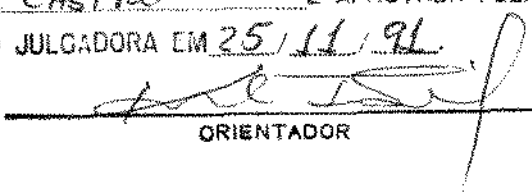


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA (DE-ENGENHARIA) MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TÉRMICA E FLUIDOS

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR José NÉDILIO CARRI-  
NIHO DE CASTRO E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 25/11/91

  
ORIENTADOR

PAREDES TÉRMICAS

36/91

TRABALHO APRESENTADO À COMISSÃO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA  
MECÂNICA, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA  
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM  
ENGENHARIA MECÂNICA.

CAMPINAS, 1991.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

TESE DE: Doutorado

TÍTULO DA TESE: "Paredes Térmicas"

AUTOR: José Nedilo Carrinho de Castro

ORIENTADOR: Kamal A.R. Ismail

Aprovado Por



Prof. Dr. Kamal A.R. Ismail (FEM-UNICAMP)

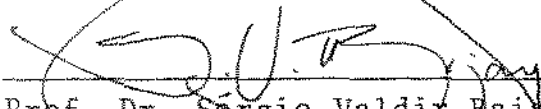
Presidente



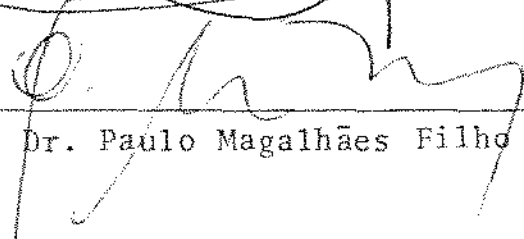
Prof. Dr. Pio Caetano Lobo (UFPB-João Pessoa)



Prof. Dr. Leonardo Goldstein Junior (FEM-UNICAMP)



Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay (FEM UNICAMP)



Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho (UNESP-Guaratinguetá)

Campinas, 25 de Novembro de 1991.

JOSÉ NÉDILIO CARRINHO DE CASTRO <sup>1</sup>/<sub>II</sub>

ENG. MECANICO, PELA UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO", UNESP, CAMPUS DE GUARATINGUETA, 1978, E MESTRE EM CIENCIAS EM ENGENHARIA MECANICA, PELA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, 1982.

#### PAREDES TÉRMICAS

ORIENTADOR : PROF. DR. KAMAL A. R. ISMAIL <sup>1</sup>/<sub>II</sub>

TRABALHO APRESENTADO A COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECANICA.

CAMPINAS, 1991

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail, Orientador, Amigo e Incentivador, pela oportunidade que me ofereceu de poder trabalhar em sua equipe;

Aos Profs. da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas;

Aos técnicos do Laboratório de Armazenadores Térmicos e Tubos de Calor.

Aos amigos que incentivaram e auxiliaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

111

A minha Família

## SINOPSE

Neste trabalho desenvolve-se o conceito de isolação térmica, utilizando-se as técnicas de armazenamento térmico latente, aplicado na isolação da carga térmica de insolação de teto e paredes.

A modelagem matemática e a solução numérica são feitas para que se tenha a previsão do comportamento de teto e paredes compostos com material de mudança de fase, frente ao aquecimento pelo sol.

As equações descrevem a distribuição de temperatura ao longo da espessura, bem como a propagação da frente de fusão. As equações são unidimensionais e o método numérico utilizado é o método das diferenças finitas.

Comprovações experimentais são feitas utilizando-se protótipos convencionais e com a modificação proposta, construídos especialmente para isso.

Dois tipos de material de mudança de fase são utilizados. O primeiro com propriedades fornecidas pela literatura especializada, utilizado nas simulações numéricas. O segundo, desenvolvido, e suas propriedades levantadas no laboratório utilizado na comprovação experimental.

É feito um estudo comparativo, entre a resposta de uma edificação convencional e uma com as modificações propostas.

*ABSTRACT*

This work presents the latent heat storage thermal insulation concept applied to a thermal loading of residencial roofs and walls.

The mathematical model and its solution here presented aims to predict the behaviour of the system under solar heating.

The equations simulate the temperature distribution in the width of the material and the propagation of the melting front. The equations are of one dimension and are solved by the finite difference method.

Experimental results were obtained using ordinary and specially construct prototypes.

Two types of phase changing materials were used. The first with properties found in the literature, was used in the numeric simulation. The second was develloped by ourselves and its properties were measured in our laboratories.

Finally a comparison study is done between the ordinary building construction and the modified one sugested by us.

## CONTEÚDO

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introdução .....                                                                                      | 1   |
| 1.1. Considerações iniciais .....                                                                        | 2   |
| 1.2. Identificação do problema .....                                                                     | 8   |
| 2. MODELAGEM TEÓRICA .....                                                                               | 11  |
| 2.1. Descrição teórica do modelo .....                                                                   | 12  |
| 2.2. Adimensionalização das equações .....                                                               | 18  |
| 3. MODELO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL .....                                                                 | 24  |
| 3.1. Estabelecimento da malha computacional .....                                                        | 25  |
| 3.2. Obtenção das equações de diferenças finitas .....                                                   | 26  |
| 3.3. Verificação das condições de erros e estabilidade do<br>método explícito utilizado .....            | 36  |
| 3.3.1. Erros introduzidos .....                                                                          | 36  |
| 3.3.2. Estabilidade da solução .....                                                                     | 37  |
| 3.4. Resultados numéricos e comentários.....                                                             | 41  |
| 3.4.1. Paredes .....                                                                                     | 41  |
| 3.4.2. Cobertura .....                                                                                   | 59  |
| 4. MODELAGEM FÍSICA E O MÉTODO DE TESTES .....                                                           | 66  |
| 4.1. Seleção e fabricação do modelo .....                                                                | 67  |
| 4.2. Distribuição dos pontos de medidas de temperatura do<br>modelo .....                                | 78  |
| 4.3. Seleção e calibração dos medidores de temperatura,<br>de radiação solar e velocidade do vento ..... | 83  |
| 4.4. Procedimento de testes .....                                                                        | 84  |
| 4.4.1. Cella de teste .....                                                                              | 84  |
| 4.4.2. O Método dos testes .....                                                                         | 84  |
| 4.5. Resultado dos testes experimentais .....                                                            | 88  |
| 4.5.1. Resumos dos procedimentos e testes realizados                                                     | 88  |
| 4.5.2. Resultados experimentais .....                                                                    | 91  |
| 4.5.2(a) Paredes .....                                                                                   | 92  |
| 4.5.2(b) Cobertura .....                                                                                 | 116 |
| 4.6. Comparação dos resultados experimentais e teóricos..                                                | 129 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO DE AR CONDICIONADO PARA O CASO DE PAREDES E TETO CONVENCIONAIS E PAREDES E TETOS TÉRMICOS .....                         | 140 |
| 5.1. Levantamento da carga térmica de verão do caso convencional e do caso térmico .....                                                             | 141 |
| 5.1.1. Roteiro de cálculo para o levantamento da carga térmica para o caso de paredes e tetos convencionais.....                                     | 143 |
| 5.1.2. Roteiro de cálculo para o levantamento da carga térmica para o caso de paredes e teto térmico .....                                           | 147 |
| 5.2. Cálculo da capacidade de refrigeração e da potência do sistema de ar condicionado.....                                                          | 150 |
| 5.3. Especificação dos aparelhos de ar condicionado existentes no mercado para a climatização do ambiente estudado.....                              | 152 |
| 5.4. Comparação entre os resultados do condicionamento das salas com paredes e teto térmico.....                                                     | 155 |
| 6. CONCLUSÃO .....                                                                                                                                   | 158 |
| 7. ANEXOS .....                                                                                                                                      | 161 |
| A1 Modelagem da radiação incidente .....                                                                                                             | 161 |
| A2 Temperatura na face externa da parede aquecida pelo sol.....                                                                                      | 170 |
| A3 Simulação da temperatura do ar atmosférico externo ....                                                                                           | 172 |
| A4 Desenvolvimento do equacionamento numérico da condição de contorno na parede externa (Material de mudança de fase sólido) .....                   | 174 |
| A5 Desenvolvimento do equacionamento numérico da condição de contorno na formação da primeira lâmina de líquido do material de mudança de fase ..... | 176 |
| A6 Desenvolvimento do equacionamento numérico da malha móvel .....                                                                                   | 178 |
| A7 Desenvolvimento do equacionamento numérico da condição                                                                                            |     |

|     |                                                                                                  |            |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|     | de contorno na última camada sólida de material de mudança de fase .....                         | 184        |
| A8  | Pré-avaliação dos efeitos causados pela colocação do material de mudança de fase na parede ..... | 186        |
| A9  | Escolha do material de mudança de fase e determinação de suas propriedades termofísicas .....    | 194        |
|     | a) Escolha do material de mudança de fase e sua temperatura de mudança de fase .....             | 194        |
|     | b) Calor latente e calor específico .....                                                        | 199        |
|     | c) Massa específica .....                                                                        | 200        |
|     | d) Condutividade térmica .....                                                                   | 201        |
| A10 | Resultados experimentais .....                                                                   | 203        |
|     | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                                                        | <b>274</b> |

## LISTA DE TABELAS

|       |                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.  | Carga térmica máxima através da parede convencional e parede térmica para a condição de simulação .....                                                                                                       | 48  |
| 3.2.  | Carga máxima através do teto convencional e teto térmico para as condições de simulação .....                                                                                                                 | 61  |
| 4.1.  | Experiências realizadas .....                                                                                                                                                                                 | 90  |
| 5.1.  | Carga térmica sensível total .....                                                                                                                                                                            | 146 |
| 5.2.  | Calor latente total .....                                                                                                                                                                                     | 146 |
| 5.3.  | Valores da espessura da camada de material de mudança de fase, na fase líquida às 18:00 horas .....                                                                                                           | 148 |
| 5.4.  | Carga térmica sensível total .....                                                                                                                                                                            | 149 |
| 5.5.  | Carga térmica latente total .....                                                                                                                                                                             | 149 |
| 5.6.  | Massa de ar, capacidade de refrigeração e potência dos aparelhos de ar condicionado para as paredes e teto convencionais .....                                                                                | 151 |
| 5.7.  | Massa de ar, capacidade de refrigeração e potência dos aparelhos de ar condicionado para as paredes e teto térmicos .....                                                                                     | 152 |
| 5.8.  | Especificação de aparelho de ar condicionado para as salas com paredes e teto convencionais .....                                                                                                             | 154 |
| 5.9.  | Especificação de aparelho de ar condicionado para as salas com paredes e teto térmicos .....                                                                                                                  | 154 |
| 5.10. | Tabela comparativa da carga térmica, capacidade de refrigeração necessária e potência elétrica total consumida pelo sistema de ar condicionado (paredes e teto convencionais e paredes e teto térmicos) ..... | 156 |
| 5.11. | Tabela comparativa entre capacidade de refrigeração necessária de refrigeração instalada, e a potência total elétrica consumida. (paredes e teto convencionais e paredes e teto térmicos) .....               | 157 |
| A1.1  | Visibilidade média para a cidade de Campinas .....                                                                                                                                                            | 163 |
| A1.2. | Radiação média total na horizontal, número de dias                                                                                                                                                            |     |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| claros, encobertos, esperado no mês .....                    | 165 |
| A3.1. Dados metereológicos para a cidade de Campinas .....   | 172 |
| A3.2. Fator para o cálculo da temperatura média diária ..... | 173 |

### LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Seção transversal da parede térmica .....                                                                                                                                                           | 12 |
| 2.2. Seção contendo o material de mudança de fase .....                                                                                                                                                  | 13 |
| 3.1. Configuração da malha móvel com a frente de mudança de fase .....                                                                                                                                   | 25 |
| 3.2. Configuração da malha total .....                                                                                                                                                                   | 26 |
| 3.3. Fluxograma global de solução .....                                                                                                                                                                  | 42 |
| 3.4(a) Fluxograma para o cálculo da radiação, da temperatura do ambiente externo, e da temperatura da face externa, (b) Fluxograma para o cálculo do perfil de temperatura em cada parte da parede ..... | 45 |
| 3.5. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de um tijolo nas várias horas do dia .                                                                                         | 49 |
| 3.6. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de $1/2 + 1/4$ de tijolo nas várias horas do dia .....                                                                         | 50 |
| 3.7. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de $1/2$ tijolo nas várias horas do dia.                                                                                       | 51 |
| 3.8. Variação da temperatura na superfície externa e interna para a parede convencional de 1 tijolo, $1/2 + 1/4$ tijolo, $1/2$ tijolo, radiação solar, variação da temperatura do ambiente externo ..... | 52 |
| 3.9. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de $1/2$ tijolo + 4,0 cm MMF + $1/2$ tijolo, nas várias horas do dia .....                                                          | 53 |
| 3.10. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de $1/2$ tijolo + 2,0 cm MMF + $1/2$ tijolo,                                                                                       |    |

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| nas várias horas do dia .....                                                                                                                                                          | 54 |
| 3.11. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 4,0 cm MMF + 1/2 tijolo, nas várias horas do dia .....                                           | 55 |
| 3.12. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 2,0 cm MMF + 1/4 de tijolo, nas várias horas do dia .....                                        | 56 |
| 3.13. Variação da temperatura na superfície externa e interna para a parede térmica, variação do avanço da frente de fusão, radiação solar .....                                       | 57 |
| 3.14. Variação da temperatura na superfície externa e interna das paredes convencionais e térmicas .....                                                                               | 58 |
| 3.15. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas horas do dia .....                                                                                  | 62 |
| 3.16. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas horas do dia (2 cm de material de mudança de fase) .....                                                 | 63 |
| 3.17. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (4 cm de material de mudança de fase) .....                                          | 64 |
| 3.18. Variação da temperatura ao longo da superfície externa e interna para a cobertura convencional, e cobertura térmica, variação do avanço da frente de fusão, radiação solar ..... | 65 |
| 4.1. Corte norte-sul do protótipo de teste .....                                                                                                                                       | 67 |
| 4.2. Desenho em escala 1:25 da parede face norte .....                                                                                                                                 | 69 |
| 4.3. Fotografias dos detalhes da estrutura básica da cela de testes .....                                                                                                              | 70 |
| 4.4. Fotografias dos detalhes construtivo da parede inteira .....                                                                                                                      | 71 |
| 4.5. Fotografias dos detalhes da parede modular (desmontável) e teste com a parede .....                                                                                               | 72 |
| 4.6. Desenho da cobertura (Telha de amianto, laje do tipo                                                                                                                              |    |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Prel)                                                                                                       | 73  |
| 4.7. Fotografias dos detalhes do teste da cobertura                                                         | 74  |
| 4.8. Fotografias dos detalhes construtivo da cobertura                                                      | 75  |
| 4.9. Conjunto de formas de madeira                                                                          | 76  |
| 4.10. Fotografias dos detalhes da construção das placas de material de mudança de fase                      | 77  |
| 4.11. Placas de material de mudança de fase                                                                 | 78  |
| 4.12. Detalhe do corte transversal da parede térmica com a distribuição dos pontos de tomada de temperatura | 79  |
| 4.13. Corte transversal da cobertura com material de mudança de fase                                        | 81  |
| 4.14. Detalhe esquemático dos pontos de tomada de temperatura na laje de cobertura                          | 82  |
| 4.15. Fotografias dos detalhes da leitura de radiação solar.                                                | 85  |
| 4.16. Fotografias dos detalhes da tomada de temperatura                                                     | 86  |
| 4.17. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (Experiência 6) | 92  |
| 4.18. Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (Experiência 6)        | 93  |
| 4.19. Saída do radiômetro para a Experiência 6 (Radiação perpendicular a parede)                            | 94  |
| 4.20. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (Experiência 12)     | 95  |
| 4.21. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (Experiência 12)            | 96  |
| 4.22. Saída do radiômetro para a Experiência 12 (Radiação no plano horizontal)                              | 97  |
| 4.23. Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (Experiência 7)        | 98  |
| 4.24. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica nas horas do dia (Experiência 14)           | 99  |
| 4.25. Saída do radiômetro para a Experiência 6 (Radiação perpendicular a parede)                            | 100 |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.26. Saída do radiômetro para a Experiência 14 (Radiação perpendicular a parede) .....                                                                 | 101 |
| 4.27. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (Experiência 7) .                                           | 102 |
| 4.28. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (Experiência 14) .....                                           | 104 |
| 4.29. Variação da temperatura do ar ambiente externo e interno para a parede convencional e parede térmica (Experiência 7 e 14) .....                   | 106 |
| 4.30. Variação da temperatura da superfície interna e externa da parede convencional da parede térmica (Experiência 7 e 14) .....                       | 107 |
| 4.31. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (Experiência 15) .....                                           | 108 |
| 4.32. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (Experiência 15) .....                                                  | 110 |
| 4.33. Saída do radiômetro para a Experiência 15 (Radiação perpendicular a parede) .....                                                                 | 111 |
| 4.34. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica com 40 mm de material de mudança de fase, nas horas do dia (Experiência 18) ..... | 112 |
| 4.35. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (Experiência 18) .....                                                  | 114 |
| 4.36. Saída do radiômetro para a Experiência 18 (Radiação perpendicular a parede) .....                                                                 | 115 |
| 4.37. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas horas do dia (Experiência 6)                                         | 116 |
| 4.38. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (Experiência 6) .....                                           | 117 |
| 4.39. Saída do radiômetro para a Experiência 6 (Radiação na horizontal) .....                                                                           | 118 |
| 4.40. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (Experiência 9) .....                                         | 119 |

