	18.23	19.60	0.05	0.19	4.71	0.33	5.25	0.35	0.17	0.014	10.26	10.61
7.00	14.10	15.55	15.51	15.10	17.53	18.23	19.70	0.05	0.19	9.99	0.32	5.55	0.35	0.17	0.014	10.26	10.69
7.50	14.60	18.38	18.18	18.87	18.31	18.75	20.10	0.05	0.19	4.22	0.32	4.54	0.35	0.17	0.014	10.26	10.77
8.00	19.20	24.60	24.00	25.34	19.82	19.48	19.80	0.05	0.18	4.69	0.31	4.55	0.34	0.17	0.014	-10.26	10.69
8.50	19.40	27.37	25.90	22.81	21.45	20.58	19.80	0.05	0.17	4.50	0.30	3.30	0.33	0.17	0.014	-10.26	10.61
9.00	22.00	28.08	27.81	23.71	22.60	21.47	19.90	0.05	0.17	4.49	0.30	3.50	0.33	0.17	0.014	-61.57	10.13
9.50	27.80	34.19	33.15	25.46	24.11	22.41	20.30	0.05	0.17	3.65	0.29	3.30	0.32	0.16	0.016	-51.31	9.73
10.00	23.00	32.39	32.05	25.91	25.06	23.22	20.20	0.03	0.17	3.92	0.29	3.91	0.32	0.16	0.016	-61.57	9.24
10.50	24.00	31.77	31.45	26.08	25.24	23.46	20.30	0.03	0.17	4.09	0.29	3.90	0.32	0.16	0.016	-51.31	8.84
11.00	24.50	32.35	31.95	26.02	25.47	23.75	20.80	0.03	0.17	3.97	0.29	4.54	0.32	0.16	0.016	-41.05	8.52
11.50	24.10	34.33	33.72	27.13	26.05	24.15	21.10	0.03	0.16	3.83	0.28	3.65	0.31	0.16	0.016	-41.05	8.20
12.00	25.10	37.57	35.77	28.26	27.11	24.77	21.20	0.03	0.16	3.52	0.28	3.54	0.31	0.16	0.016	-41.05	7.87
12.50	25.30	33.09	33.05	27.86	27.19	25.18	21.40	0.03	0.16	4.13	0.28	4.27	0.31	0.16	0.016	-41.05	7.55
13.00	26.30	31.88	31.52	27.13	26.42	24.67	21.20	0.02	0.16	4.35	0.29	4.20	0.31	0.16	0.016	-51.31	7.15
13.50	25.90	38.11	37.11	28.65	27.30	25.10	21.90	0.03	0.16	3.53	0.28	3.37	0.31	0.16	0.016	-41.05	6.83
14.00	25.50	38.10	37.53	29.22	28.19	25.63	21.40	0.03	0.16	3.54	0.27	3.67	0.30	0.16	0.016	-20.52	6.67
14.50	25.30	37.68	37.15	29.22	28.43	25.86	21.40	0.03	0.16	3.60	0.27	4.04	0.30	0.16	0.016	-20.52	6.51
15.00	25.40	36.43	35.04	28.66	28.25	25.82	21.40	0.03	0.16	3.69	0.28	5.01	0.31	0.16	0.016	-20.52	6.34
15.50	26.00	32.24	32.12	27.46	27.28	25.43	21.60	0.02	0.16	4.29	0.28	6.77	0.31	0.16	0.016	-20.52	6.18
16.00	26.00	32.07	31.52	27.11	26.63	24.93	21.60	0.03	0.16	4.28	0.28	4.81	0.31	0.16	0.016	-20.52	6.02
16.50	25.70	29.97	29.59	25.41	25.96	24.53	21.60	0.03	0.17	4.73	0.29	4.94	0.32	0.16	0.016	-10.26	5.84
17.00	25.50	27.03	27.05	25.20	24.96	23.95	21.60	0.02	0.17	5.82	0.29	6.24	0.32	0.16	0.016	-10.26	5.86
17.50	24.80	24.87	24.97	24.34	24.03	23.38	21.70	0.03	0.17	8.27	0.30	5.60	0.33	0.16	0.016	-10.26	5.78
18.00	24.30	23.55	23.53	23.04	23.43	23.16	22.40	0.03	0.17	8.50	0.30	10.14	0.33	0.16	0.016	0.00	5.78

Simulação do teste 3, dia 08 de abril, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																	
DATA	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSP	TIF	TIV	RSTC	RSTR	RITC	RITR	MSPL	MSFR	RIF	RT	VA4RS	UI
6.00	15.70	14.71	14.90	15.63	15.91	17.45	18.50	0.05	0.19	4.04	0.33	6.80	0.35	0.17	0.013	0.00	17.54
6.50	15.70	15.34	15.35	15.84	15.99	17.48	18.50	0.05	0.19	4.82	0.33	7.12	0.35	0.17	0.013	0.00	17.54
7.00	15.80	17.22	17.15	17.28	17.39	17.67	18.50	0.02	0.19	7.10	0.32	10.00	0.35	0.17	0.013	0.00	17.54
7.50	17.30	20.19	19.97	18.12	18.31	18.31	18.90	0.03	0.18	5.88	0.32	13.40	0.35	0.17	0.013	0.00	17.54
8.00	17.70	22.35	22.11	18.44	19.39	19.14	19.30	0.03	0.18	4.66	0.31	7.64	0.34	0.17	0.013	-30.78	17.29
8.50	17.30	21.77	21.58	19.11	19.79	19.40	18.80	0.02	0.18	5.24	0.31	8.50	0.34	0.17	0.013	-30.78	17.05
9.00	18.40	23.24	23.71	20.09	20.37	19.77	19.00	0.02	0.18	4.68	0.31	11.61	0.34	0.17	0.013	-71.83	16.49
9.50	19.00	25.35	25.11	21.10	21.01	20.16	18.90	0.02	0.18	4.52	0.30	7.70	0.33	0.17	0.013	-61.57	16.01
10.00	19.90	29.41	28.91	22.55	22.10	20.75	18.90	0.03	0.17	3.88	0.30	4.80	0.33	0.17	0.013	-92.35	15.28
10.50	20.40	30.75	30.31	23.60	23.11	21.45	18.90	0.03	0.17	3.81	0.29	4.60	0.32	0.16	0.014	-82.09	14.84
11.00	21.30	32.37	31.87	24.69	24.03	22.19	19.30	0.03	0.17	3.72	0.29	4.27	0.32	0.16	0.014	-92.35	13.91
11.50	22.20	33.92	33.39	25.49	24.99	22.97	19.80	0.03	0.17	3.61	0.28	4.50	0.31	0.16	0.014	-82.09	13.27
12.00	22.60	34.58	34.09	25.17	25.55	23.27	19.40	0.03	0.17	3.60	0.28	4.30	0.31	0.16	0.014	-71.83	12.71
12.50	23.30	35.39	34.87	25.79	25.02	23.64	19.60	0.03	0.16	3.58	0.28	4.00	0.31	0.16	0.014	-71.83	12.14
13.00	23.90	34.70	34.32	27.00	25.48	24.30	20.60	0.03	0.15	3.70	0.28	4.61	0.31	0.16	0.014	-61.57	11.66
13.50	24.40	34.08	33.73	27.17	25.47	24.31	20.40	0.03	0.16	3.83	0.28	4.20	0.31	0.16	0.014	-61.57	11.18
14.00	25.00	37.34	35.55	28.23	27.09	24.65	20.70	0.05	0.16	3.53	0.28	3.57	0.31	0.16	0.014	-51.31	10.77
14.50	25.30	37.35	35.55	27.26	27.73	25.24	21.10	0.05	0.16	3.38	0.28	3.64	0.30	0.16	0.014	-51.31	10.37
15.00	23.30	33.53	33.33	25.50	27.28	25.27	21.40	0.03	0.17	3.78	0.28	8.00	0.31	0.16	0.014	-30.78	10.13
15.50	23.90	32.21	31.99	25.11	26.72	24.98	21.60	0.03	0.17	3.97	0.28	8.70	0.31	0.16	0.016	-20.52	9.97