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.41. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (Experiência 9) .....                                                         | 120 |
| 4.42. Saída do radiômetro para a Experiência 9 (Radiação na horizontal) .....                                                                                    | 121 |
| 4.43. Variação da temperatura na face externa da telha e na face interna da laje para a cobertura convencional e a cobertura térmica (Experiência 6 e 9) .....   | 122 |
| 4.44. Variação da temperatura do ar ambiente externo e interno para a cobertura convencional térmica (Experiência 6 e 9) .....                                   | 123 |
| 4.45. Variação da temperatura da superfície interna da laje e do ar ambiente interno para a cobertura convencional e cobertura térmica (Experiência 6 e 9) ..... | 124 |
| 4.46. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (Experiência 15) ..                                                    | 125 |
| 4.47. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (Experiência 15) .....                                                        | 127 |
| 4.48. Saída parcial do radiômetro para a Experiência 15 (Radiação na horizontal) .....                                                                           | 128 |
| 4.49. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional (Experiência 7) .....                              | 132 |
| 4.50. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (Experiência 7) .....                    | 133 |
| 4.51. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica (Experiência 14) .....                                  | 134 |
| 4.52. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (Experiência 14) .....                        | 135 |
| 4.53. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional                                                    |     |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (Experiência 6) .....                                                                                                                                        | 136 |
| 4.54. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura para a cobertura convencional (Experiência 6) .                                             | 137 |
| 4.55. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica ....                                             | 138 |
| 4.56. Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura para a cobertura térmica ao longo do dia .....                                              | 139 |
| 5.1. Planta baixa para o levantamento da carga térmica ....                                                                                                  | 142 |
| A1.1. Tempo de duração do dia .....                                                                                                                          | 166 |
| A1.2. Insolação extraterrestre diária na horizontal .....                                                                                                    | 167 |
| A1.3. Radiação difusa total diária .....                                                                                                                     | 167 |
| A1.4. Radiação difusa horária .....                                                                                                                          | 168 |
| A1.5. Ângulo de incidência em uma superfície qualquer .....                                                                                                  | 169 |
| A8.1. Corte transversal da caixa de pré-avaliação dos efeitos causados pela colocação do material de mudança de fase entre paredes convencionais .....       | 186 |
| A8.2. Desenho esquemático do sistema de pré-avaliação do comportamento da parede térmica.....                                                                | 187 |
| A8.3. Exemplo de um arranjo possível de paredes (a) convencionais , (b) térmica.....                                                                         | 188 |
| A8.4. Disposição dos termopares.....                                                                                                                         | 189 |
| A8.5. Variação de temperatura com a espessura em uma parede convencional de tijolos (3/4 de tijolo de espessuras).                                           | 190 |
| A8.6. Variação da temperatura com a espessura de uma parede térmica de tijolos (espessura de 3/4 de tijolos mais 20 mm de material de mudança de fase) ..... | 191 |
| A8.7. Variação da temperatura com a espessura em uma parede convencional de tijolos (um tijolo de espessura).....                                            | 192 |
| A8.8. Variação da temperatura com a espessura em uma parede térmica de tijolos (espessura de um tijolo mais 20mm de material de mudança de fase).....        | 193 |
| A9.1. Calor de fusão por unidade de massa (a) e por unidade de volume (b) em função da temperatura de mudança de                                             |     |

|         |                                                                                                            |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|         | fase na faixa de 0 °C a 60 °C.....                                                                         | 195 |
| A9.2.   | Temperatura de fusão da mistura de ATPEG 1000 em ATPEG 600 pelo método de inspeção microscópica.....       | 197 |
| A9.3.   | Temperatura de fusão das misturas ATPEG 1000 em ATPEG 600 pelo método do banho maria.....                  | 198 |
| A9.4.   | Diagrama de fusão do índio metálico.....                                                                   | 199 |
| A9.5.   | Diagrama de fusão da mistura 4:1 de ATPEG 600 em ATPEG 1000.....                                           | 200 |
| A9.6.   | Massa específica da fase líquida da mistura 4:1 de ATPEG 600 em ATPEG 1000.....                            | 201 |
| A10.1.  | Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 1)      | 203 |
| A10.2.  | Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 1).....        | 204 |
| A10.3.  | Saída do radiômetro para a experiência 1 (radiação perpendicular a parede).....                            | 205 |
| A10.4.  | Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 2)      | 206 |
| A10.5.  | Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 2).....        | 207 |
| A10.6.  | Saída do radiômetro para a experiência 2 (radiação perpendicular a parede).....                            | 208 |
| A10.7.  | Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 3)      | 209 |
| A10.8.  | Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 3).....        | 210 |
| A10.9.  | Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 4)      | 211 |
| A10.10. | Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 4).....        | 212 |
| A10.11. | Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 5)..... | 213 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A10.12. Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 5) .....     | 214 |
| A10.13. Saída do radiômetro para a experiência 5 (radiação perpendicular a parede).....                          | 215 |
| A10.14.(a) Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 8)..... | 216 |
| A10.14.(b) Continuação da figura A10.14(a).....                                                                  | 217 |
| A10.15. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 8).....           | 218 |
| A10.16. Saída do radiômetro para a experiência 8 (radiação perpendicular a parede).....                          | 219 |
| A10.17. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 9).....    | 220 |
| A10.18. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 9) .....          | 221 |
| A10.19. Saída do radiômetro para a experiência 9 (radiação perpendicular a parede).....                          | 222 |
| A10.20. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 9).....    | 223 |
| A10.21. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 10).....          | 224 |
| A10.22. Saída do radiômetro para a experiência 10 (radiação perpendicular a parede).....                         | 225 |
| A10.23. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 11)....    | 226 |
| A10.24. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 11).....          | 227 |
| A10.25. Saída do radiômetro para a experiência 11 (radiação perpendicular a parede).....                         | 228 |
| A10.26. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 13)....    | 229 |
| A10.27. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 13).....          | 230 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A10.28. Saída do radiômetro para a experiência 13 (radiação na horizontal).....                                       | 231 |
| A10.29.(a) Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 16).....     | 232 |
| A10.29.(b) Continuação da figura A10.29(a).....                                                                       | 233 |
| A10.30. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 16).....               | 234 |
| A10.31. Saída do radiômetro para a experiência 16 (radiação na horizontal).....                                       | 235 |
| A10.32. Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 17)....         | 236 |
| A10.33. Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 17).....               | 237 |
| A10.34. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional nas horas do dia (experiência 1)..... | 238 |
| A10.35. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 1).....        | 239 |
| A10.36. Saída do radiômetro para a experiência 1 (radiação na horizontal).....                                        | 240 |
| A10.37. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional nas horas do dia (experiência 2)..... | 241 |
| A10.38. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 2).....        | 242 |
| A10.39. Saída do radiômetro para a experiência 2 (radiação na horizontal).....                                        | 243 |
| A10.40. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional nas horas do dia (experiência 3)..... | 244 |
| A10.41. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 3).....        | 245 |
| A10.42. Saída do radiômetro para a experiência 3 (radiação                                                            |     |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| na horizontal).....                                                                                                   | 246 |
| A10.43. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional nas horas do dia (experiência 4)..... | 247 |
| A10.44. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 4).....        | 248 |
| A10.45. Saída do radiômetro para a experiência 4 (radiação na horizontal).....                                        | 249 |
| A10.46. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional nas horas do dia (experiência 5)..... | 250 |
| A10.47. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 5).....        | 251 |
| A10.48. Saída do radiômetro para a experiência 5 (radiação na horizontal).....                                        | 252 |
| A10.49. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 8)..         | 253 |
| A10.50. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 8).....             | 254 |
| A10.51. Saída do radiômetro para a experiência 8 (radiação na horizontal).....                                        | 255 |
| A10.52. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 10).         | 256 |
| A10.53. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 10).....            | 257 |
| A10.54. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 11).         | 258 |
| A10.55. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 11).....            | 259 |
| A10.56. Saída do radiômetro para a experiência 11 (radiação na horizontal).....                                       | 260 |
| A10.57. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 12).         | 261 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A10.58. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 12).....           | 262 |
| A10.59. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 13).        | 263 |
| A10.60. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 13).....           | 264 |
| A10.61. Saída do radiômetro para a experiência 13 (radiação na horizontal).....                                      | 265 |
| A10.62. Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 14).        | 266 |
| A10.63. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 14).....           | 267 |
| A10.64. Saída do radiômetro para a experiência 14 (radiação na horizontal).....                                      | 268 |
| A10.65.(a) Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas horas do dia (experiência 16)..... | 269 |
| A10.65.(b) Continuação da figura A10.68(a).....                                                                      | 270 |
| A10.65.(c) Continuação da figura A10.68(a) e 10.68(b).....                                                           | 271 |
| A10.66. Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia (experiência 16).....           | 272 |
| A10.67. Saída do radiômetro para a experiência 16 (radiação na horizontal).....                                      | 273 |

## SIMBOLOGIA

|       |                                                                       |                   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| a -   | Espessura da parede externa .....                                     | L                 |
| a -   | Índice que indica parede externa.....                                 | -                 |
| a -   | Constante auxiliar.....                                               | -                 |
| A -   | Parâmetro adimensional (Eq. 2.22).....                                | 1                 |
| A -   | Altitude.....                                                         | L                 |
| b -   | Espessura da placa de material de mudança de fase.....                | L                 |
| b -   | Índice que indica a camada de material de mudança de fase.....        | L                 |
| B -   | Parâmetro adimensional (Eq. 2.22).....                                | 1                 |
| Bi -  | Número de Biot.....                                                   | 1                 |
| c -   | Espessura da parede interna.....                                      | L                 |
| c -   | Índice que indica a parede interna .....                              | -                 |
| C -   | Parâmetro adimensional (Eq. 2.22) .....                               | 1                 |
| D -   | Índice que indica direto.....                                         | -                 |
| e -   | Espessura total da parede.....                                        | L                 |
| EXT - | Índice que indica o ar do ambiente externo....                        | -                 |
| f -   | Função genérica.....                                                  | -                 |
| h -   | Coefficiente de película entre o ar e a parede .....                  | $Mt^{-3}$         |
| H -   | Índice que indica horizontal.....                                     | -                 |
| i -   | Índice auxiliar (Eq. 2.1 e 2.2).....                                  | -                 |
| i -   | i-ésimo intervalo de espaço.....                                      | -                 |
| INT - | Índice que indica o ar do ambiente interno....                        | -                 |
| I -   | Radiação .....                                                        | $Mt^{-3}$         |
| j -   | Índice auxiliar (Eq. 2.9).....                                        | -                 |
| j -   | j-ésimo intervalo de tempo.....                                       | -                 |
| K -   | Condutibilidade térmica.....                                          | $MLt^{-3} T^{-1}$ |
| K -   | Índice auxiliar (Eq. 3.1 e 3.9).....                                  | -                 |
| L -   | Índice que indica a fase líquida do material de mudança de fase ..... | -                 |

|             |                                                                        |           |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| m -         | Índice que indica mudança de fase.....                                 | -         |
| n -         | Número de variáveis independentes.....                                 | -         |
| MMF -       | Material de mudança de fase .....                                      | -         |
| N -         | Número de pontos.....                                                  | -         |
| N -         | Número do dia do ano.....                                              | -         |
| $Q_s(t)$ -  | Taxa de calor de insolação.....                                        | $MT^{-3}$ |
| S -         | Índice que indica a fase sólida do material de<br>mudança de fase..... | -         |
| S -         | Índice que indica o sol.....                                           | -         |
| STE -       | Número de Stefan.....                                                  | -         |
| $S(t)$ -    | Função posição da interface sólido-líquido ...                         | L         |
| $S(\tau)$ - | Parâmetro adimensional (Eq. 2.24).....                                 | 1         |
| t -         | Tempo genérico.....                                                    | t         |
| T -         | Índice que indica total.....                                           | -         |
| T -         | Temperatura genérica .....                                             | T         |
| T -         | Transmitância .....                                                    | 1         |
| TMF -       | Temperatura de mudança de fase .....                                   | T         |
| TR -        | Temperatura de referência (Eq. 2.20) .....                             | T         |
| x -         | Comprimento genérico .....                                             | L         |
| x -         | Sentido transversal.....                                               | -         |
| X -         | Parâmetro adimensional (Eq. 2.21).....                                 | 1         |

## SÍMBOLOS GREGOS

|                 |                                                          |              |
|-----------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| $\alpha$ -      | Difusividade térmica.....                                | $L^2 t^{-1}$ |
| $\alpha_s$ -    | Absorvidade .....                                        | 1            |
| $\beta$ -       | "altitude solar".....                                    | -            |
| $\delta$ -      | Declinação .....                                         | -            |
| $\Delta x$ -    | Incremento de espessura adimensional .....               | 1            |
| $\Delta \tau$ - | Incremento de tempo adimensional.....                    | 1            |
| $\Delta R$ -    | Balanco da radiação em comprimento de onda<br>longa..... | $MT^{-3}$    |

|              |                                                          |           |
|--------------|----------------------------------------------------------|-----------|
| $\epsilon$ - | Emissidade .....                                         | 1         |
| $\theta$ -   | Parâmetro adimensional de temperatura<br>(Eq. 2.20)..... | 1         |
| $\lambda$ -  | Calor latente de mudança de fase .....                   | -         |
| $\lambda$ -  | Índice para indicar comprimento longo de onda .....      | -         |
| $\rho$ -     | Massa específica .....                                   | $ML^{-3}$ |
| $\tau$ -     | Parâmetro adimensional do tempo (Eq. 2.23)....           | 1         |
| $\phi$ -     | Latitude.....                                            | -         |
| $\nabla$ -   | Operador .....                                           | -         |

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a crise energética na década de 70, devido a brutal elevação do preço do petróleo, surgiu uma nova maneira de encarar o problema energético que perdura até hoje, mesmo com o preço do petróleo sofrendo um declínio. Esta nova maneira de tratar o problema energético levou os países a reprogramarem seus consumos, eliminando gastos inúteis através de programas de racionalização do seu uso, ou a utilização de fontes alternativas. Para evitar que o futuro seja instável, oscilando entre fases de abundância e escassez, soluções simplistas estão sendo abandonadas e o caminho preferencial está na direção de projetos economizadores de energia, como o caso de um isolamento térmico mais eficiente para ambientes. É neste contexto que o presente trabalho está inserido e nele se utiliza o armazenamento de calor para a obtenção de um "isolamento térmico" de elevada eficiência.

No Brasil, o balanço de energia útil do ano de 1983 [14] identifica a parcela de energia útil e as perdas contidas nos diversos setores de serviços da sociedade. O estudo revela que para a geração de  $39 \times 10^6$  TEP de energia útil é necessária uma conversão de  $119 \times 10^6$  TEP de energia bruta, ou seja 56% da oferta interna de energia bruta se perdem, na transformação, na distribuição, na armazenagem ou no uso final. Este estudo tem sido um dos principais instrumentos incentivadores da implantação de programas e projetos de substituição e conservação de energia, pois identifica os setores de atividades energeticamente menos eficientes bem como as formas de energia utilizadas com eficiência. Aliado a este fato tem-se em particular o problema da demanda da energia elétrica, objeto de estudos e constante preocupação nos planejamentos energético brasileiro, onde se preconiza uma crise eminente sempre em evidência a cada verão, quando se utiliza de forma mais intensa os equipamentos de

condicionamento de ar, e os sistemas de refrigeração em geral. Esta preocupação vem estimulando a procura de novas soluções que ajudem na solução deste problema, visto que é inevitável, junto aos mais variados segmentos e atividades da sociedade moderna, o controle térmico dos ambientes.

Esta exigência de controle térmico está também diretamente ligada aos quesitos básicos necessários para o bom funcionamento dos equipamentos computadorizados onde o controle da temperatura, umidade e poeira no ar é cada vez mais rigoroso.

Mesmo o conforto térmico em residências, locais de trabalho ou lazer tornou-se um ponto de grande importância para a atual sociedade, que passou a utilizar de forma mais intensa os equipamentos destinados à este fim.

Como se sabe, todos estes sistemas de condicionamento de ar, estão baseados na utilização intensiva de energia, e esta última além de cara, vem a cada década caminhando para o esgotamento de suas fontes convencionais. Assim sendo, qualquer esforço no sentido de buscar a racionalização do seu uso, bem como a utilização de fontes não convencionais é de grande valia.

Como já é sabido, a racionalização é a utilização de sistemas que dêem um mesmo resultado final, porém dispondo de um menor consumo de energia, sendo hoje em dia o grande poupador energético.

É com este enfoque que se estuda o comportamento térmico de teto e parede térmica. Este teto e parede são construídos de forma a instalar no interior de uma parede convencional uma camada de material de mudança de fase. Este simples procedimento proporciona um isolamento térmico muito eficiente, pois tomando-se a temperatura de mudança de fase, do

material de armazenamento, próximo ou igual a temperatura de conforto garante-se este isolamento e propicia-se a possibilidade de um manejo mais adequado do calor proveniente da insolação, garantindo-se com isto uma redução da carga térmica total.

A idéia de utilizar-se a entalpia latente de um material para que ele armazene calor e funcione como um "isolante térmico" é inédita. O convencional são aplicações em paredes que funcionam como armazenadores de calor, que são aquecidos durante o dia, e aquecem os ambientes durante a noite ou seja funciona como a parede de Trombe.

É nesse contexto que Solomon [11] discute os passos para a determinação do desempenho de uma parede com material de mudança de fase, dando aspectos qualitativos para a escolha do material de mudança de fase.

A revista Chemical Week [41] apresenta uma reportagem intitulada "Chemical Mixture Creates (Midnight Sun)", onde apresenta alguns materiais de mudança de fase aplicados, armazenando durante o dia e aquecendo o ambiente durante a noite.

Guceri [34] apresenta painéis de paredes térmicas armazenadoras, utilizando material de mudança de fase confinado em fileiras de tubos dispostos dentro de caixa com vidro frontal e isolante traseiro, com abertura convenientes para o controle da circulação de ar.

Srivastava [12] apresenta paredes solares funcionando como coletor e armazenador. Estas paredes são formadas por vidro, concreto, rede de tubos, e concreto ou isolante. Pela circulação de um fluido pela rede de tubo mantém-se a face interna da parede a uma temperatura constante.

Bernard [29] apresenta o estudo de paredes de material de mudança de fase funcionando como paredes coletoras e armazenadoras ("Trombe Wall"). Estas paredes são construídas de vidros duplos, espaço para ar de circulação e uma parede interna de parafina acondicionada dentro de caixas de vidro. Aberturas convenientes permitem o controle da circulação de ar entre o vidro duplo e a parede de parafina, permitindo o aquecimento noturno do ambiente interno. O próprio Bernard [30] apresenta uma comparação experimental, entre paredes térmicas latentes e paredes térmicas sensíveis, simulando vários casos.

Buddhi [28] estuda coletores solares planos de materiais de mudança de fase, utilizando resolução numérica por expansão em série de Fourier, apresentando uma comparação experimental.

Paris e outros [42] apresenta um apanhado dos métodos de incorporação de material de mudança de fase, nas placas de acabamento de paredes. Este material assim disposto proporciona uma atenuação na carga térmica de pico pois o material de mudança de fase funciona como um armazenador de "frio" que é descarregado nas horas de pico e recarregado nas horas de folga.

Zerrouki [43] apresenta um modelo matemático com resolução por micro-computador para calcular as características termofísicas e predizer a temperatura interna de paredes com ou sem alma de material isolante.

A simples colocação de um material isolante convencional ajuda a reduzir as necessidades do resfriamento mas não é de eficiência elevada. Por esta razão pensou-se neste método de calor latente, que não é o mais caro, porém mais eficiente e flexível no trato com o calor.

Esta parede tem como objetivo suavizar tanto quanto possível o impacto da variação da carga térmica externa, imposta ao ambiente condicionado, ou seja mesmo que se tenham grandes variações de incidência de calor nas paredes e tetos, com consequente variação da temperatura da face externa destas paredes e tetos, nenhuma variação de temperatura será sentida na face interna de onde se conclui que nenhum ou quase nenhum calor será transmitido para o ambiente interno.

Convém salientar que a colocação do material de mudança de fase nos tetos e paredes não altera em nada as propriedades estruturais dos elementos construtivos, já que não se altera em nada as propriedades físicas dos materiais convencionalmente utilizados na construção civil. O resultado final deste procedimento é um teto ou uma parede contendo no seu interior uma camada de material de mudança de fase, formando o que se pode chamar de "sanduíche" de paredes com material de mudança de fase, funcionando termicamente como uma barreira térmica à penetração de calor.

O armazenamento térmico por calor latente desta maneira utilizado torna-se um mecanismo muito conveniente para o fim almejado, visto que; armazena todo o calor que penetra por insolação, principalmente nas horas mais críticas, ou seja nas horas mais quentes do dia, retardando ou impedindo o seu fluxo para o interior dos ambientes. O calor assim armazenado é retardado ou impedido de fluir para o interior dos ambientes aguardando que o ambiente externo tenha condições de iniciar o resfriamento desta parede.

Com o procedimento acima adotado, alivia-se o sistema de ar condicionado ou até mesmo se pode eliminá-lo para o caso de pequenos ambientes com reduzido número de pessoas. Isto é possível graças à camada de material, que utiliza na mudança de fase, todo

o calor que nela chega. Se este material de mudança de fase for convenientemente dimensionado, ele irá mudar de fase, na temperatura de mudança de fase, até que existam condições para a retirada deste calor pelo próprio meio ambiente externo e/ou de forma e em hora mais conveniente pelo sistema de ar condicionado. Como podemos notar, o calor proveniente da insolação é armazenado parte em calor sensível e a maior parte em calor latente. Observamos ainda que o armazenamento latente é de fundamental importância para este processo, pois a medida que o calor atinge o material de mudança de fase ele funde este material, que se mantém na temperatura de mudança de fase, enquanto existir material para fundir. Este processo continua até que a noite as condições atmosféricas iniciem o resfriamento desta parede, colocando-a em condições para que durante o dia possa reiniciar o armazenamento do calor.

Convém salientar que em todo esse procedimento, o ambiente interno não deve receber carga térmica alguma ou se receber deverá ser amortecida, e em uma hora mais conveniente para o sistema de refrigeração, ou seja, fora da hora crítica, quando a carga térmica total já está bem reduzida, e a demanda de energia elétrica fora do patamar máximo.

O desempenho da parede térmica depende tanto das propriedades físicas quanto das térmicas da parede em si, como das propriedades térmicas do material de mudança de fase. Dentre estas propriedades a mais significativa e que identifica a parede térmica funcionando como uma barreira térmica é a temperatura de mudança de fase, [1], pois tomando esta temperatura no em torno da temperatura de conforto do ambiente em questão, garante-se que toda elevação externa de temperatura e consequente condução de calor para o interior da parede, irá encontrar este material que antes de se aquecer acima desta temperatura, irá mudar de fase (no caso da sólida para a líquida), mantendo sua parte sólida na

temperatura de mudança de fase, garantindo que nenhum fluxo de calor penetre para o ambiente interno enquanto existir material para mudar de fase. Como o calor envolvido na mudança de fase é bem maior quando comparado com o calor envolvido na variação de temperatura, o mesmo fica armazenado, aguardando o momento mais apropriado para a sua retirada.

## 1.2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Os ambientes condicionados têm assumido inegavelmente uma importância incontestável nos mais variados setores da sociedade moderna. É neste quadro que se insere o presente trabalho, voltado para a análise de uma forma mais eficiente de isolamento térmico, que utiliza o conceito de armazenamento térmico de calor por mudança de fase.

Na análise deste problema trabalha-se basicamente, com cinco campos acoplados a saber:

- i) Condução de calor na parede externa;
- ii) Condução de calor na parte líquida (já fundida) do material de mudança de fase;
- iii) Deslocamento da frente de fusão;
- iv) Condução de calor na parte sólida do material de mudança de fase;
- v) Condução na parede interna.