16.00	24.00	32.97	32.59	25.14	25.46	24.55	21.30	0.05	0.17	3.86	0.28	10.84	0.31	0.16	0.016	-30.78	9.73
16.50	23.90	30.93	30.82	25.61	25.25	24.78	22.00	0.05	0.17	4.13	0.29	8.60	0.32	0.16	0.016	-20.52	9.57
17.00	23.50	27.99	28.03	24.42	25.38	24.18	21.50	0.05	0.17	4.64	0.29	7.54	0.32	0.16	0.016	-20.52	9.40
17.50	23.20	24.75	24.93	22.87	24.37	23.75	22.10	0.05	0.17	5.56	0.30	6.50	0.33	0.16	0.016	-20.52	9.24
18.00	22.10	22.18	22.42	21.49	23.26	23.06	22.10	0.05	0.18	7.28	0.30	6.14	0.33	0.16	0.016	10.26	9.32

Simulação do teste 3, dia 09 de abril, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA
 DATA 9 de 1983

HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSF	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITR	RSFC	RSFR	MIF	PT	VAIROS	UI
6.00	13.00	13.48	13.59	14.52	17.49	18.44	20.20	0.05	0.19	4.04	0.33	0.17	0.36	0.17	0.014	20.52	12.30
6.50	14.20	13.92	14.03	13.73	17.46	18.40	20.20	0.05	0.19	10.79	0.33	4.04	0.36	0.17	0.014	10.26	12.38
7.00	12.90	14.39	14.45	14.37	17.26	17.96	19.20	0.05	0.19	17.84	0.33	0.24	0.36	0.17	0.014	20.52	12.04
7.50	13.00	17.30	17.12	17.45	17.73	18.20	19.50	0.05	0.19	5.27	0.32	11.04	0.36	0.17	0.014	10.26	12.62
8.00	17.50	23.01	22.47	19.68	19.02	18.02	19.30	0.05	0.18	4.63	0.31	10.91	0.34	0.17	0.014	-20.52	12.46
8.50	17.60	25.32	24.74	20.87	20.56	19.97	19.70	0.05	0.18	4.51	0.30	0.34	0.34	0.17	0.014	-10.26	12.38
9.00	19.70	28.75	28.22	22.46	22.00	20.92	19.70	0.05	0.17	4.01	0.30	4.70	0.33	0.17	0.014	-51.31	11.98
9.50	20.60	32.25	31.59	23.92	23.60	22.06	20.10	0.05	0.17	3.65	0.29	0.31	0.32	0.16	0.014	-41.05	11.66
10.00	21.10	33.08	32.51	24.58	24.66	22.74	19.70	0.05	0.17	3.59	0.29	19.04	0.32	0.16	0.014	-51.31	11.26
10.50	21.50	32.31	32.00	24.73	25.02	23.09	19.70	0.05	0.17	3.70	0.29	11.30	0.32	0.16	0.014	-51.31	10.85
11.00	22.00	33.98	33.42	25.45	25.39	23.35	19.90	0.05	0.17	3.60	0.28	9.73	0.31	0.16	0.014	-51.31	10.45
11.50	22.40	33.28	32.95	25.51	25.42	23.86	20.50	0.05	0.17	3.68	0.28	11.17	0.31	0.16	0.014	-41.05	10.13
12.00	22.70	31.71	31.49	24.95	25.67	23.87	20.50	0.05	0.17	3.83	0.29	8.30	0.32	0.16	0.016	-20.52	9.97
12.50	22.50	32.14	31.72	24.98	25.42	23.53	20.30	0.05	0.17	3.80	0.29	9.77	0.32	0.16	0.016	-20.52	9.81
13.00	22.50	36.40	35.47	26.96	26.05	23.82	20.30	0.05	0.16	3.52	0.28	3.80	0.31	0.16	0.016	-30.78	9.57