A insolação recebida pela parede é em regime não permanente. A temperatura da face externa da parede é obtida

através de um balanço de energia (conforme demonstrado no Anexo 1).

Desprezam-se os efeitos convectivos na fase líquida do material de mudança de fase, procedimento este, que viabiliza a adoção de uma modelagem para a transferência de calor em regime transiente com equacionamento unidimensional.

Este modelo conforme VISKANTA [2] apresenta uma boa concordância com o clássico modelo de Neumann, [3] quando a camada de líquido é solidificada horizontalmente pela face inferior ou o sólido é fundido horizontalmente a partir da face superior, caracterizando-se por um processo estável onde o modelo unidimensional de transferência de calor com mudança de fase, apresenta boa concordância com os dados experimentais [2].

Para o caso em questão, como a transferência de calor não se faz somente no meio que muda de fase, mas também depende da insolação nas paredes propriamente ditas, da condução nas fases do material de mudança de fase, e na localização da frente de mudança de fase, utiliza-se o modelo unidimensional para todos os casos.

Outros fatores que também influem na modelagem e que são utilizados na formação teórica:

- i) Desprezo dos efeitos de borda;
- ii) Distribuição uniforme de temperatura inicial em todos os campos em questão;
- iii) Propriedades físicas dos materiais construtivos são consideradas constantes em relação à temperatura em suas respectivas fases;

- iv) O coeficiente de transmissão de calor convectivo, das faces externa e interna, é considerado constante;
- v) Condutividade finita.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM TEÓRICA

## 2.1. DESCRIÇÃO TEÓRICA DO MODELO

Pelo fato do modelo trabalhar com um regime transiente ao longo da seção transversal da parede composta (Figura 2.1), onde a camada de material de mudança de fase possui uma frente de mudança de fase (Figura 2.2), envolvendo elementos com condutividade finita, onde mesmo havendo mudança de fase temos um gradiente de temperatura na fase líquida e outro na fase sólida, a predição da resposta do modelo da Figura 2.1, será obtida pelo uso do modelo de condutividade finita.

O objetivo básico do modelo é determinar o perfil de temperatura em todo o campo em questão. Para tanto divide-se o

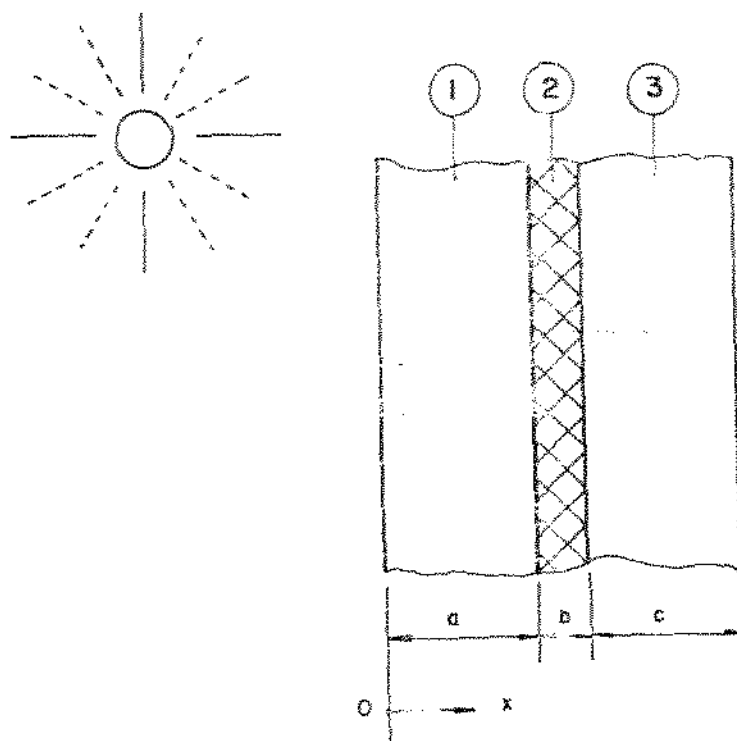


Figura 2.1 - Seção transversal da parede térmica: ① Parede externa, ② Material de mudança de fase, ③ Parede interna.

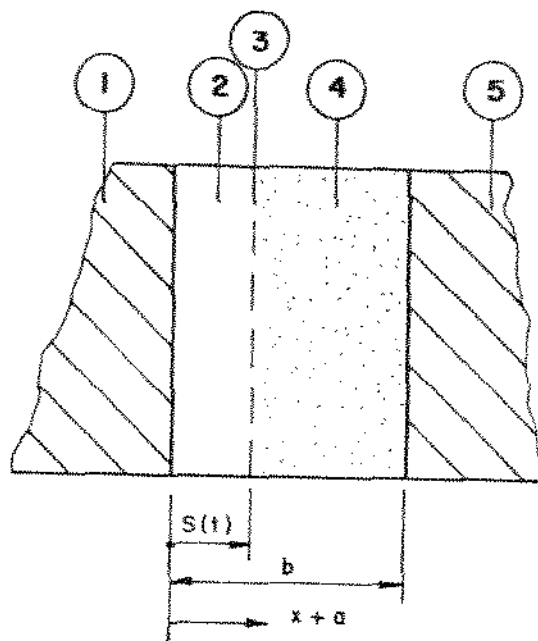


Figura 2.2 - Seção contendo o material de mudança de fase.

① Parede externa, ② Fase líquida, ③ Frente de mudança de fase, ④ Fase sólida, ⑤ Parede interna.

problema em três regiões principais: i) parede externa, ii) camada de material de mudança de fase, e iii) parede interna, conforme se vê na figura 2.1.

Relembrando as considerações colocadas no item 1.2, reafirma-se que o modelo é unidimensional em regime transiente, onde não se consideram os termos de dissipação viscosa e compressibilidade. As propriedades físicas dos materiais envolvidos são constantes, e não existe geração interna de calor. Com isto, a equação da energia em função da temperatura do material é a seguinte conforme [4].

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \nabla^2 T_i \quad (2.1)$$

onde;

i = a, b, c

a = parede externa

b = material de mudança de fase

c = parede interna

Para a descrição teórica do problema, considerando uma distribuição simétrica da temperatura ao longo da altura e do comprimento considerando que todo o material da parede possui propriedades físicas uniformes e independentes da temperatura nas suas respectivas fases, a equação geral da condução de calor, que estabelece a distribuição de temperatura e a transmissão de calor por condução, se reduz a equação de Fourier como descreve Carslaw [5] em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

onde:

i = a, b, c

a = parede externa

b = material de mudança de fase

c = parede interna

Logo, em cada uma das três regiões consideradas, tem-se o seguinte equacionamento; com suas respectivas condições de contorno.

1.<sup>a</sup> Região: Parede externa

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = \alpha_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} ; 0 \leq x < a \quad (2.3)$$

Condições de Contorno da 1.<sup>a</sup> região

a)  $x = 0$ , Face externa da parede externa, aquecida pelo sol.

Do balanço de energia e conforme anexo (2) tem-se que:

## PAREDES TÉRMICAS

36/91

$$-K_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{EXT} [T_s - T_a|_{x=0}] \quad (2.4)$$

onde:

$$T_s = \frac{\alpha_s Q_s(t) + h_{EXT} T_{EXT} - \varepsilon \Delta R}{h_{EXT}} \quad (2.5)$$

na qual:

$Q_s$  é o calor de insolação equacionado e formulado conforme demonstrado no anexo (1)

$T_{EXT}$  é a temperatura do ar atmosférico simulada conforme anexo (3)

b)  $x = a$ , Neste contorno têm-se três condições distintas:

b.1) Material de mudança de fase no estado sólido e sub-resfriado caracterizado pela temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase (TMF)

$$K_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_{x=a^-} = K_s \frac{\partial T_b}{\partial x} \Big|_{x=a^+} \quad (2.6)$$

Para  $T_a$  e  $T_b < TMF$

b.2) Material de mudança de fase junto à parede externa, na temperatura de mudança de fase, e com fluxo de calor possibilitando a formação da "primeira lâmina" do material de mudança de fase na fase líquida.

$$-K_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_{x=a^-} = \rho \lambda \frac{\partial S(t)}{\partial t} - K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=a^+} \quad (2.7)$$

Para  $T_a = T_s = TMF$

b.3) Material de mudança de fase junto à parede externa já na fase líquida

$$K_a \left. \frac{\partial T_a}{\partial x} \right|_{x=a-} = K_L \left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=a+} \quad (2.8)$$

Para  $T_a > T_{MF}$

2.ª Região: Material de mudança de fase

Devido a ocorrência da mudança de fase, esta região será subdividida em três outras subregiões: a) Material de mudança de fase na fase líquida; b) A frente de mudança de fase; c) Material de mudança de fase na fase sólida:

Logo, para as fases líquida e sólida:

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \alpha_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

onde:

$$\begin{aligned} j &= L \text{ (líquido)} & a < x < a + S(t) \\ j &= s \text{ (sólido)} & a + S(t) < x < a + b \end{aligned}$$

Na frente de fusão,  $x = a + S(t)$  (Figura 2.2), tem-se, segundo Ozisik [6], que:

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - K_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = \rho \lambda \frac{d S(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Para  $x = a + S(t)$

### Condições de Contorno da 2ª região

$$a) \ x = a, \quad K_a \left. \frac{\partial T_a}{\partial x} \right|_{x=a} = K_L \left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=a} \quad (2.11)$$

b)  $x = a + s(t)$ , (frente de mudança de fase)

$$K_S \frac{\partial T_S}{\partial x} - K_L \frac{\partial T_L}{\partial x} = \rho \lambda \frac{d S(t)}{dt} \quad (2.12)$$

$$T_L = T_S = T_{MF}$$

c)  $x = b + a$ , duas condições dependendo da localização da frente de mudança de fase

c.1) Enquanto existir fase sólida ( $0 < S(t) < b$ ) (Fig. 2.2)

$$K_S \left. \frac{\partial T_S}{\partial x} \right|_{x=(a+b)} = K_C \left. \frac{\partial T_C}{\partial x} \right|_{x=(a+b)} \quad (2.13)$$

c.2) Só fase líquida ( $S(t) = b$ ) (Fig. 2.2)

$$K_L \left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=(a+b)} = K_C \left. \frac{\partial T_C}{\partial x} \right|_{x=(a+b)} \quad (2.14)$$

### 3ª Região: Parede interna

$$\frac{\partial T_C}{\partial t} = \alpha_C \frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2}, \quad a + b \leq x \leq a + b + c \quad (2.15)$$

### Condições de Contorno da 3ª Região

a)  $x = a + b$  Três condições dependendo da localização da frente de mudança de fase

a.1) Fase sólida ainda presente

$$a < S(t) < b$$

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=(a+b)} = K_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=(a+b)} \quad (2.16)$$

a.2) Última camada de sólido

$$-K_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \Big|_{x=a+b} = \rho \lambda \frac{\partial S}{\partial t} - K_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=(a+b)} \quad (2.17)$$

a.3) Material de mudança de fase totalmente na fase líquida

$$K_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \Big|_{x=(a+b)} = K_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=(a+b)} \quad (2.18)$$

b)  $x = a + b + c$

$$-K_c \frac{\partial T_c}{\partial x} = h_{INT} (T_{c_{x=a+b+c}} - T_{INT}) \quad (2.19)$$

### 2.2. ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Adotando-se:

$$\theta_i = \frac{T_i - TMF}{T_R - TMF}$$

onde:  $i = a, s, L, c$  (2.20)

$T_R$  = Temperatura de referência igual a máxima temperatura solar

$$x = \frac{x}{e}$$

onde:  $e = a + b + c$  (2.21)

$$A = \frac{a}{e} ; B = \frac{b}{e} ; C = \frac{c}{e} \quad (2.22)$$

$$\tau = \frac{\alpha_L t}{e^2} \quad (2.23)$$

$$S(\tau) = \frac{S(t)}{e} \quad (2.24)$$

tem-se que para a:

1ª Região: Parede externa. Da eq(2.3)

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial \tau} = \left[ \frac{\alpha_a}{\alpha_L} \right] \frac{\partial^2 \theta_a}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq A \quad (2.25)$$

2ª Região: Material de mudança de fase. Da eq (2.9)

Para as fases sólida e líquida têm-se

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} = \left[ \frac{\alpha_j}{\alpha_L} \right] \frac{\partial^2 \theta_j}{\partial x_j^2} \quad (2.26)$$

onde:

$$\text{se } S(\tau) = 0 \rightarrow j = s$$

$$\text{se } S(\tau) > 0 \rightarrow j = L \text{ para } A < x < S(\tau) + A$$

$$j = s \text{ para } S(\tau) < x < A+B$$

Para a frente de fusão (eq. 2.10)

$$K_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} - K_L \frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \frac{\rho \lambda \alpha_L}{(T_R - T_m)} \frac{d S(2)}{d \tau} \quad \text{para } x = S(\tau) + A \quad (2.27)$$

como  $\alpha_L = \frac{K_L}{\rho c_p}$  (2.28)

$$\text{STEFAN} = \frac{C_p (T_R - T_m)}{\lambda} \quad (2.29)$$

Tem-se que:

$$\left[ \frac{K_s}{K_L} \right] \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} - \frac{\partial \theta_L}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{stefan}} \frac{d S(r)}{dr} \quad (2.30)$$

3ª Região: Parede interna. Da eq(2.18)

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{\alpha_c}{\alpha_L} \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} \quad A + B < x < A + B + C \quad (2.31)$$

Condições de Contorno

1ª Região: Parede externa

Da Eq (4) para  $x = 0$  tem-se

$$-K_a \frac{(T_R - T_{MF})}{e} \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = h_{EXT} (T_R - T_{MF}) (\theta_s - \theta_a) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{h_{EXT} e}{K_a} (\theta_a - \theta_s) \quad (2.33)$$

$$\text{Como } (Bi)_{EXT} = \frac{h_{EXT} e}{K_a} \quad (2.34)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right|_{x=0} = Bi (\theta_a - \theta_s) ; \quad x = 0 \quad (2.35)$$

Para  $x = A$  (três condições distintas)

i) Temperatura do material de mudança de fase abaixo da temperatura de mudança de fase. Da Eq(8) tem-se

$$\left( \frac{K_a}{K_s} \right) \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \quad x = A \quad (2.36)$$

ii) Início da mudança de fase Eq (2.7)

$$-K_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{\rho_L \lambda \alpha_L}{(T_R - T_m)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} - K_s \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \quad \text{Para } x = A \quad (2.37)$$

$$\text{Como } \alpha_L = \frac{K_L}{\rho_L C_{pL}} \quad \text{e} \quad \text{Stefan} = \frac{C_p (T_R - T_m)}{\lambda}$$

tem-se que:

$$- \left( \frac{K_a}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{1}{\text{stefan}} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} - \left( \frac{K_s}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \quad (2.38)$$

iii) Material de mudança de fase já na fase líquida junto a face interna da parede externa ( $S(\tau) > 0$ )

$$\left( \frac{K_a}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \quad x = A \quad (2.39)$$

## 2.ª Região: Material de mudança de fase

i) Da Eq(11)

$$\left( \frac{K_a}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_a}{\partial x} = \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \quad x = A \quad (2.40)$$

ii) Das eq(2.12) e Eq(2.13) para  $x = A + S(\tau)$

$$\left( \frac{K_s}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_s}{\partial x} - \frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \frac{1}{\text{stefan}} \frac{d S(\tau)}{d \tau} \quad (2.41)$$

$$\theta_L = \theta_s = \theta_m$$

iii) Da eq(2.14)  $x = A + B$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial x} = \left( \frac{K_c}{K_s} \right) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \quad \text{para } 0 < S(\tau) < B \quad (2.42)$$

iv) Da eq(15)  $x = A + B$

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \left( \frac{K_c}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \quad \text{para } S(\tau) = B \quad (2.43)$$

### 3.ª Região

Para  $x = A+B$ , (três condições distintas)

i)  $0 < S(\tau) < B$  Da Eq(2.17) (frente de mudança de fase em andamento)

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial x} = \left( \frac{K_c}{K_s} \right) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \quad (2.44)$$

ii) Última camada de sólido da Eq(2.18)

$$- \frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \frac{1}{\text{stefan}} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} - \left( \frac{K_c}{K_L} \right) \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \quad (2.45)$$

iii)  $s(\tau) = B$  Material e mudança de fase totalmente fundido. Da Eq(2.18)

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \left[ \frac{K_C}{K_L} \right] \frac{\partial \theta_C}{\partial x} \quad (2.46)$$

Para  $x = A + B + C$  da Eq(2.19)

$$-K_C \frac{(T_R - T_m)}{e} \frac{\partial \theta_C}{\partial x} = h_{INT} (T_R - T_m) (\theta_C - \theta_{INT})$$

$$\frac{\partial \theta_C}{\partial x} = \frac{h_{INT} e}{K_C} (\theta_{INT} - \theta_C)$$

Como  $B_{i\ INT} = \frac{h_{INT} e}{K_C}$  tem-se que:

$$\frac{\partial \theta_C}{\partial x} = (B_{i\ INT}) (\theta_{INT} - \theta_C) \quad (2.47)$$

Como se nota, o equacionamento feito até este ponto simula o aquecimento por insolação a partir da face externa da parede externa. Isto corresponde à fusão do material de mudança de fase. Para o caso do resfriamento e consequente solidificação do material de mudança de fase, o equacionamento é o mesmo, mudando-se, tão somente, os índices de sólido para líquido e vice-versa, e o processo se caracterizará pelo avanço da frente de solidificação e insolação zero.

## CAPÍTULO 3

### MODELO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL

### 3.1. ESTABELECIMENTO DA MALHA COMPUTACIONAL

Para a representação da seção transversal da parede na equação discretizada, usaremos a seguinte matriz  $T_K(i,j)$ , onde  $(K)$  representa os vários campos acoplados, conforme descrição do capítulo 2,  $(i)$  a ordenada na direção transversal, no caso  $x$ , e  $(j)$  um dado instante do processo. Logo, para o campo  $K$ , em um dado instante  $j$ , a localização é dada por:

$$X_K = (i - 1) \Delta X_K \quad (3.1)$$

onde para cada campo  $K$  tem-se uma malha onde o número de pontos é fixo, com espaçamentos também fixos tanto para a parede externa como a parede interna, e um número fixo de pontos, porém com espaçamento móvel, conforme Murray [7], no campo do material de mudança de fase, enquanto aí estiver ocorrendo a mudança de fase. Conforme a Figura 3.1 o espaçamento na região de mudança de fase depende da presença ou não da frente de fusão e conseqüentemente da camada na fase líquida e da camada da fase sólida, posto que o

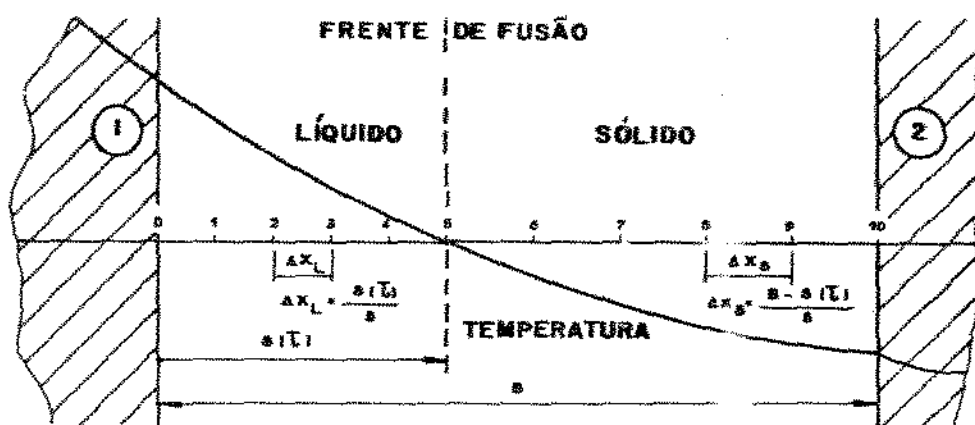


Figura 3.1 - Configuração da malha móvel com a frente de mudança de fase (① parede externa, ② Parede interna)

número de pontos é fixo em cada fase, ficando a configuração da malha total (nesse caso) conforme a Figura 3.2.

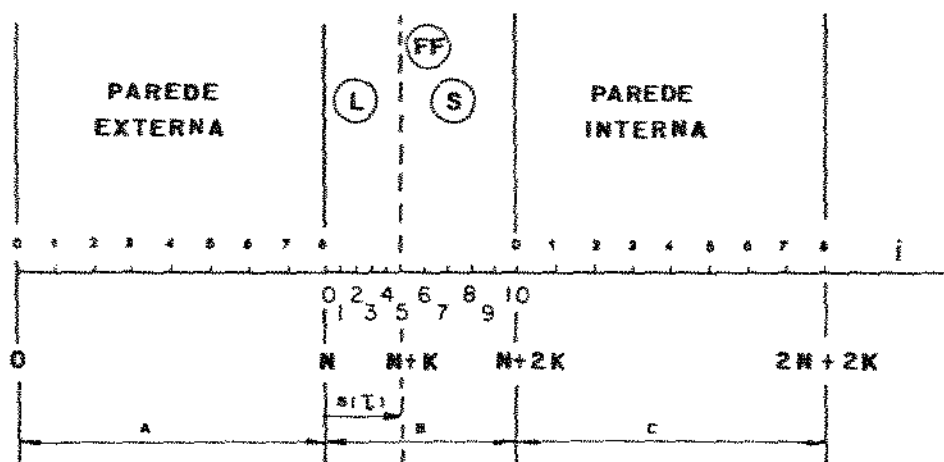


Figura 3.2 - Configuração da malha total (L) Líquido, (FF) Frente de Fusão, (S) Sólido)

### 3.2. OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DE DIFERENÇAS FINITAS

Seja, a função  $f$  uma função de  $n$  variáveis  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

São conhecidas as expansões por série de Taylor:

$$f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) = f(a_1, \dots, a_n) + \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} + \dots \quad (3.2)$$

$$f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n) = f(a_1, \dots, a_n) - \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} - \dots \quad (3.3)$$

Truncando-se as equações (3.2) e (3.3) após a derivada de 1ª ordem, obtemos duas expressões para  $\partial f / \partial a_k$  conforme Carnahan [8].

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{\Delta a_k} \quad (3.4)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{\Delta a_k} \quad (3.5)$$

Somando-se a eq. (3.2) a eq. (3.3), obtém-se uma nova expressão para  $\partial^2 f / \partial a_k^2$  conforme Carnahan [8]

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} &= \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{(\Delta a_k)^2} + \\ &+ \frac{f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{(\Delta a_k)^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Subtraindo-se (3.3) de (3.2), obtém-se uma nova expressão para  $\partial f / \partial a_k$  conforme Carnahan [8]

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n)}{2\Delta a_k} \quad (3.7)$$

Das equações (3.2) até (3.7) tira-se que:

$$\frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} = \frac{\theta_k(i, j+1) - \theta_k(i, j)}{\Delta \tau} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_k}{\partial x^2} = \frac{\theta_k(i-1, j) - 2\theta_k(i, j) + \theta_k(i+1, j)}{\Delta x_k^2} \quad (3.9)$$

onde  $K = A, L, S, C$

para a primeira região, substituindo as equações (3.8) e (3.9) na eq. (2.25) e rearranjando-se tem-se que:

$$\theta_A(i, j+1) = \frac{\Delta \tau \alpha_A}{\Delta_A^2 \alpha_L} \left[ \theta_A(i-1, j) + \theta_A(i+1, j) \right] + \theta_A(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta \tau \alpha_A}{\Delta x_A^2 \alpha_L} \right] \quad (3.10)$$

onde  $\Delta x_A = \frac{A}{N_A - 1}$

Condições de contorno, para a primeira região

Da eq (3.2) para o ponto  $x = 0$  segundo Karnahan [6] tem-se que:

$$\left[ \frac{\partial^2 \theta_A}{\partial x^2} \right]_1 = \frac{2}{\Delta x_A^2} \left[ \theta_A(i+1, j) - \theta_A(i, j) - \Delta x_A \left[ \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_A \right] \quad (3.11)$$

Substituindo as equações (3.11) e, (3.8) na equação (2.25) tira-se que:

$$- \Delta x_A \left[ \frac{\partial \theta_A}{\partial x_A} \right]_1 = \frac{\Delta x_A^2 \alpha_L}{2\Delta \tau \alpha_A} \left[ \theta_A(i, j+1) - \theta_A(i, j) \right] - \theta_A(i+1, j) + \theta_A(i, j) \quad (3.12)$$

Substituindo-se (3.12) na condição (2.35) tem-se:

$$\begin{aligned} \theta_A(i, j+1) = & \theta_A(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau \alpha_A}{\Delta x_A^2 \alpha_L} - \frac{2\Delta\tau \alpha_A}{\Delta x_A} Bi \right] + \\ & + \theta_A(i+1, j) \left[ \frac{2\Delta\tau \alpha_A}{\Delta x_A^2 \alpha_L} \right] + \theta_S(j) \left[ \frac{2\Delta\tau \alpha_A}{\Delta x_A} \right] Bi \end{aligned} \quad (3.13)$$

Para  $i=1 \Rightarrow x = 0$

Da equação (3.2) para o ponto  $x = A$  tira-se segundo Karnahan [8] que:

$$\frac{\partial^2 \theta_A}{\partial x_A^2} = \frac{2}{\Delta x_A^2} \left[ \theta_A(i-1, j) - \theta_A(i, j) + \Delta x_A \left[ \frac{\partial \theta_A}{\partial x_A} \right] \right] \quad (3.14)$$

Substituindo-se as equações (3.14) e (3.8) na equação (2.25) tira-se que:

$$\Delta x_A \left[ \frac{\partial \theta_A}{\partial x_A} \right] = \frac{\Delta x_A^2 \alpha_L}{2\Delta\tau \alpha_A} \left[ \theta_A(i, j+1) - \theta_A(i, j) \right] - \theta_A(i-1, j) + \theta_A(i, j) \quad (3.15)$$

Substituindo-se as equações (3.11) e (3.8) na equação (2.26) tem-se que:

$$-\Delta x_L \left[ \frac{\partial \theta_L}{\partial x_L} \right] = \frac{\Delta x_L^2}{2\Delta\tau} \left[ \theta_L(i, j+1) - \theta_L(i, j) \right] + \theta_L(i, j) - \theta_L(i+1, j) \quad (3.16)$$

Para o material de mudança de fase na fase líquida e já para a fase sólida tem-se que:

$$-\Delta x_s \left[ \frac{\partial \theta_s}{\partial x_s} \right] = \frac{\Delta x_s^2 \alpha_L}{2\Delta \tau \alpha_s} \left[ \theta_s(i, j+1) - \theta_s(i, j) \right] - \theta_s(i+1, j) + \theta_s(i, j) \quad (3.17)$$

Como esta condição de contorno depende da localização da frente de fusão tem-se três possibilidades:

i) Para o material de mudança de fase na fase sólida. Substituindo as equações (3.15) e (3.17) na condição (2.36) tem-se conforme anexo (4) que, para  $x = A$ ,  $i = NA$  e  $S(\tau) = 0$  que:

$$\begin{aligned} \theta_A(i, j+1) = & \theta_A(i-1, j) \left[ \frac{K_A 2\Delta \tau \alpha_A \alpha_s}{\Delta x_A \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_A)} \right] + \\ & + \theta_A(i, j) \left[ 1 - \frac{K_A K_s 2\Delta \tau \alpha_A \alpha_s}{\Delta x_A \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_A)} \right] + \\ & + \theta_s(i+1, j) \left[ \frac{K_A 2\Delta \tau \alpha_A \alpha_s}{\Delta x_s \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_A)} \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

ii) Para  $x = A$  formando a primeira lâmina de líquido, substituem-se as equações (3.15) e (3.16) na (2.38) e conforme o anexo (5) tem-se que:

$$\begin{aligned} S(j+1) = S(j) + \frac{K_A}{K_s} \text{STEFAN} \frac{\Delta \tau}{\Delta x_A} \left[ \theta_A(i-1, j) - \theta_M \right] + \\ + \frac{K_s}{K_L} \text{STEFAN} \frac{\Delta \tau}{\Delta x_s} \left[ \theta_s(i+1, j) - \theta_M \right] + \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde  $\theta_A(i,j) = \theta_S(i,j) = \theta_A(i,j+1) = \theta_S(i,j+1) = \theta_M$

iii) Para  $x = A$  e  $S(\tau) > 0$  tem-se, substituindo-se as equações (3.15) e (3.16) na equação (2.39) que:

$$\begin{aligned} \theta_A(i,j+1) = & \theta_A(i-1,j) \left[ \frac{K_A 2\Delta\tau\alpha_A}{\Delta x_A (K_A \Delta x_A \alpha_L + K_L \Delta x_L \alpha_A)} \right] + \\ & + \theta_A(i,j) \left[ 1 - \frac{K_A K_L 2\Delta\tau\alpha_A}{\Delta x_A (K_A \Delta x_A \alpha_L + K_L \Delta x_L \alpha_A)} \right] + \\ & + \theta_L(i+1,j) \left[ \frac{K_A 2\Delta\tau\alpha_A}{\Delta x_L (K_A \Delta x_A \alpha_L + K_L \Delta x_L \alpha_A)} \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Para a 2ª região ou seja  $A < x < A+B$ , no material de mudança de fase tem-se três condições possíveis:

- i) Todo material de mudança de fase na fase sólida [ $S(\tau) = 0$ ].
- ii) Todo material de mudança de fase na fase líquida [ $S(\tau) = B$ ].
- iii) Material de mudança de fase com as duas fases presentes [ $0 < S(\tau) < B$ ] e uma frente de mudança de fase.

Para tanto adotam-se dois tipos de malha computacional uma fixa para as duas primeiras condições e uma malha móvel para o caso 3, conforme a figura 3.1, que se desenvolve junto com a frente de fusão.

Para o caso da malha fixa tem-se, substituindo as equações (3.8) e (3.9) na equação (2.26), que:

$$\theta_K(i, j+1) = \frac{\Delta\tau \alpha_K}{\Delta x_K^2 \alpha_L} \left[ \theta_K(i-1, j) + \theta_K(i+1, j) \right] + \theta_K(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau \alpha_K}{\Delta x_K^2 \alpha_L} \right] \quad (3.21)$$

onde  $K = S$  (sólido) ou  $K = L$  (Líquido)

Para o caso da presença da frente de mudança de fase adotando-se a malha móvel, tem-se, conforme anexo (6), que :

a) Para a fase líquida com frente de mudança de fase em evolução:

$$\begin{aligned} \theta_L(i, j+1) = & \theta_L(i-1, j) \Delta\tau \left[ \left[ \frac{K}{S(j)} \right]^2 - \frac{(i-NA-1)}{2S(j)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\ & + \theta_L(i, j) \left[ 1 - 2\Delta\tau \left[ \frac{K}{S(j)} \right]^2 \right] + \\ & + \theta_L(i+1, j) \Delta\tau \left[ \left[ \frac{K}{S(j)} \right]^2 + \frac{(i-NA-1)}{2S(j)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] \end{aligned} \quad (3.22)$$

b) Para a fase sólida com frente de fusão em evolução:

$$\begin{aligned} \theta_s(i, j+1) = & \theta_s(i-1, j) \Delta\tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \left( \frac{K}{B-S(\tau)} \right)^2 \frac{1-(NA+1)}{2[B-S(j)]} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\ & + \theta_s(i, j) \left[ 1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_L} 2\Delta\tau \left( \frac{B-S(\tau)}{K} \right) \right]^2 + \\ & + \theta_s(i+1, j) \Delta\tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \left( \frac{K}{B-S(\tau)} \right)^2 - \frac{1-(NA+1+K)}{2[B-S(j)]} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] \quad (3.23) \end{aligned}$$

c) Para a frente de mudança de fase ou seja para:

$$x_i = A + S(\tau) \quad \text{onde } i = N_A + 1 + K \quad (3.24)$$

Da equação (3.4) obtém-se a aproximação ascendente

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial x} = \frac{\theta_s(i+1, j) - \theta_s(i, j)}{\Delta x_s} \quad (3.25)$$

Da equação (3.5) obtém-se a aproximação descendente

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial x} = \frac{\theta_L(i, j) - \theta_L(i-1, j)}{\Delta x_L} \quad (3.26)$$

Das equações (2.30), (3.8), (3.25) e (3.26) e lembrando-se que para:

$$i = N_A + 1 + K \Rightarrow \theta_L(i, j) = \theta_s(i, j) = \theta_M \quad (3.27)$$

tem-se que, para a frente de mudança de fase

$$S(j+1) = S(j) + \Delta\tau \text{ STEFAN} \left[ \frac{\theta_L(i-1,j)}{\Delta x_L} - \theta_m \left( \frac{1}{\Delta x_L} + \frac{K_s}{K_L} \frac{1}{\Delta x_s} \right) + \frac{K_s}{K_L} \frac{\theta_s(i+1,j)}{\Delta x_s} \right] \quad (3.28)$$

Condições de contorno para  $x = A + B$ , três possibilidades:

i)  $x = A + B$  ,  $0 < S(\tau) < B$  da equação (2.44) e procedendo-se de modo análogo ao da equação 3.18 tem-se que:

$$\begin{aligned} \theta_s(i,j+1) = & \theta_s(i-1,j) \left[ \frac{K_c 2\Delta\tau \alpha_c \alpha_s}{\Delta x_c \alpha_L (K_c \Delta x_c \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_c)} \right] + \\ & + \theta_s(i,j) \left[ 1 - \frac{K_c K_s 2\Delta\tau \alpha_c \alpha_s}{\Delta x_c \alpha_L (K_c \Delta x_c \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_c)} \right] + \\ & + \theta_c(i+1,j) \left[ \frac{K_c 2\Delta\tau \alpha_c \alpha_s}{\Delta x_s \alpha_L (K_c \Delta x_c \alpha_s + K_s \Delta x_s \alpha_c)} \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

ii)  $x = A + B$  e presente a última lâmina de material de mudança de fase sólido.

$$\begin{aligned} S(j+1) = S(j) + \text{STEFAN} \frac{\Delta\tau}{\Delta x_L} \left[ \theta_L(i-1,j) - \theta_m \right] + \\ + \text{STEFAN} \frac{\Delta\tau}{\Delta x_L} \left[ \theta_c(i+1,j) - \theta_m \right] \end{aligned} \quad (3.30)$$

iii)  $x = A + B$  e todo o material de mudança de fase na fase líquida, substituem-se as equações (A7.3) e (A7.4) do anexo 7 na condição (2.46) de onde tem-se que:

$$\frac{1}{\Delta x_L} \left[ \frac{\Delta x_L^2}{2\Delta\tau} (\theta_L(i, j+1) - \theta_L(i, j)) \right] - \theta_L(i-1, j) + \theta_L(i+1, j) =$$

$$- \left( \frac{K_c}{K_L} \right) \frac{1}{\Delta x_c} \left[ \frac{\Delta x_c^2}{2\Delta\tau} \frac{\alpha_L}{\alpha_c} (\theta_c(i, j+1) - \theta_c(i, j)) - \theta_c(i+1, j) + \theta_c(i, j) \right] \quad (3.31)$$

Para  $x = A + B$ ,  $i = N_A + 2K$

$$\theta_L(i, j) = \theta_c(i, j)$$

$$\theta_L(i, j+1) = \theta_c(i, j+1)$$

Logo,

$$\theta_L(i, j+1) = \theta_L(i-1, j) \left[ \frac{K_L 2\Delta\tau \alpha_c}{\Delta x_L (K_L \Delta x_L \alpha_c + K_c \Delta x_c \alpha_L)} \right] +$$

$$+ \theta_L(i, j) \left[ 1 - \frac{K_L K_c 2\Delta\tau \alpha_c}{\Delta x_L (K_L \Delta x_L \alpha_c + K_c \Delta x_c \alpha_L)} \right] +$$

$$+ \theta_c(i+1, j) \left[ \frac{K_L 2\Delta\tau \alpha_c}{\Delta x_c (K_L \Delta x_L \alpha_c + K_c \Delta x_c \alpha_L)} \right] \quad (3.32)$$

Para a terceira região ou seja a parede interna, tem-se substituindo as equações (3.8) e (3.9) na equação (2.31) e

rearranjando que:

$$\theta_c(i, j+1) = \frac{\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c^2 \alpha_L} \left[ \theta_c(i-1, j) + \theta_c(i+1, j) \right] + \theta_c(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c^2 \alpha_L} \right] \quad (3.33)$$

$$\text{onde } \Delta x_c = \frac{C}{N_c - 1}$$

Condições de contorno para  $x = A + B + C$ . Tem-se das equações (3.14), (3.15) para as condições (2.47) que:

$$\begin{aligned} \theta_c(i, j+1) = & \theta_c(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c^2 \alpha_L} - \frac{2\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c} Bi_{INT} \right] + \\ & + \theta_c(i-1, j) \left[ \frac{2\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c^2 \alpha_L} \right] + \theta_{INT}(j) \left[ \frac{2\Delta \tau \alpha_c}{\Delta x_c} Bi_{INT} \right] \quad (3.34) \end{aligned}$$

### 3.3. VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ERROS E ESTABILIDADE DO MÉTODO EXPLÍCITO UTILIZADO

#### 3.3.1. Erros introduzidos

Na solução numérica de equações diferenciais, as derivadas são substituídas por expressões de diferenças finitas a cada nó e a solução da equação diferencial é reduzida à resolução de um conjunto de equações algébricas. No entanto, um erro é introduzido a cada etapa de cálculo devido às aproximações envolvidas nas diferenças e no cálculo numérico. O efeito acumulativo destes erros na solução final e a estabilidade da equação diferencial são muito importantes e a isto deve-se atenção especial.

A cada etapa, o erro introduzido ao se limitar o número de casas decimais é chamado de erro de arredondamento. Em problemas lineares o efeito destes erros se superpõe durante a solução. O uso de uma malha de pequenas dimensões, ainda que contribua para uma melhor aproximação da equação diferencial, aumenta o efeito acumulativo do erro de arredondamento. Por isso, não se pode dizer sempre que, diminuindo o tamanho da malha, aumenta-se a precisão do cálculo em diferenças finitas. Por outro lado, conduzindo o cálculo numérico à estágios intermediários de duas ou mais casas decimais, ajuda-se a reduzir o efeito acumulativo do erro de arredondamento.

A distribuição do erro de arredondamento se assemelha muito à forma de um processo randômico, e é provável que os efeitos destes erros se cancelem durante as etapas de cálculo, sendo impossível de se determinar exatamente a ordem de grandeza do desvio na solução da equação devido ao erro de arredondamento.

Quando se expressa uma equação diferencial parcial em diferenças finitas, usando uma expansão em série de Taylor, a série é interrompida após um certo número de termos. O erro envolvido em cada etapa do cálculo, resultado da interrupção das séries, é chamado erro de truncamento. Nas equações utilizadas neste modelo estudado, a ordem de grandeza do erro de truncamento é de  $(\Delta x)^2$ , a cada etapa de cálculo.

### 3.3.2. Estabilidade da solução

Mesmo sabendo que durante as etapas de cálculo os erros de arredondamento e truncamento são cuidadosamente observados para que permaneçam em pequenas dimensões, algum desvio é introduzido na solução por diferenças finitas. Seja  $\gamma$  o valor máximo absoluto do erro introduzido no cálculo para cada ponto da malha e  $Z^*$  o resultado numérico da equação diferencial com diferenças finitas.

Se  $Z$  é a solução da equação diferencial com diferenças finitas, assumindo que nenhum erro é introduzido no cálculo, a diferença  $[Z^* - Z]$  é o desvio da solução numérica, resultante dos erros. A solução da equação das diferenças finitas é chamada estável se o valor de  $[Z^* - Z]$  tender a zero, tal que  $\gamma$  tenda a zero e não aumente exponencialmente quando o tamanho da malha tender a zero, conforme SMITH [25].

A consideração de estabilidade é importante na solução da equação. Alguns métodos têm sido utilizados na literatura para estabelecer as condições de estabilidade. RICHMEYER [26], utiliza "von Neumann's Fourier Series Expansion Method" na análise da estabilidade de equações de condução de calor dependentes do tempo. Este método não inclui automaticamente os efeitos das condições de contorno na estabilidade do sistema de diferenças. Um "Matrix Method", descrito por SMITH [25], inclui os efeitos das condições de contorno na estabilidade de tais sistemas.

Evidencia-se neste ponto que o tipo de equação diferencial e o tipo de condição de contorno tem influência na escolha do esquema de diferenciação utilizado. Em conformidade, o critério de estabilidade não pode ser generalizado para todos os sistemas empregados. Cada sistema deve ser examinado individualmente, para verificar sua estabilidade.