13.50	23.90	38.57	37.77	27.89	27.25	24.51	20.50	0.05	0.16	3.35	0.28	4.29	0.30	0.16	0.016	-20.52	9.40
14.00	24.00	39.62	38.85	28.41	28.07	25.17	20.40	0.05	0.16	3.28	0.27	0.30	0.30	0.16	0.016	-41.05	9.08
14.50	24.10	39.62	38.44	28.38	28.53	25.67	20.80	0.05	0.16	3.32	0.27	14.33	0.30	0.16	0.016	-41.05	8.76
15.00	24.20	37.35	36.97	27.67	28.52	25.93	21.30	0.05	0.16	3.41	0.27	7.80	0.30	0.16	0.016	-30.78	8.52
15.50	23.50	32.57	32.51	26.33	27.33	25.26	20.90	0.03	0.17	3.90	0.28	7.41	0.31	0.16	0.016	-30.78	8.28
16.00	24.00	32.67	32.33	26.27	25.51	24.59	20.80	0.05	0.17	3.92	0.28	11.64	0.31	0.16	0.016	-10.26	8.20
16.50	24.10	31.02	30.57	25.54	26.00	24.38	21.20	0.05	0.17	4.10	0.29	9.60	0.32	0.16	0.016	0.00	8.20
17.00	23.70	27.61	27.73	23.86	25.04	23.80	21.00	0.05	0.17	4.55	0.29	7.03	0.32	0.16	0.016	-10.26	8.12
17.50	22.50	24.02	24.25	22.24	23.73	23.01	21.00	0.05	0.17	5.63	0.30	6.01	0.33	0.16	0.016	0.00	8.12
18.00	21.50	21.43	21.57	20.86	22.59	22.41	21.50	0.05	0.18	7.57	0.31	6.19	0.34	0.16	0.016	10.26	8.20

Simulação do teste 4, dia 13 de abril, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																		
DATA	HORAS	TEX	TST	TIT	TAT	TSF	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITR	MSPL	MSFR	MIF	RT	VARRS	UI
6.00	18.50	17.44	17.52	18.35	19.21	19.65	20.50	0.05	0.18	4.03	0.32	7.08	0.33	0.17	0.014	0.00	13.27	
6.50	18.50	18.03	18.04	18.75	19.29	19.68	20.50	0.05	0.18	4.23	0.32	9.13	0.33	0.17	0.014	0.00	13.27	
7.00	18.90	20.23	20.05	19.51	19.81	20.06	20.90	0.05	0.18	9.00	0.31	11.21	0.35	0.17	0.014	10.26	13.35	
7.50	19.40	20.63	20.50	20.77	20.36	20.46	20.90	0.05	0.18	6.76	0.31	4.90	0.34	0.17	0.014	0.00	13.35	
8.00	20.90	21.97	21.85	20.88	20.80	20.71	20.80	0.03	0.18	7.26	0.31	8.40	0.34	0.17	0.014	-20.52	13.19	
8.50	20.70	22.18	22.12	21.17	21.14	21.00	20.90	0.03	0.18	7.33	0.31	10.90	0.34	0.17	0.014	-20.52	13.03	
9.00	21.00	25.73	25.34	22.62	21.87	21.35	20.90	0.03	0.17	5.17	0.30	4.00	0.33	0.17	0.014	-20.52	12.67	
9.50	22.10	27.21	25.95	23.92	22.88	22.08	21.10	0.05	0.17	4.97	0.30	3.60	0.33	0.16	0.014	-30.78	12.62	
10.00	23.40	30.47	29.93	24.98	23.89	22.70	21.10	0.05	0.17	4.22	0.29	3.61	0.32	0.16	0.014	-61.57	12.14	
10.50	23.70	32.04	31.58	25.69	24.98	23.02	21.40	0.05	0.17	4.02	0.29	3.84	0.32	0.16	0.014	-61.57	11.66	
11.00	24.20	32.35	31.96	26.40	25.68	24.13	21.70	0.03	0.17	4.05	0.29	4.14	0.32	0.16	0.014	-41.05	11.34	