Para a verificação deste fato, analisam-se as equações (3.10), (3.13), (3.18), (3.20), (3.21), (3.22), (3.23), (3.29), (3.32) e (3.34), que representam o conjunto de equações numéricas que descrevem o comportamento da condução do calor através da parede térmica, com todas as suas condições de contorno. Neste conjunto de equações estudam-se os coeficientes multiplicadores das temperaturas que podem assumir valores negativos CARNAHAN [8] recomenda para a estabilidade do método que estes coeficientes sejam positivos ou nulos, de onde tiram-se as relações entre a

malha adotada e o intervalo de tempo.

Como se tem o fenômeno da mudança de fase as condições de contorno tornam-se "dinâmicas" havendo a necessidade de durante a simulação numérica fazer um estudo dos parâmetros malha e tempo para cada conjunto de condições e equações funcionando em particular. De modo generalizado o estudo concentra-se nas seguintes equações:

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L}{2\alpha_A} \Delta X_A^2 \quad (3.35)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L}{2\alpha_A (1 + \alpha_L \Delta X_A \text{Bl}_{EXT})} \Delta X_A^2 \quad (3.36)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L (K_A \Delta X_A \alpha_S + K_S \Delta X_S \alpha_A)}{2K_A K_S \alpha_A \alpha_S} \Delta X_A \quad (3.37)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{(K_A \Delta X_A \alpha_L + K_L \Delta X_L \alpha_A)}{2K_A K_L \alpha_A} \Delta X_A \quad (3.38)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L}{2\alpha_K} \Delta X_K^2 \quad \text{onde } k = s \text{ ou } l \quad (3.39)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{1}{2} \left( \frac{S(J)}{K} \right)^2 \quad (3.40)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{1}{2} \frac{\alpha_L}{\alpha_S} \left( \frac{K}{B-S(\tau)} \right)^2 \quad (3.41)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L (K_C \Delta X_C \alpha_s + K_S \Delta X_S \alpha_C)}{2K_A K_S \alpha_A \alpha_S} \quad (3.42)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{(K_L \Delta X_L \alpha_c + K_c \Delta X_c \alpha_L)}{2K_L K_c \alpha_c} \Delta X_A \quad (3.43)$$

$$\Delta \tau \leq \frac{\alpha_L}{2\alpha_c (1 + \alpha_L \Delta X_c Bi_{INT})} \quad (3.44)$$

Do conjunto de equações (3.35 a 3.44) as que funcionam simultaneamente formam os seguintes grupos:

a) Material de mudança de fase na fase sólida:

Eq. 3.35, 3.36, 3.37, 3.39, 3.42, 3.44.

b) Formando a primeira lâmina líquida de material de mudança de fase:

Eq. 3.35, 3.36, 3.38, 3.39, 3.42, 3.44.

c) Frente de fusão em evolução:

Eq. 3.35, 3.36, 3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.44.

d) Última camada sólida de material de mudança de fase

eq. 3.35, 3.36, 3.38, 3.39, 3.42, 3.44.

e) Material de mudança de fase todo na fase líquida:

Eq. 3.35, 3.36, 3.38, 3.39, 3.43, 3.44.

O procedimento para a escolha do incremento de tempo, ficou automatizado dentro do próprio programa onde a cada etapa do programa élege-se o valor ótimo, tirado dos grupos de equações acima.

### 3.4. RESULTADOS NUMÉRICOS E COMENTÁRIOS

Baseado nos modelos matemáticos, e nos procedimentos numéricos descritos, desenvolveu-se um programa computacional, conforme figuras 3.3 e 3.4, obtendo-se os resultados que são apresentados a seguir. Estes resultados podem ser divididos em quatro grupos.

1. Resultados para paredes sem material de mudança de fase.
2. Resultados para paredes com material de mudança de fase.
3. Coberturas sem material de mudança de fase.
4. Coberturas com material de mudança de fase.

#### 3.4.1. Paredes

Neste caso para a resolução das equações, utilizou-se de materiais cujas propriedades termofísicas são apresentadas pela literatura. Estes valores estão bem próximos dos valores encontrados na avaliação das propriedades dos materiais utilizados nos modelos experimentais.

##### a) Tijolo:

Tipo - tijolo especial para acabamento de tipo a vista.

Dimensões - 240 mm x 120 mm x 60 mm, [37]

Das referências, [3], [38], [39]

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Condutividade Térmica ..... | 0,7 W/m °C             |
| Calor específico .....      | 0,840 KJ/kg °C         |
| Massa específica .....      | 1600 kg/m <sup>3</sup> |
| Emissividade .....          | 0,93                   |

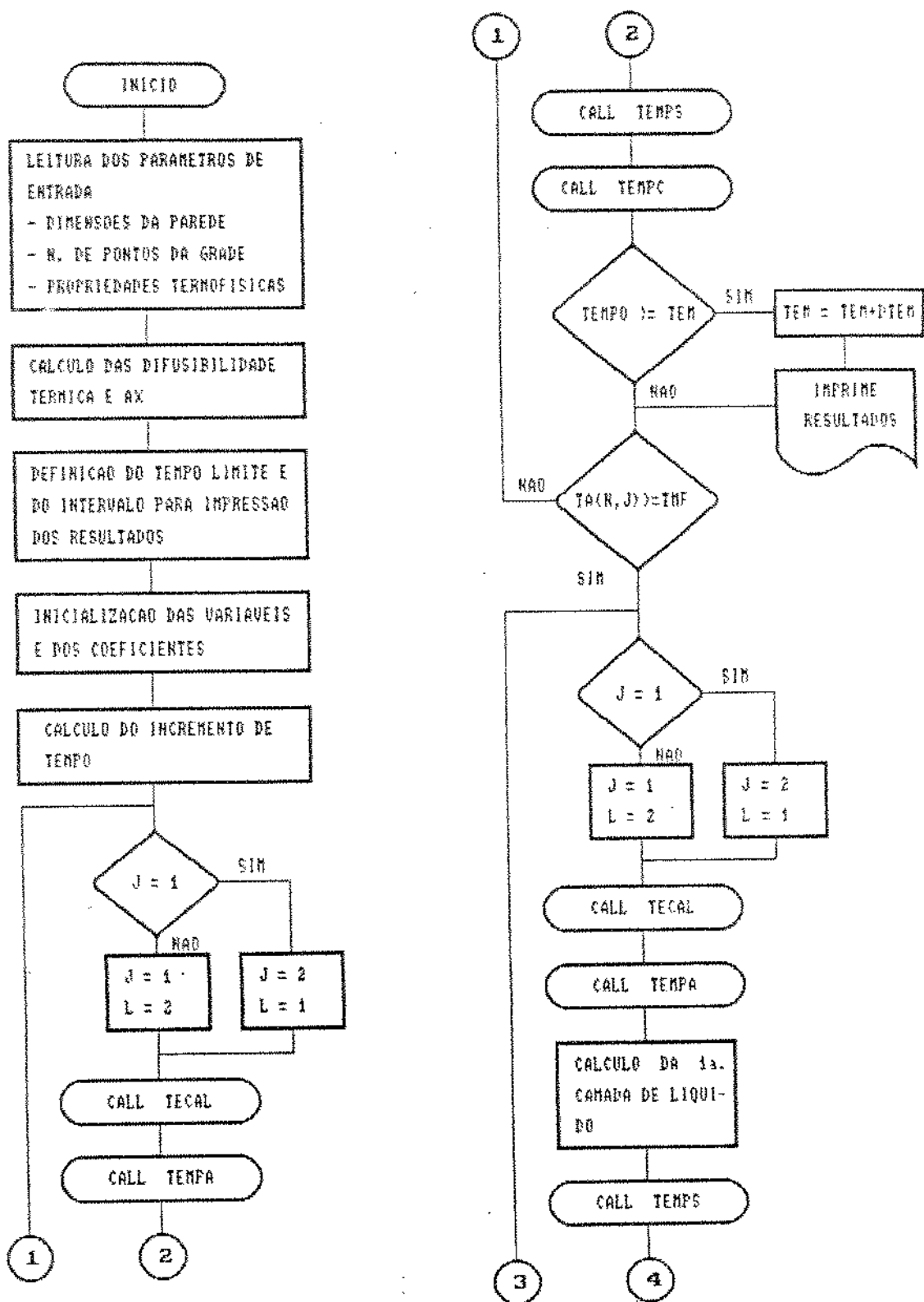
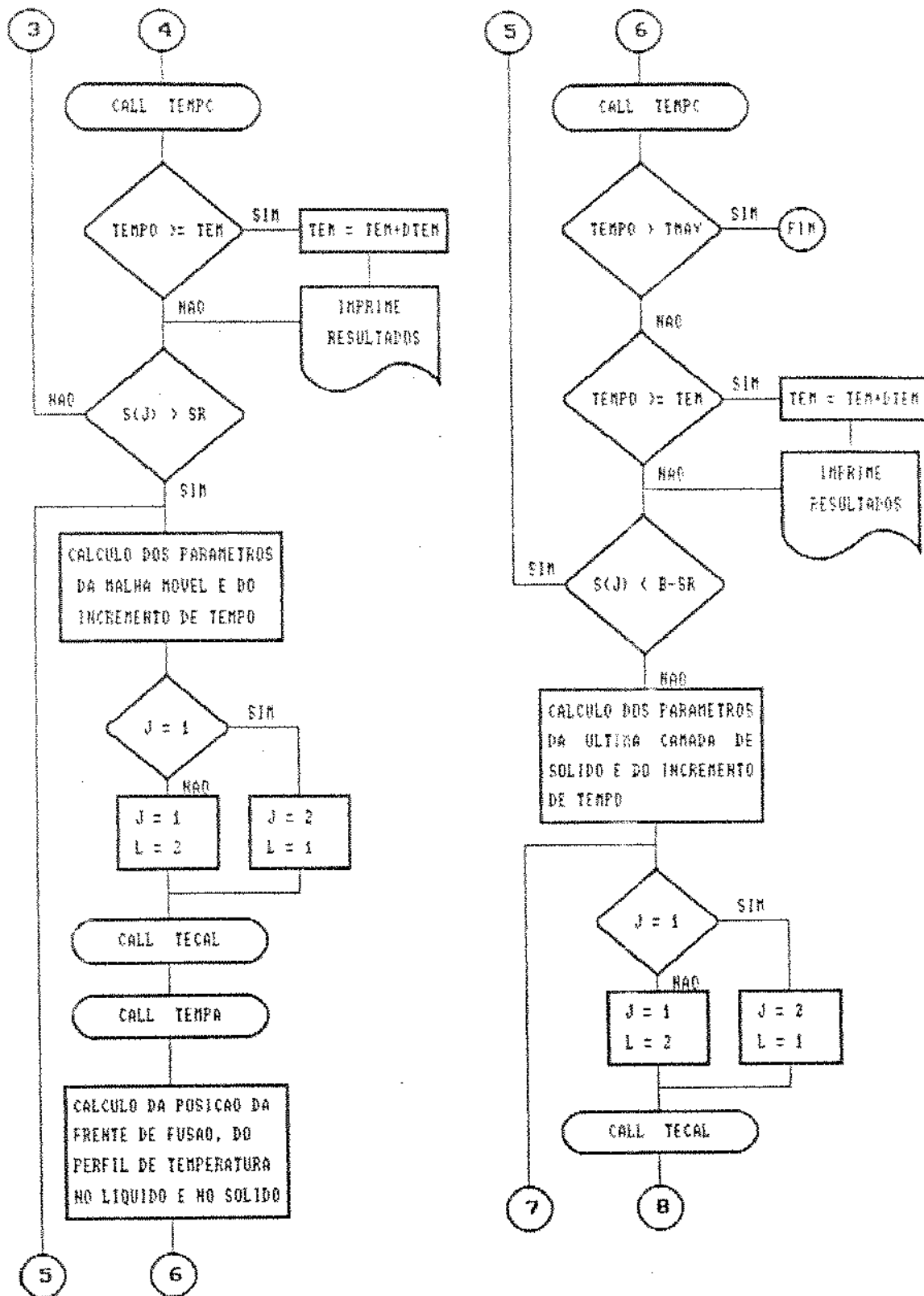
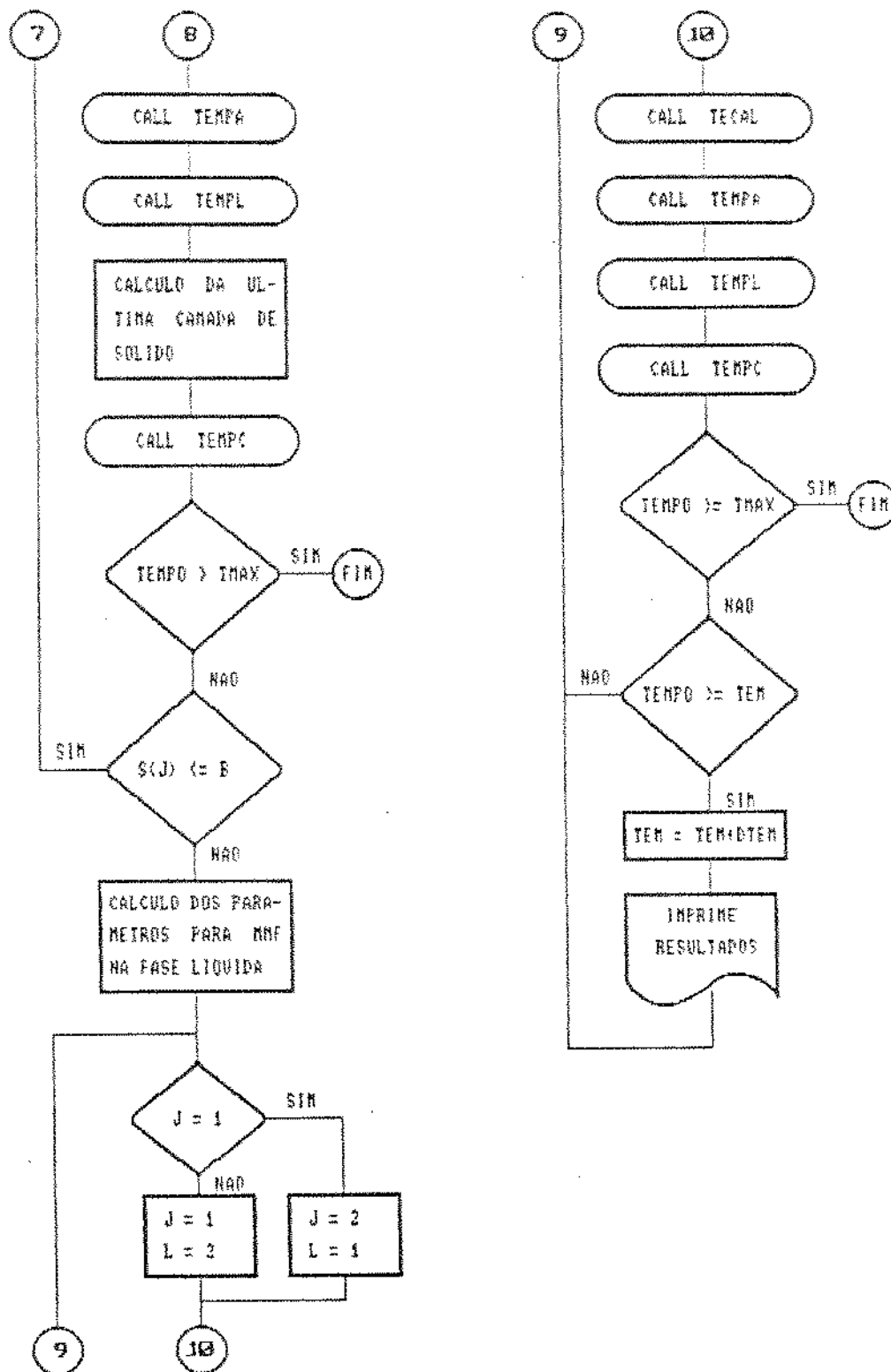


Figura 3.3 - Fluxograma global de solução.



Continuação da Figura 3.3.



Continuação da Figura 3.3.

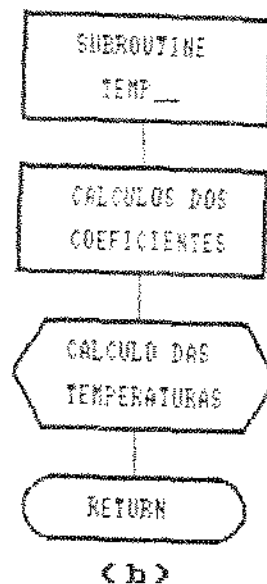
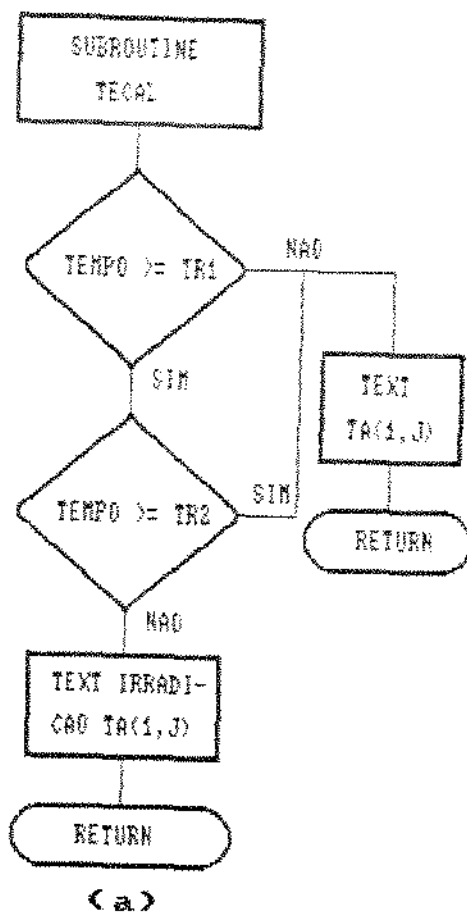


Figura 3.4(a) - Fluxograma para o cálculo da irradiação, da temperatura do ambiente externo, e da temperatura da face externa da parede.

(b) - Fluxograma para o cálculo do perfil de temperatura em cada parte da parede.

b) Material de mudança de fase, (16)

- Parafina, 5913, (C13 - C24) concentração de óleo (20%)
- Temperatura de mudança de fase  $22^{\circ}\text{C}$  -  $24^{\circ}\text{C}$   
(Temperatura adotada  $23^{\circ}\text{C}$ )
- Calor latente de mudança de fase  $189\text{ KJ/kg}$
- Fase sólida
  - Massa específica .....  $760\text{ kg/m}^3$
  - Condutividade térmica .....  $0,21\text{ W/m }^{\circ}\text{K}$
  - Calor específico (Valor adotado igual  
ao da fase líquida) .....  $2,1\text{ KJ/kg }^{\circ}\text{K}$
- Fase líquida
  - Massa específica .....  $900\text{ kg/m}^3$
  - Condutividade térmica (Valor adotado  
igual ao da fase sólida) .....  $0,21\text{ W/m }^{\circ}\text{K}$
  - Calor específico .....  $2,1\text{ KJ/kg }^{\circ}\text{K}$

Esta parafina foi escolhida por ter a temperatura de mudança de fase, na faixa de conforto térmico, e possuir um elevado calor latente de fusão conforme verifica-se pela Figura A9.1 do Anexo 9.

c) Ar

- Coeficientes de convecção externo e interno são considerados constantes e iguais aos valores médios recomendados por ASHRAE [22]

$$h_{\text{INT}} = 8,0\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_{\text{EXT}} = 17,03\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Com estes valores simulou-se três tipos básicos de paredes convencionais

- a)  $1/2$  tijolo (12 cm)
- b)  $1/2 + 1/4$  tijolo (18 cm)
- c)  $1/2$  tijolo +  $1/2$  tijolo = 1 tijolo (24 cm)

Estes tipos básicos de paredes convencionais, permitem a construção das paredes térmicas com várias combinações de paredes de tijolos e várias espessuras de material de mudança de fase.

Para fins de comparação do desempenho térmico escolheu-se dois tipos básicos de paredes. A parede de 1 tijolo e a parede de  $1/2 + 1/4$  de tijolo com uma camada de 2,0 cm ou 4,0 cm de materiais de mudança de fase formando o seguinte conjunto de paredes térmicas:

- a)  $1/2$  tijolo + 2,0 cm MMF +  $1/2$  tijolo
- b)  $1/2$  tijolo + 4,0 cm MMF +  $1/2$  tijolo
- c)  $1/2$  tijolo + 2,0 cm MMF +  $1/4$  tijolo
- d)  $1/2$  tijolo + 4,0 cm MMF +  $1/4$  tijolo

Este tipo de combinação de tijolos foi escolhido por reproduzir o protótipo idealizado.

Para a comparação do desempenho térmico destas paredes escolheu-se uma condição crítica onde a radiação é igual a radiação total recebida por um plano na horizontal no dia 10 de dezembro e com a correspondente temperatura do ambiente externo simulados conforme Anexos 1 e 3.

Com isto obteve-se os resultados mostrados nas Figuras de 3.5 a 3.14.

Como nota-se comparando o grupo de Figuras de 3.5 a 3.8 referentes as paredes convencionais, com o grupo de Figuras 3.9 a

3.13 referentes as paredes térmicas, o comportamento térmico das mesmas sofre uma acentuada alteração quanto ao desempenho térmico, com a colocação da camada de material de mudança de fase. Esta alteração se evidencia na Figura 3.14 onde mesmo submetido as mesmas condições externas tem-se uma temperatura média interna, nas várias horas do dia, em média de 5 °C a 10°C inferior para a parede térmica em relação a parede convencional.

Com relação a carga térmica para o interior, nota-se, pela Tabela 3.1, que no caso da parede térmica além da redução tem-se um deslocamento no tempo do valor máximo (quando existente) para o período noturno.

TABELA 3.1 - Carga térmica máxima através da parede convencional e parede térmica para as condições de simulação.

| TIPO DE<br>PAREDE<br>DE<br>TIJOLOS | PAREDE<br>CONVENCIONAL |                  | parede térmica |                  |            |                  |
|------------------------------------|------------------------|------------------|----------------|------------------|------------|------------------|
|                                    |                        |                  | 2,0 cm MMF     |                  | 4,0 cm MMF |                  |
|                                    | HORA                   | W/m <sup>2</sup> | HORA           | W/m <sup>2</sup> | HORA       | W/m <sup>2</sup> |
| 1/2                                | 15:30                  | 167              | 17:30          | 104              | 20:00      | 52               |
| 1/2 + 1/4                          | 17:00                  | 108              | 19:30          | 65               | 22:00      | 22               |
| 1                                  | 19:00                  | 76               | 24:00          | 34               | -          | zero             |

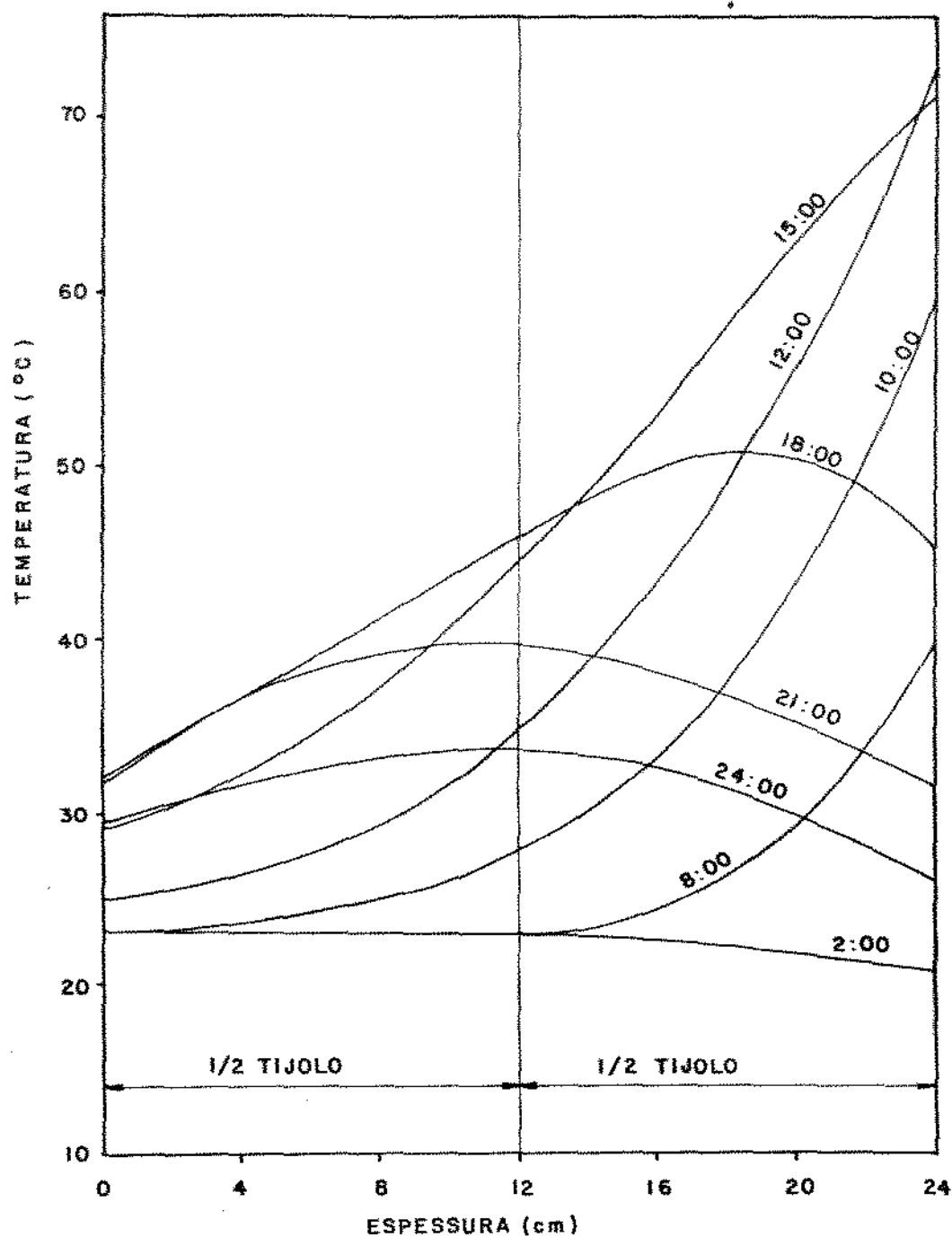


Figura 3.5 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de um tijolo nas várias horas do dia.

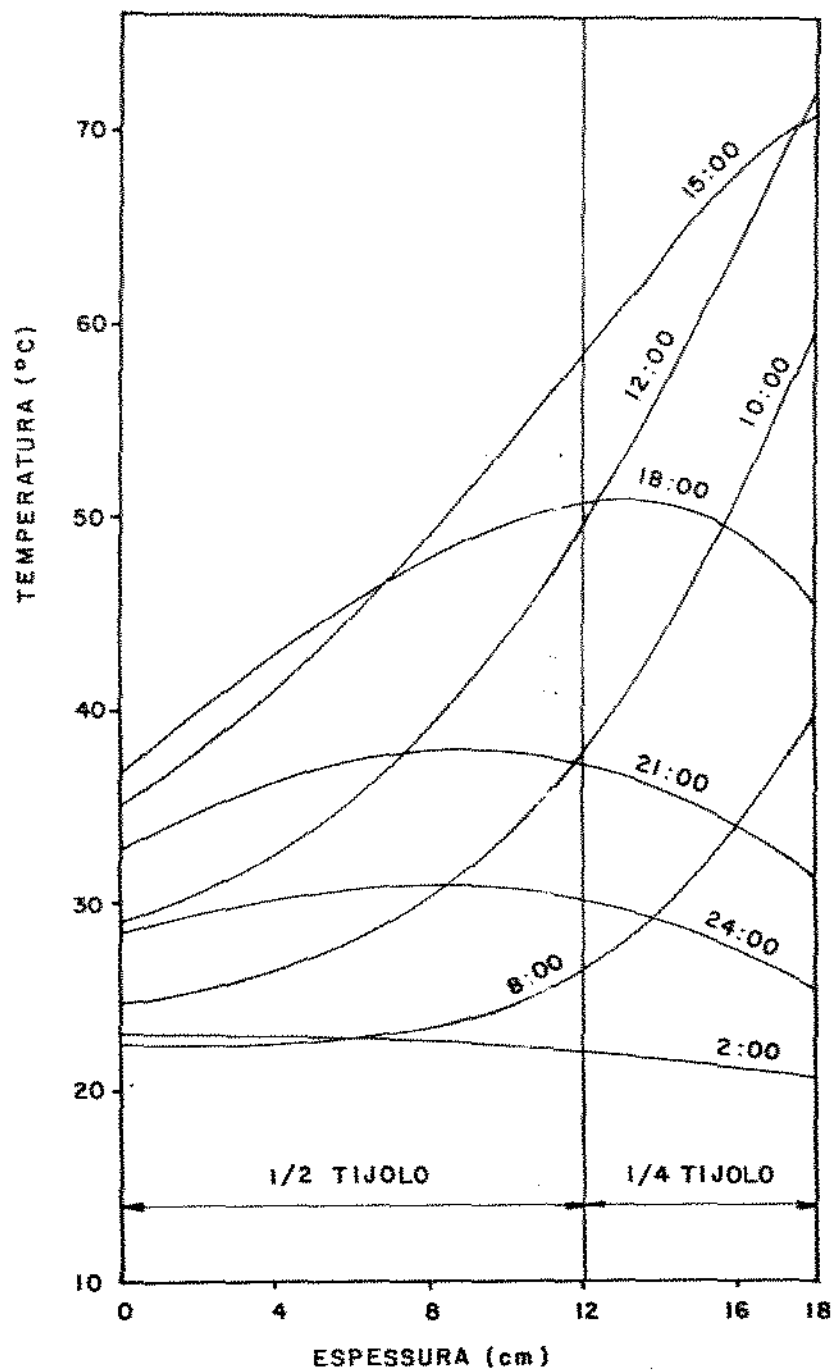


Figura 3.6 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de 1/2 + 1/4 de tijolo nas várias horas do dia.

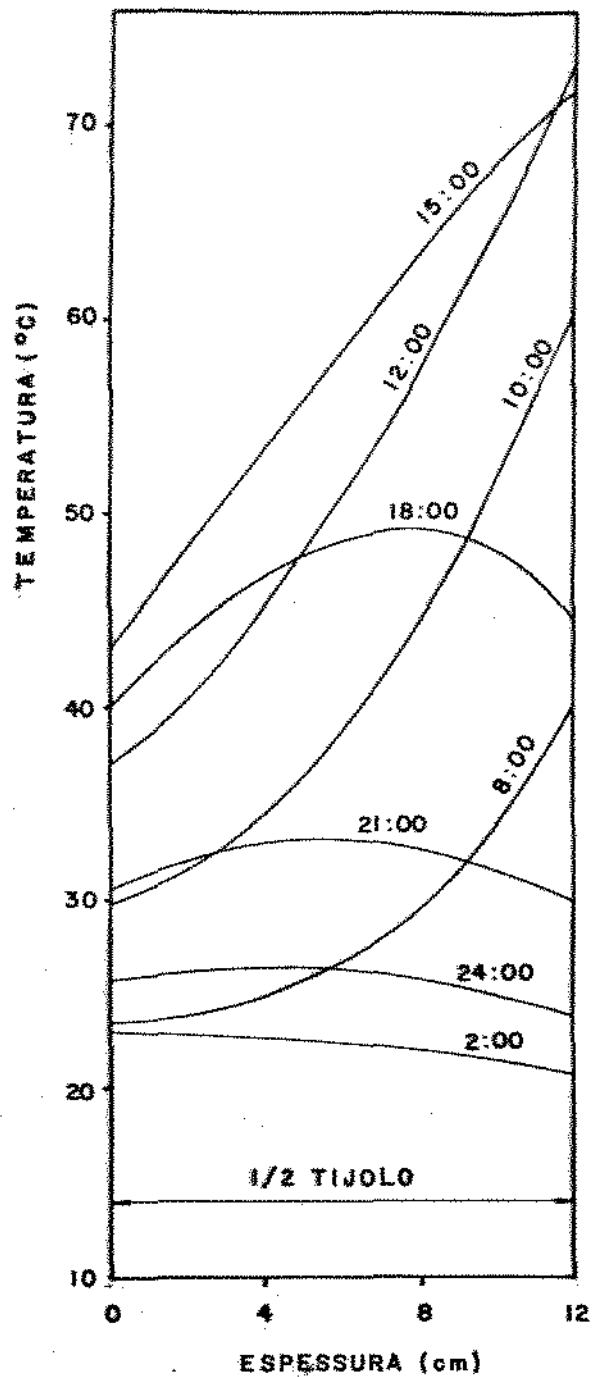


Figura 3.7 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional de 1/2 tijolo nas várias horas do dia.

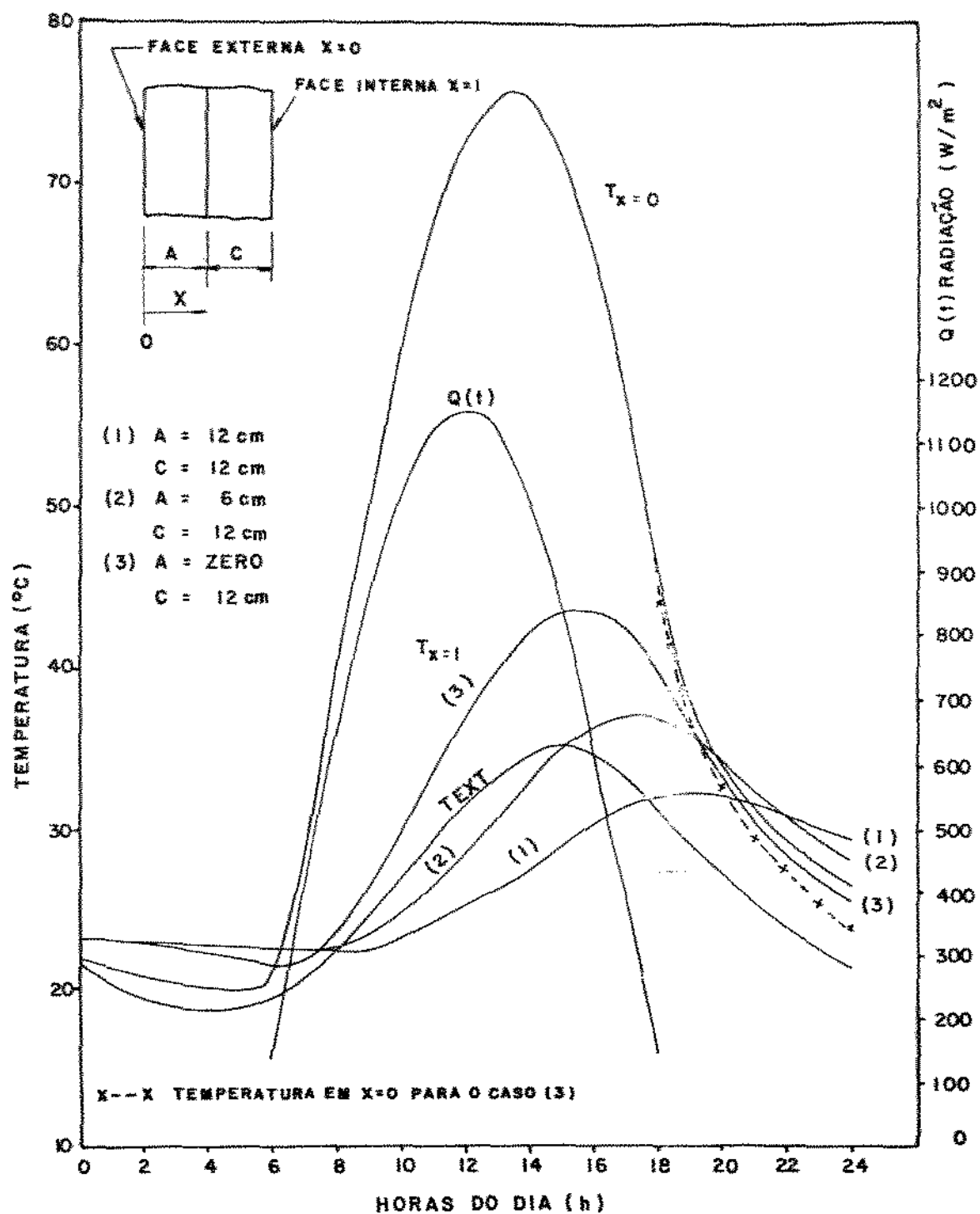


Figura 3.8 - Variação da temperatura na superfície externa ( $T_{x=0}$ ) e interna ( $T_{x=1}$ ) para a parede convencional de 1 tijolo (1), 1/2 + 1/4 de tijolo (2), 1/2 tijolo (3), radiação solar incidente ( $Q(t)$ ), variação da temperatura ambiente externo ( $T_{EXT}$ ).

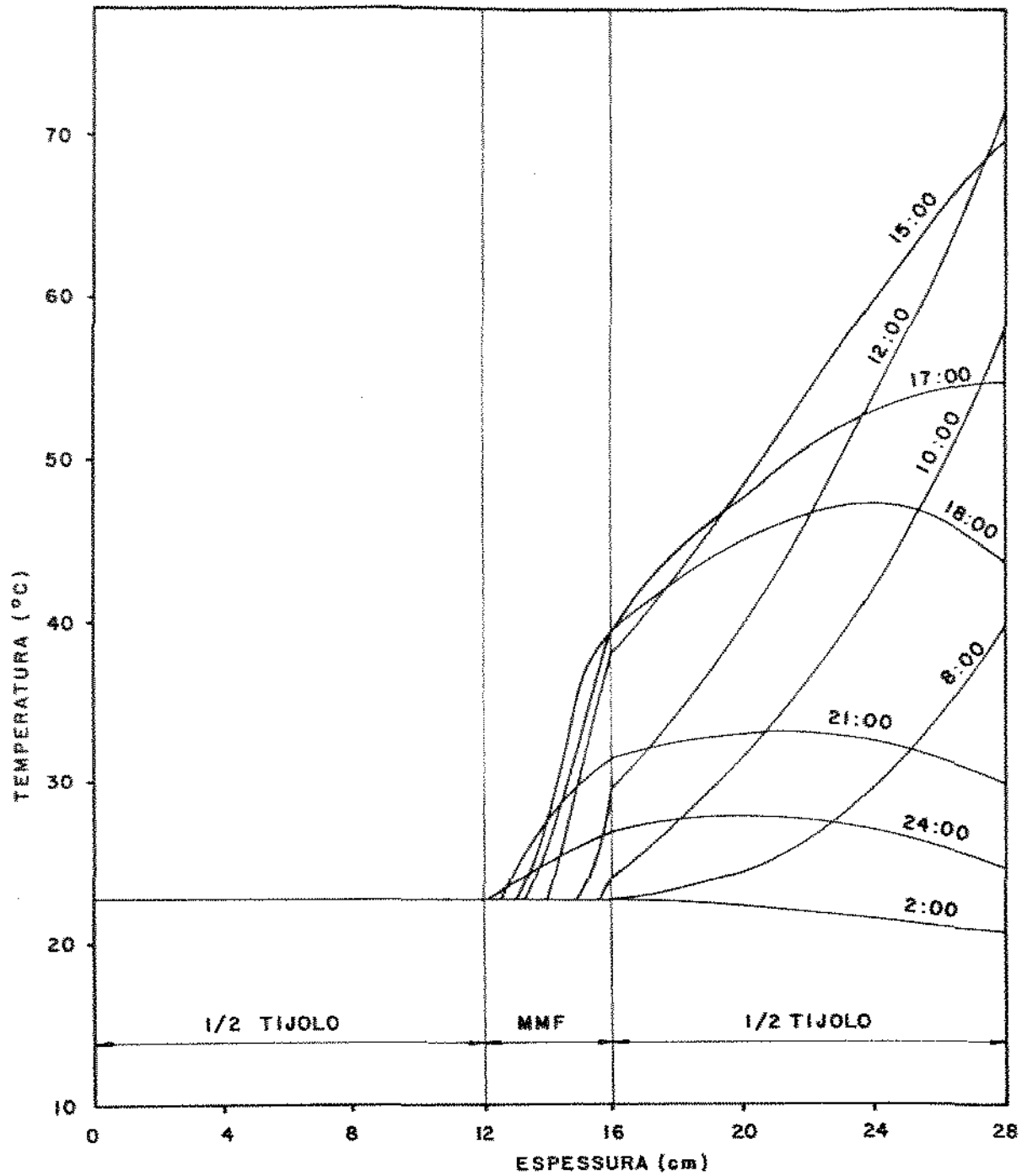


Figura 3.9 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 4,0 cm MMF + 1/2 tijolo, nas várias horas do dia.