11.50	24.70	34.27	33.77	27.27	25.41	24.61	21.80	0.03	0.16	3.85	0.28	3.90	0.31	0.16	0.014	-30.78	11.10	
12.00	25.20	36.87	38.03	29.45	27.72	25.29	21.70	0.05	0.16	3.51	0.27	3.10	0.30	0.16	0.014	-51.31	10.69	
12.50	25.70	39.51	38.94	30.02	28.96	26.32	22.20	0.05	0.16	3.46	0.27	3.64	0.30	0.16	0.014	-41.05	10.37	
13.00	26.50	38.17	37.75	29.96	29.24	26.67	22.20	0.05	0.16	3.62	0.27	4.14	0.30	0.16	0.016	-51.31	9.97	
13.50	27.20	37.57	37.13	29.90	29.21	26.81	22.60	0.05	0.16	3.71	0.27	4.22	0.30	0.16	0.016	-41.05	9.65	
14.00	27.40	33.58	33.51	28.62	28.46	28.45	22.40	0.05	0.16	4.18	0.28	7.00	0.31	0.16	0.016	-30.78	9.40	
14.50	27.00	32.48	32.23	27.95	27.53	25.86	22.50	0.05	0.16	4.40	0.28	0.01	0.31	0.16	0.016	-30.78	9.16	
15.00	26.70	32.49	32.13	28.02	27.11	25.04	22.60	0.05	0.16	4.46	0.28	3.80	0.31	0.16	0.016	-10.26	9.08	
15.50	27.00	30.78	30.70	27.15	26.73	25.36	22.70	0.05	0.17	4.70	0.29	0.00	0.32	0.16	0.016	-10.26	9.00	
16.00	26.40	28.35	28.40	26.35	26.05	25.05	22.90	0.05	0.17	5.62	0.29	0.00	0.32	0.16	0.016	-10.26	8.92	
16.50	25.90	26.24	25.35	24.94	25.28	24.65	23.10	0.05	0.17	6.35	0.29	10.04	0.32	0.16	0.016	-10.26	8.84	
17.00	24.60	24.84	24.90	23.14	24.54	24.19	23.20	0.05	0.17	5.93	0.30	0.60	0.33	0.16	0.016	0.00	8.84	
17.50	22.50	22.45	22.57	22.13	23.61	23.47	22.70	0.05	0.18	8.67	0.30	6.53	0.33	0.16	0.016	0.00	8.84	
18.00	21.60	21.29	21.44	21.43	22.79	22.87	22.60	0.05	0.18	21.90	0.31	6.71	0.34	0.17	0.016	10.26	8.92	

Simulação do teste 4, dia 14 de abril, com impressão de 30 em 30 min, das 6 às 18 horas.

DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPERATURAS NA COBERTURA																		
DATA: 14/04/1963																		
HORA	TEX	TST	TIT	TAT	TSF	TIF	TIN	RSTC	RSTR	RITC	RITR	MSPL	MSFR	MIF	PT	VAIRS	UI	
6.00	14.00	13.72	13.94	13.79	18.13	19.16	21.00	0.05	0.19	13.26	0.33	4.57	0.35	0.17	0.014	10.26	11.74	
6.50	12.50	12.54	12.82	13.45	17.61	18.54	20.30	0.05	0.20	4.46	0.33	4.63	0.35	0.17	0.014	10.26	11.74	
7.00	12.70	13.61	13.58	13.56	17.46	18.50	20.50	0.05	0.19	15.36	0.33	4.74	0.35	0.17	0.014	0.00	11.74	
7.50	12.70	15.94	15.85	15.37	17.79	18.53	20.20	0.05	0.19	4.60	0.32	6.65	0.35	0.17	0.014	20.52	11.98	
8.00	16.30	21.55	21.10	19.71	19.11	19.32	20.60	0.05	0.18	5.43	0.31	10.20	0.34	0.17	0.014	0.00	11.98	
8.50	18.10	25.25	24.80	20.53	20.69	20.26	20.30	0.05	0.18	4.44	0.30	14.63	0.34	0.17	0.014	-10.26	11.90	