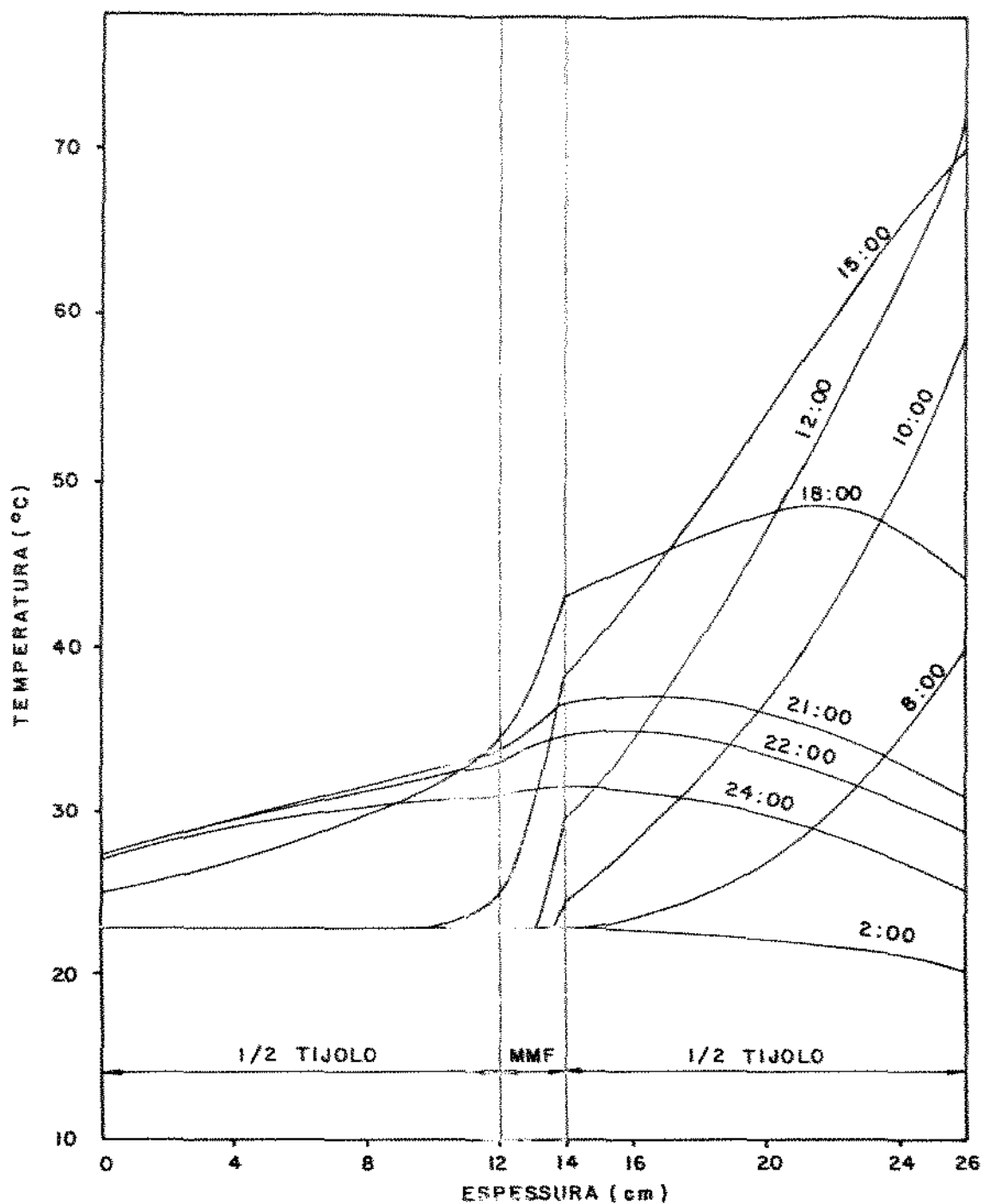


Figura 3.10 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 2,0 cm MMF + 1/2 tijolo, nas várias horas do dia.

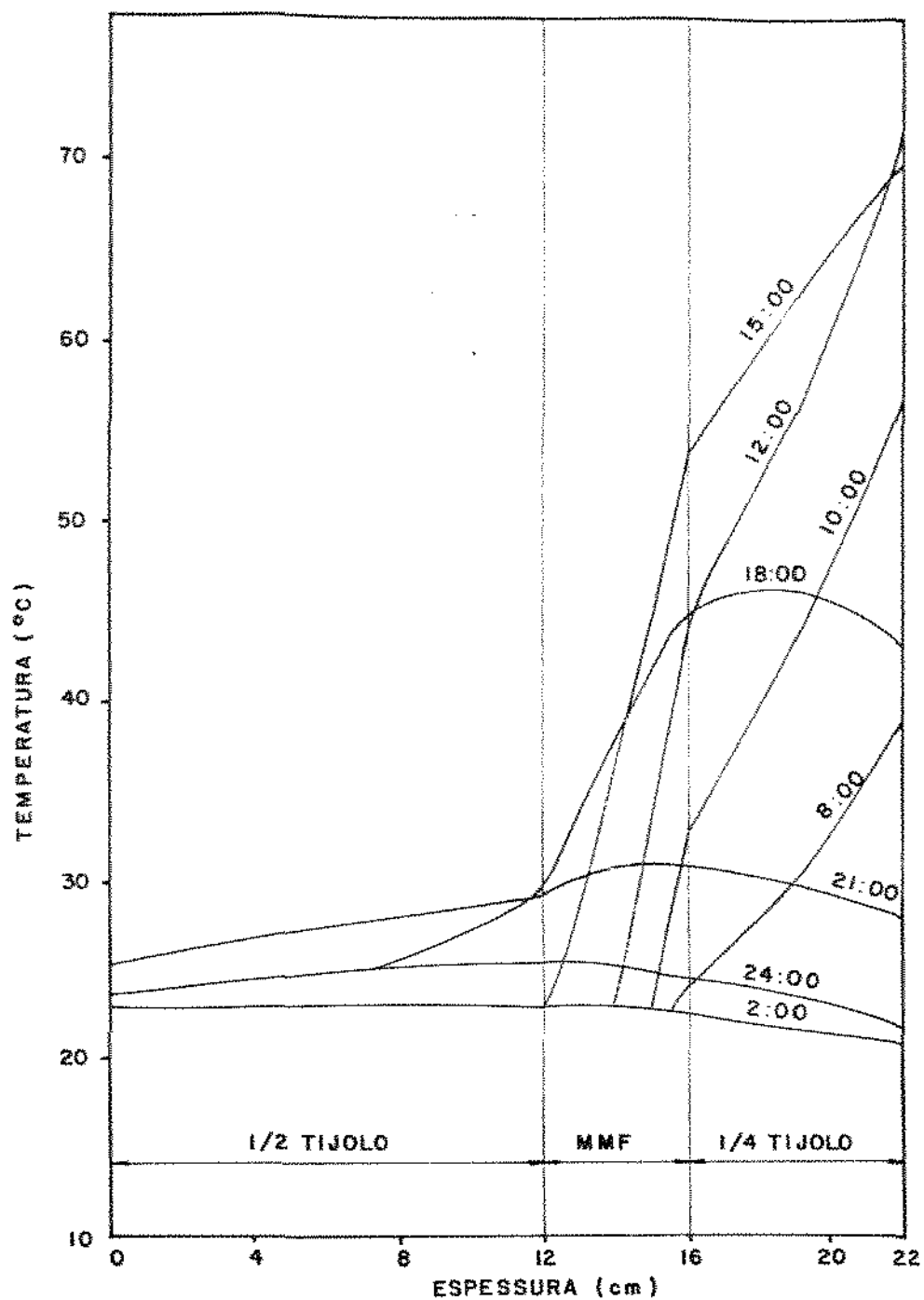


Figura 3.11 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 4,0 cm MMF + 1/4 tijolo, nas várias horas do dia.

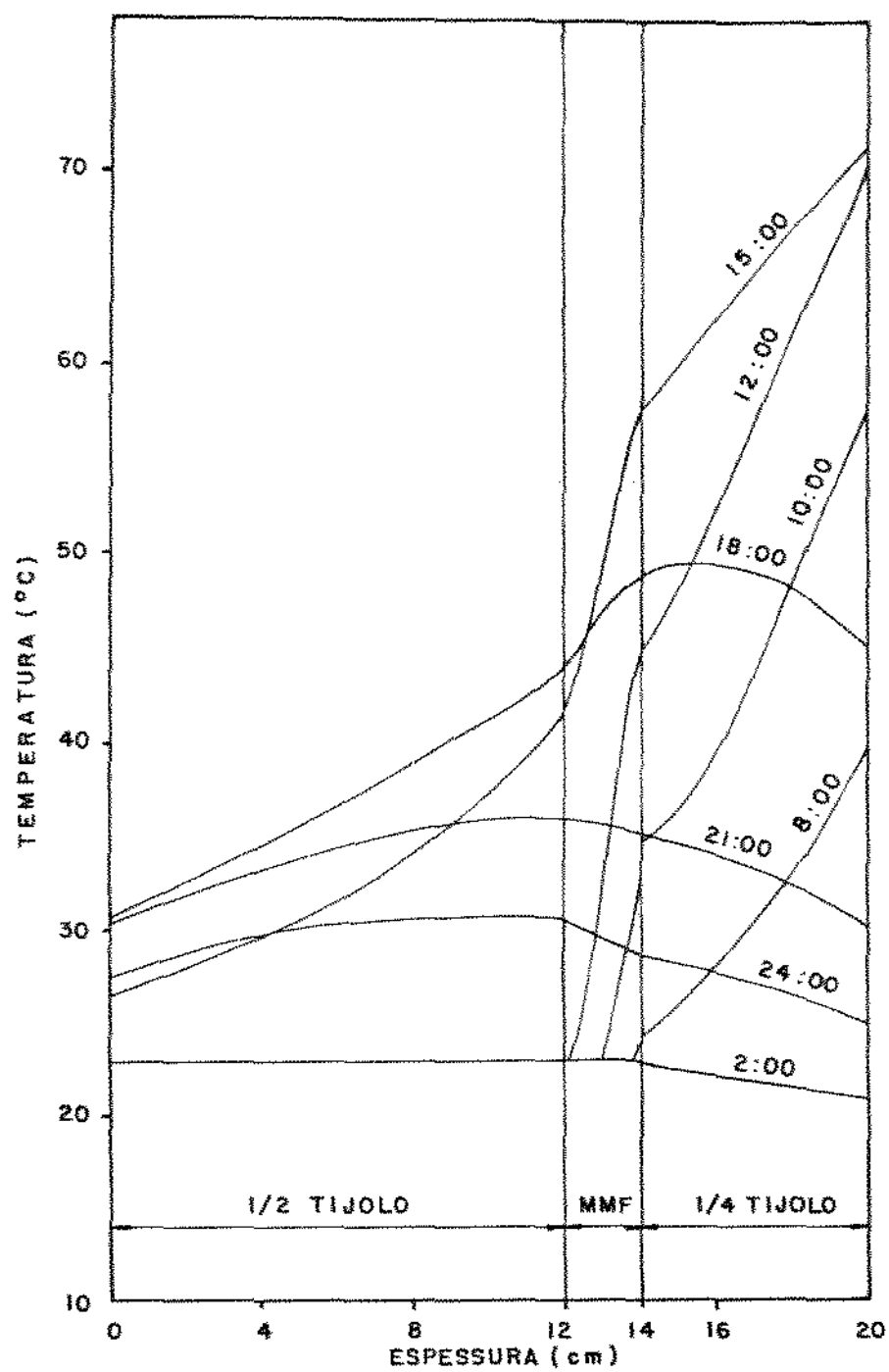


Figura 3.12 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica de 1/2 tijolo + 2,0 cm MMF + 1/4 tijolo, nas várias horas do dia.

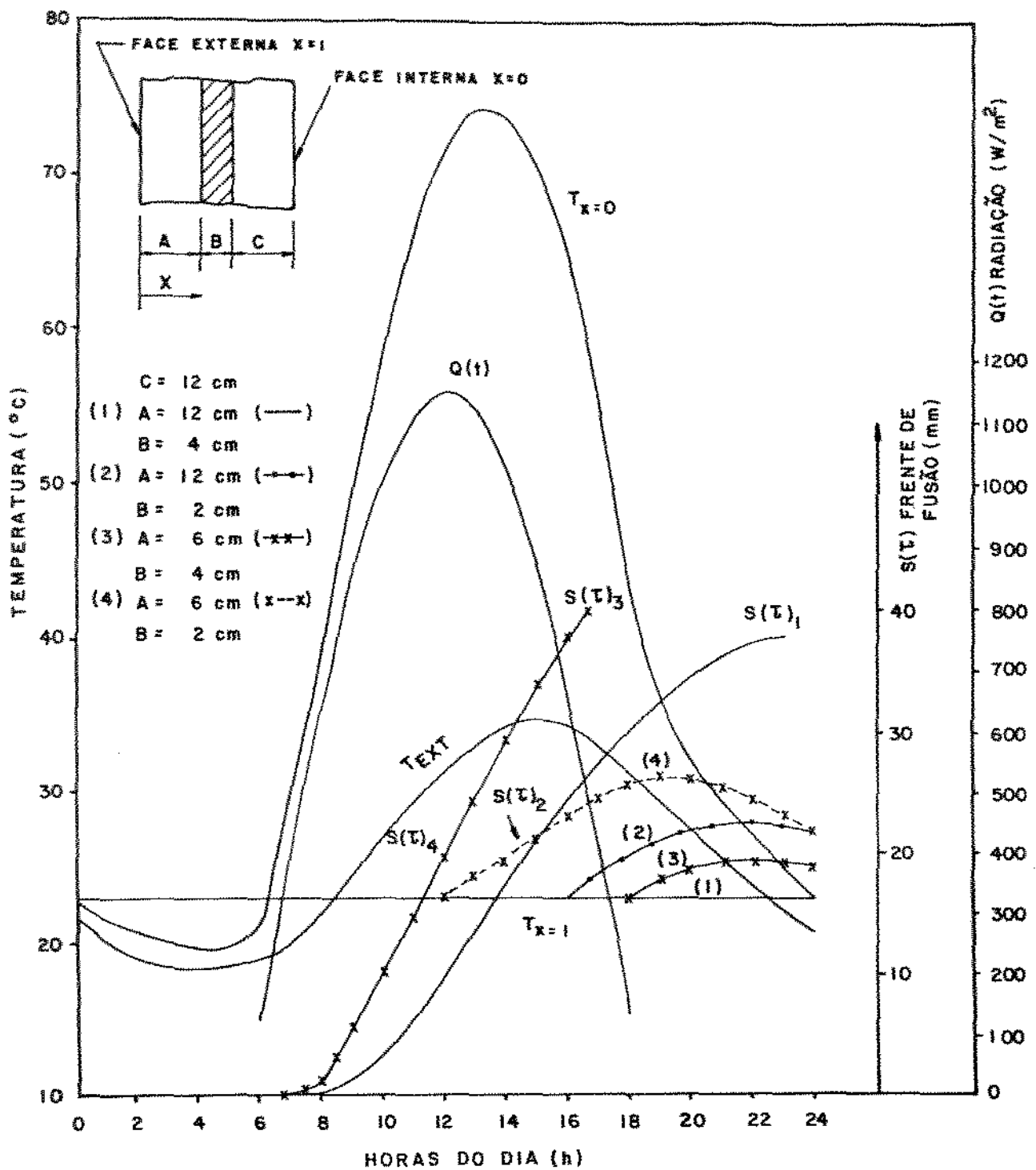


Figura 3.13 - Variação da temperatura na superfície externa ( $T_{x=0}$ ) e interna ( $T_{x=1}$ ) para a parede térmica, variação do avanço da frente de fusão ( $S(t)$ ), radiação solar ( $Q(t)$ ).

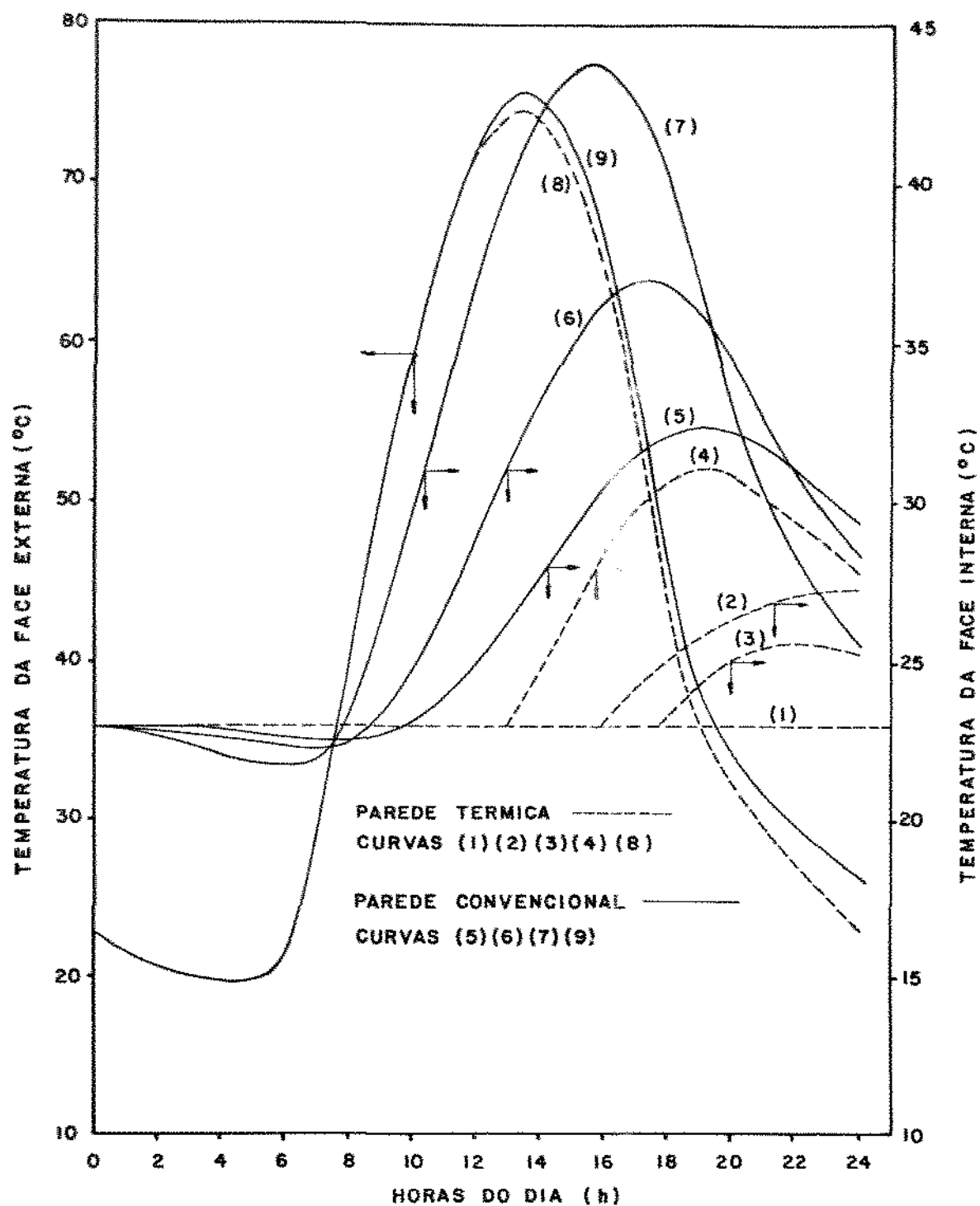


Figura 3.14 - Variação da temperatura na superfície externa (curvas 8 e 9) e superfície interna das paredes convencionais e térmica (curvas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

### 3.4.2. Cobertura

As propriedades termofísicas utilizadas na resolução numérica das equações são as dos materiais normalmente encontrados na literatura. Estes valores estão bem próximos dos valores encontrados na avaliação das propriedades dos materiais utilizados nos modelos experimentais.

#### a) Telha:

Tipo - telha ondulada de fibrocimento

Marca - Eternit

Dimensões: largura = 0,92 m, comprimento = 2,13 m,  
espessura = 6 mm

Referências - [37], [38], [39], [3]

Condutividade Térmica ..... 0,74 W/m °C

Calor específico ..... 816 J/kg °C

Massa específica ..... 2403 kg/m<sup>3</sup>

Emissividade ..... 0,93

#### b) Ar

Adotou-se valores médios, utilizando-se as equações simplificadas para a determinação dos coeficientes convectivo e de transmissão de calor [38], [39].