9.00	19.20	28.68	28.14	22.42	22.22	21.26	20.30	0.05	0.17	4.02	0.30	6.17	0.33	0.17	0.014	-41.05	11.78	
9.50	20.50	30.47	30.02	23.27	23.53	22.20	20.40	0.05	0.17	3.80	0.29	12.03	0.32	0.16	0.014	-30.78	11.34	
10.00	20.80	33.58	33.17	24.83	24.75	22.96	20.40	0.05	0.17	3.55	0.29	8.27	0.32	0.16	0.014	-61.57	10.85	
10.50	21.60	35.47	34.88	25.82	25.94	23.79	20.50	0.05	0.17	3.45	0.28	16.30	0.31	0.16	0.014	-51.31	10.45	
11.00	22.20	37.35	36.57	25.54	25.90	24.46	20.60	0.05	0.16	3.32	0.28	10.58	0.31	0.16	0.014	-51.31	10.05	
11.50	22.30	38.85	38.08	27.37	27.78	25.11	20.80	0.05	0.15	3.26	0.27	10.12	0.30	0.16	0.016	-41.05	9.73	
12.00	22.80	39.59	38.87	27.75	28.44	25.57	20.80	0.05	0.15	3.22	0.27	8.89	0.30	0.16	0.016	-41.05	9.40	
12.50	22.90	40.14	39.42	28.32	28.91	25.96	21.00	0.05	0.16	3.22	0.27	8.91	0.30	0.16	0.016	-41.05	9.08	
13.00	23.50	36.78	35.43	27.27	28.54	25.98	21.20	0.03	0.16	3.43	0.28	6.88	0.30	0.16	0.016	-41.05	8.76	
13.50	23.40	36.01	35.59	26.85	28.10	25.76	21.50	0.03	0.16	3.48	0.28	6.91	0.31	0.16	0.016	-30.78	8.52	
14.00	23.20	32.45	32.33	25.57	27.23	25.29	21.30	0.03	0.17	3.78	0.28	6.28	0.31	0.16	0.016	-41.05	8.20	
14.50	22.80	34.60	34.04	26.43	25.93	24.95	21.40	0.05	0.17	3.55	0.28	9.31	0.31	0.16	0.016	-20.52	8.04	
15.00	23.50	31.38	31.38	24.96	25.57	24.86	21.50	0.05	0.17	3.85	0.29	6.30	0.31	0.16	0.016	-10.26	7.95	
15.50	22.40	34.41	33.58	25.85	25.48	24.67	21.60	0.05	0.17	3.62	0.28	8.70	0.31	0.16	0.016	-10.26	7.87	
16.00	22.80	29.58	29.78	24.53	25.11	24.61	21.50	0.05	0.17	4.11	0.29	6.60	0.32	0.16	0.016	-10.26	7.79	
16.50	22.50	25.70	25.94	22.65	24.77	23.87	21.50	0.05	0.17	4.80	0.30	5.79	0.33	0.16	0.016	0.00	7.79	
17.00	21.30	22.65	23.09	21.38	23.41	22.98	21.50	0.05	0.18	5.96	0.30	5.87	0.33	0.16	0.016	0.00	7.79	
17.50	20.60	20.87	21.09	20.30	22.27	22.17	21.40	0.05	0.18	7.70	0.31	5.94	0.34	0.17	0.016	0.00	7.79	
18.00	19.80	19.45	19.55	19.38	21.39	21.55	21.40	0.05	0.18	10.92	0.31	5.90	0.34	0.17	0.016	10.26	7.87	

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. AHMAD, A.M. The thermal performance of concrete roofs and reed shading panels under arid summer conditions. In: BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Overseas Division of the Building Research Establishment, United Kingdom. Building in hot climates; a selection of overseas building notes. London, 1980. p.399-407.
2. AKUTSU, M. & SATO, N.M.N. Análise comparativa do comportamento térmico de alguns tipos de edificações convencionais. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RACIONALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO E SUA APLICAÇÃO ÀS HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL, São Paulo, 25-28 out. 1981. Anais. São Paulo, IPT, 1981. p.633-45.
3. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE handbook 1981: fundamentals. Atlanta, 1982.
4. ANDERSON, B.R. The assessment of U-values for insulated roofs. BRE Information, Garston, (3), 1981.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da condutância e transmitância térmica de componentes de construção por meio do método da caixa quente protegida: PMB-1228. Rio de Janeiro, 1978.
6. BANCO DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL & CENTRO DE ASSISTÊNCIA GERENCIAL DO RIO GRANDE DO SUL. Mercado de materiais de construção e perspectivas. In: _____ . Pesquisa sobre materiais de construção no R.S. Porto Alegre, 1977. v.3.
7. BLANCETT, R.S. et alii. A model for predicting residential attic space air temperatures. ASHRAE Transactions, New York, 85 (Pt.1):656-63, 1979.
8. BREWSTER, D. & ARKFELD, T. Analysis of attic ventilation test. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION. Gaithersburg, Md., July 13, 1979. Proceed-

- ings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.105-17.
9. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Standard U-values. Lancaster, The Construction Press, 1969. (BRE digest, 108)
 10. BURCH, D.M. & TREADO, S.J. Ventilating residences and their attics for energy conservation; an experimental study. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.73-104.
 11. CHEEMA, L.S.; CASTOR, S.E.; RIBEIRO, C.M.C. Refrigeração a baixo custo em casas no Nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE ENERGIA SOLAR, 2., Paraíba, 1978. p.949-58.
 12. CONDON, P.E. & CARROLL, W.L. Measurement and analysis of in situ dynamic thermal performance of building envelopes using heat flow meter arrays. In: ASHRAE/DOE-ORNL CONFERENCE ON THERMAL PERFORMANCE OF THE EXTERIOR ENVELOPES OF BUILDINGS, Kissimmee, Fla., Dec. 3-5, 1979. Proceedings. New York, ASHRAE, 1981. p.740-50.
 13. COSTA, E.C. da. Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.
 14. _____. Conforto térmico. 3.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
 15. DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. Solar energy thermal processes. New York, John Wiley, 1974.
 16. DUTT, G.S. & HARRJE, D.T. Forced ventilation for cooling attics in summer. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.25-38.
 17. FRANÇA. Centre Scientifique et Technique du Batiment. Règles Th-K77: règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction. Paris, 1977.
 18. GIVONI, B. The effect of roof construction upon indoor temperatures. In: INTERNATIONAL BIOCLIMATOLOGICAL CON-

- GRESS, 2., London, Sept. 1060. Proceedings. New York, Pergamon Press, 1962. p.237-45.
19. _____. Man, climate and architecture. 2.ed. London, Applied Science Pub., 1981.
20. GROT, R.A. & SIU, C.I. Effect of powered attic ventilation on ceiling heat transfer and cooling load in two townhouses. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.39-56.
21. HUMPHREYS, M.A. The optimum diameter for a globe thermometer for use indoors. Building Research Establishment. Current Paper, Garston, (9), 1978.
22. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, São Paulo. Conforto higrotérmico. In: _____. Avaliação de desempenho de habitações térreas unifamiliares. Rio de Janeiro, Banco Nacional da Habitação, 1981. v.4.
23. _____. Desempenho térmico de coberturas. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1979.
24. JAIN, S.P. & RAO, K.R. Experimental study on the effect of roof spray cooling on unconditioned and conditioned buildings. Building Science, 9:9-16, 1974.
25. KREITH, F. Princípios da transmissão do calor. 3.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
26. KUSUDA, T. Thermal response factors for multi-layer structures of various heat conduction systems. ASHRAE Transactions, New York, 75 (Pt.1):246-71, 1969.
27. LAMBERTS, R. & AROZTEGUI, J.M. Instrumentação - técnicas correntes de medição de parâmetros relativos ao conforto térmico. Porto Alegre, UFRGS, CPGEC, 1983.
28. MACKEY, C.O. & WRIGHT Jr., L.T. Periodic heat flow-composite walls or roofs. ASHRAE Transactions, New York, 52:283-96, 1946.
29. _____. Periodic heat flow-homogeneous walls of roofs. ASHRAE Transactions, New York, 50:293-312, 1944.

30. MARKUS, T.A. & MORRIS, E.N. Buildings, climate and energy. London, Pitman, 1980.
31. MASCARÓ, J.L. et alii. Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios; relatório de pesquisa. Porto Alegre, MIC/SIC/UFRGS, 1983.
32. MILBANK, N.O. A new approach to predicting the thermal environment in building at the early design stage. Building Research Establishment. Current Paper, Garston, (2), 1974.
33. MILBANK, N.O. & HARRINGTON-LYNN, J. Thermal response and the admittance procedure. Building Research Establishment. Current Paper, Garston, (61):38-51, 1974.
34. MITALAS, G.P. & STEPHENSON, D.G. Room thermal response factors. ASHRAE Transactions, New York, 73 (Pt.1): 1-10, 1967.
35. MUKHTAR, Y.A. Roofs in hot dry climates, with special reference to Northern Sudan. In: BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Overseas Division of the Building Research Establishment, United Kingdom. Building in hot climates; a selection of overseas building notes. London, 1980. p.1-15.
36. MUNCEY, R.W.R. Heat transfer calculations for buildings. London, Applied Science Pub., 1979.
37. PAWELSKI, M.J.; MITCHELL, J.W.; BECKMAN, W.A. Transfer functions for combined walls and pitched roofs. ASHRAE Transactions, New York, 85 (Pt.2):307-18, 1979.
38. PEAVY, B.A. A model for predicting the thermal performance of ventileted attic. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATED, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.119-49.
39. PROBERT, S.D. & THIRST, T.J. Thermal insulation provided by triangular sectioned attic spaces. Applied Energy, 3(1):41-50, Jan. 1977.
40. REAGAN, J.A. & ACKLAM, D.M. Solar reflectivity of common roofing materials and its influence on the roof heat

- gain of typical southwestern residences. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.1-13.
41. RIVERO, R. Comportamiento higrotermico del sobretecho de chapas de fibrocemento. Montevideo, 1980.
 42. _____. Vivienda: especificaciones, normas de calculo y nociones elementales sobre su acondicionamiento termico. Montevideo, Facultad de Arquitectura, 1970.
 43. STEPHENSON, D.G. & MITALAS, G.P. Cooling load calculations by thermal response factor method. ASHRAE Transactions, New York, 73(Pt.1):1-7, 1967.
 44. STRAATEN, J.F. van. Thermal performance of buildings. Amsterdam, Elsevier, 1967.
 45. VALENTIN, J. de. Desempenho térmico: coberturas de fibrocemento. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RACIONALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO E SUA APLICAÇÃO ÀS HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL, São Paulo, 25-28 out. 1981. Anais. São Paulo, IPT, 1981. p.615-32.
 46. VIELMO, H.A. Modelo matemático para simular o comportamento do sistema passivo do laboratório de energia solar da UFRGS. Porto Alegre, UFRGS, PPGEM, 1981. Dis. maestr.
 47. WETHERINGTON Jr., T.I. Measurement of attic temperatures in Florida. In: WORKSHOP ON SUMMER ATTIC AND WHOLE-HOUSE VENTILATION, Gaithersburg, Md., July 13, 1978. Proceedings. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1979. p.15-24.
 48. WHITELEY, P. & GARDINER, D. Solar reflective paints. BRE Information, Garston, (26), 1981.
 49. WILKES, K.E. Modelling of residential attics. In: ASHRAE/DOE-ORNL CONFERENCE ON THERMAL PERFORMANCE OF THE EXTERIOR ENVELOPES OF BUILDINGS, Kissimmee, Fla., Dec. 3-5, 1979. Proceedings. New York, ASHRAE, 1981. p.436-55.