- condutividade térmica média do ar confi-

nado ..... 0,58 W/m °C

- Calor específico do ar confinado ..... 1006 J/Kg °C

- Massa específica do ar confinado ..... 1,18 Kg/m<sup>3</sup>

- Coeficiente de convecção do ar externo e  
ar interno da sala:

$$h_{EXT} = 13,6 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$h_{INT} = 3,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

c) Laje

Tipo - Prel

|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Espessura .....                   | 10 cm                        |
| Condutividade térmica média ..... | 0,59 W/m $^{\circ}\text{C}$  |
| Calor específico .....            | 160 KJ/kg $^{\circ}\text{C}$ |
| Massa específica .....            | 1050 kg/m <sup>3</sup>       |

d) Material de mudança de fase (é o mesmo do item 3.4.1 (b) da parede térmica)

Com estes valores simulou-se um tipo básico de cobertura convencional (telha, 22 cm ar, Laje)

Para fins de comparação do desempenho térmico escolheu-se duas espessuras para a camada de material de mudança de fase sobre a laje (2,0 cm e 4,0 cm) ficando o conjunto composto de (telha, ar, material de mudança de fase, laje). Para a comparação do desempenho térmico destas coberturas escolheu-se uma condição crítica onde a radiação é igual a radiação total recebida por um plano na horizontal no dia 10 de dezembro, com a correspondente variação da temperatura do ar externo simulados conforme anexos 1 e 3.

Com isto obteve-se os resultados mostrados nas figuras de 3.15 a 3.18. Como nota-se, comparando o grupo de figuras acima, a cobertura sofre uma acentuada alteração quanto ao desempenho térmico, com a colocação da camada de material de mudança de fase. Esta alteração fica bem evidente na figura 3.18 onde, para as

mesmas condições externas, tem-se condições internas diferentes. Nota-se pela tabela 3.2 que a carga térmica fica reduzida a zero para o caso da cobertura térmica, e uma carga térmica de 106,7  $W/m^2$  às 15:00 horas, para a cobertura convencional.

TABELA 3.2 - Carga térmica máxima através do teto convencional e do teto térmico para as condições de simulação.

|         | COBERTURA<br>CONVENCIONAL | cobertura térmica |          |
|---------|---------------------------|-------------------|----------|
|         |                           | 2 cm MMF          | 4 cm MMF |
| $W/m^2$ | 106,7                     | 16,8              | zero     |
| HORA    | 15:00                     | 18:30             | -        |

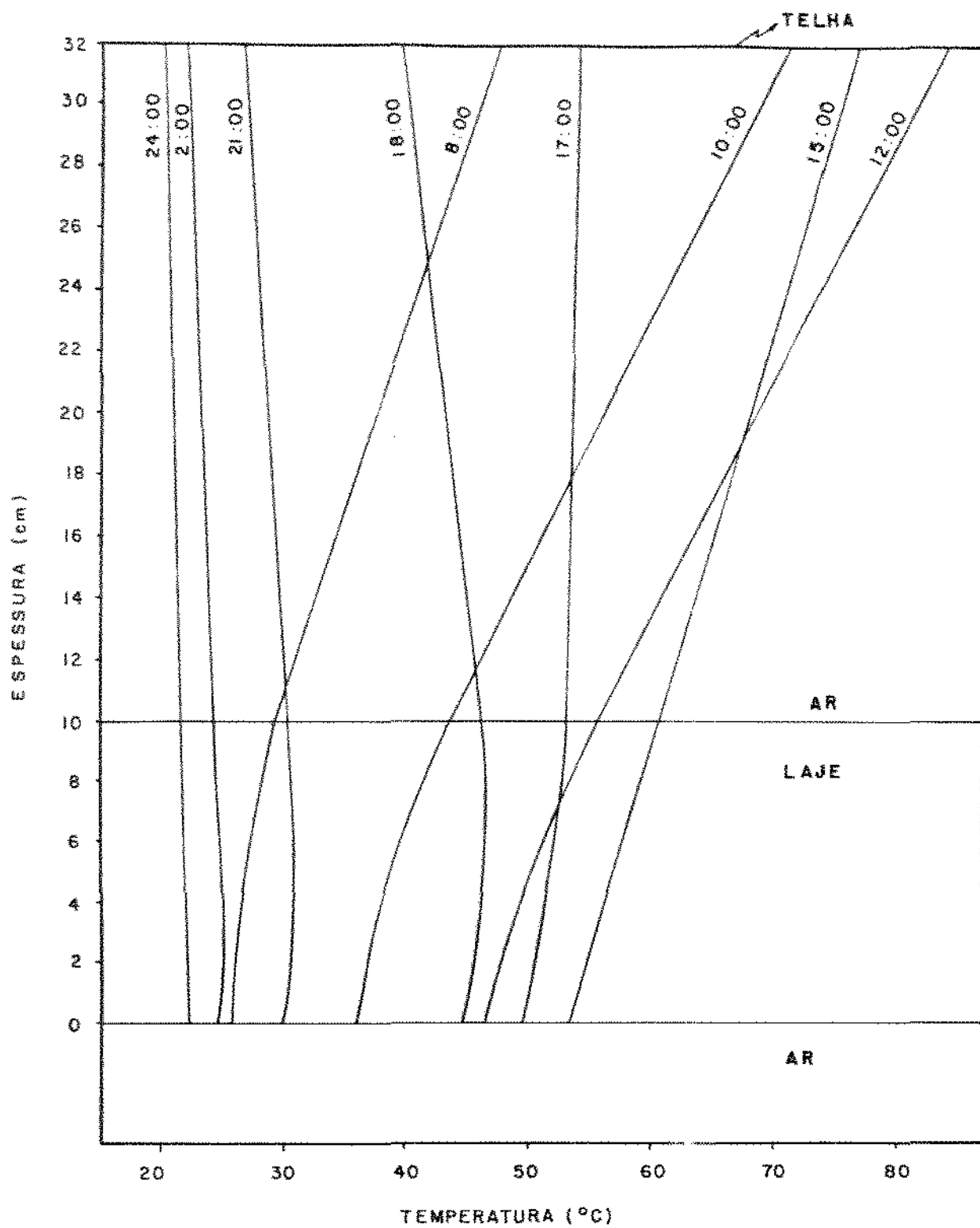


Figura 3.15 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas várias horas do dia.

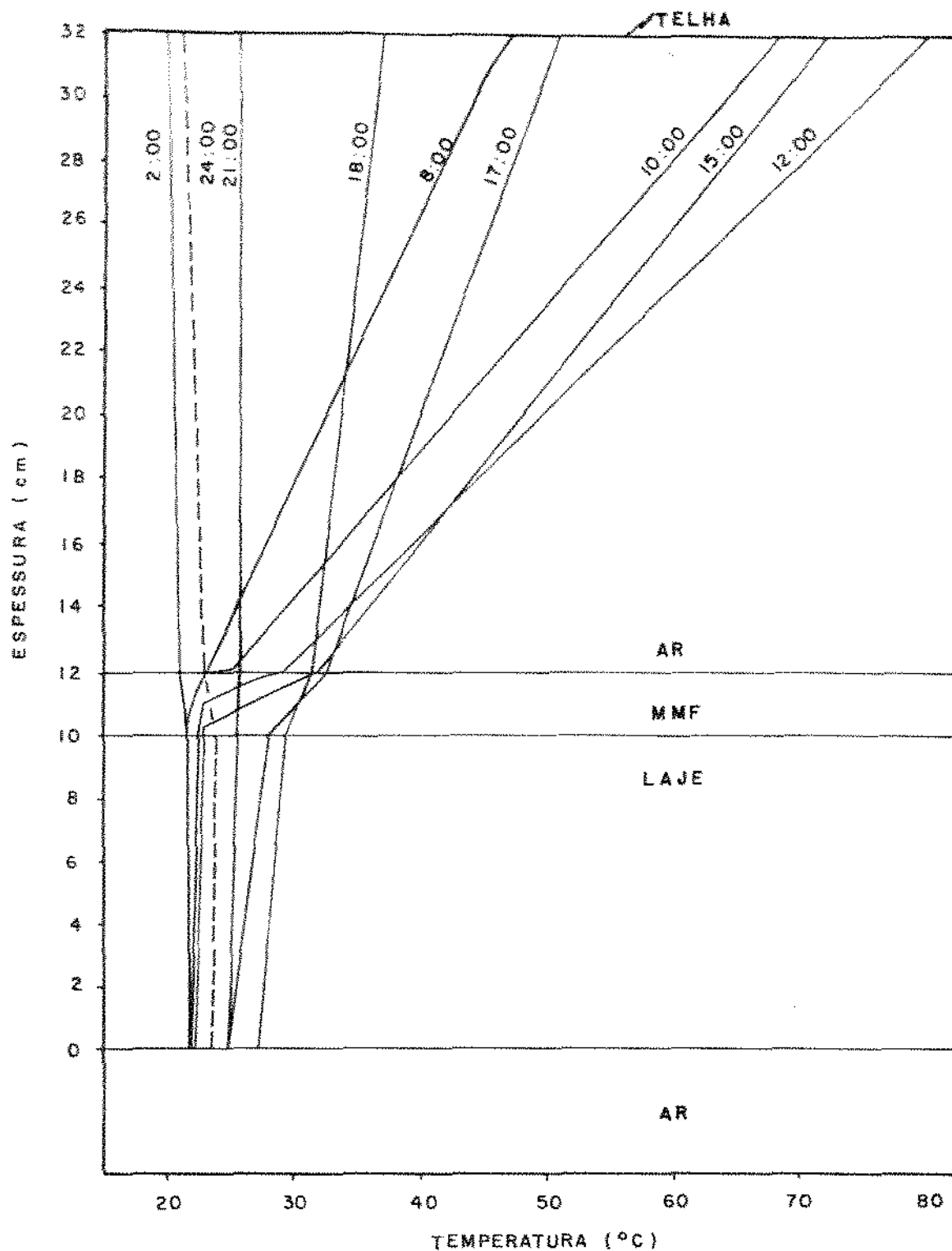


Figura 3.16 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (2 cm de material de mudança de fase).

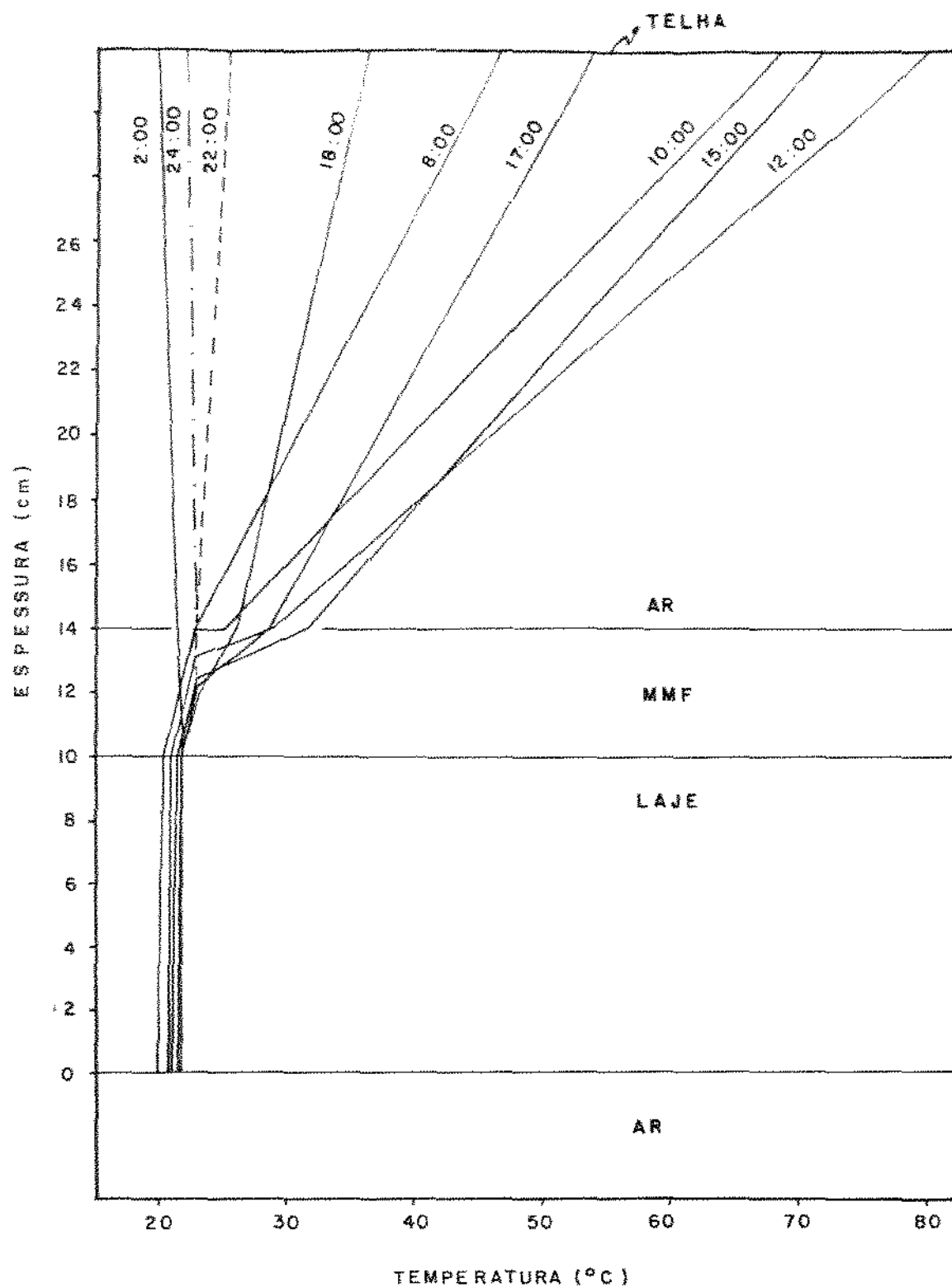


Figura 3.17 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (4 cm de material de mudança de fase).

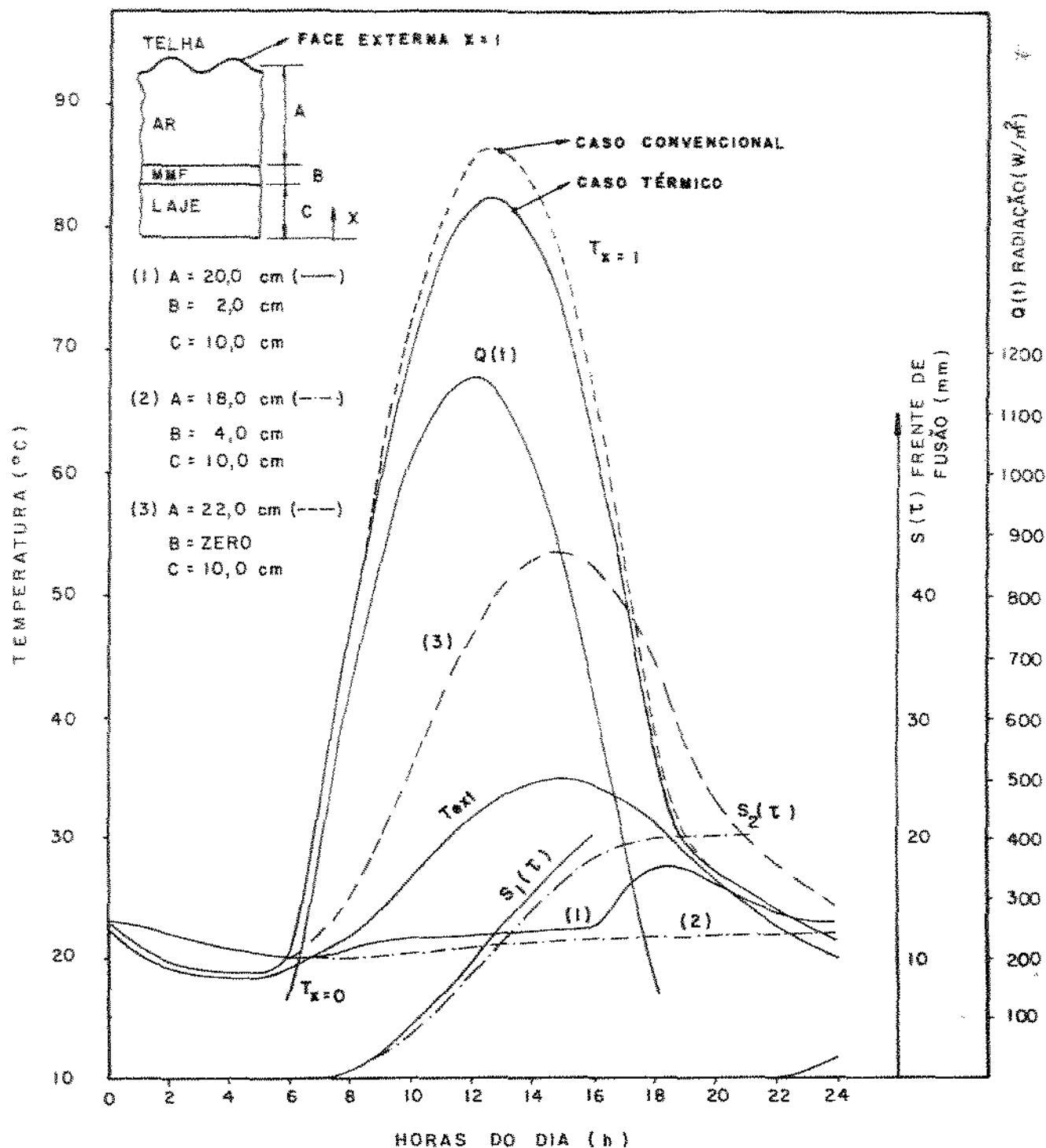


Figura 3.18 - Variação da temperatura da superfície externa ( $T_{x=1}$ ) e interna ( $T_{x=0}$ ) para a cobertura convencional (curva 3) e para a cobertura térmica (curvas 1 e 2), variação do avanço da frente de fusão ( $S(t)$ ), radiação solar ( $Q(t)$ ).

## CAPÍTULO 4

### MODELAGEM FÍSICA E O MÉTODO DE TESTES

#### 4.1. SELEÇÃO E FABRICAÇÃO DO MODELO

A escolha dos materiais para a fabricação dos modelos de teste teve como diretriz principal selecionar dentre aqueles existentes no mercado nacional o, que mais se aproximasse das hipóteses feitas no equacionamento matemático.

O sistema construído está esquematizado da Figura 4.1 que é a representação de um pequeno quarto de 1,25m x 1,80m x 1,70 m. A parede de face norte, e o teto são adequadamente construídos conforme visto na Figura 4.2 a 4.8, de modo a permitir o estudo dos efeitos causados pela colocação da camada de material de mudança de fase. Efeitos estes previamente avaliados em uma pequena caixa termicamente isolada dentro da qual testou-se as paredes aquecidas por resistências elétricas conforme anexo 8.

A cela de teste possui todas as paredes estruturais

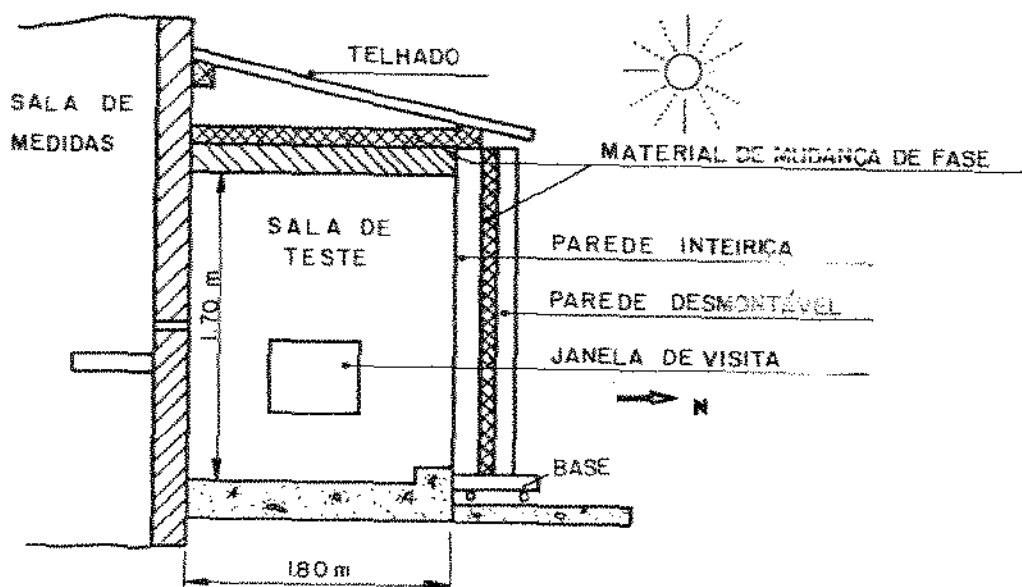


Figura 4.1 - Corte Norte-Sul do Protótipo de Teste.

construídas de blocos de cimento de 20cm x 20cm x 40cm sobre uma base de concreto, e revestidas externamente com placas de isopor de 80 mm recobertas com maderite de 10 mm.

A parede com face norte, foi construída com tijolos comuns (dimensões 20cm x 10cm x 5cm) assentados com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia média peneirada, no traço 1:2:8. Espessura das juntas 1,2 mm. Sem revestimento.

Esta parede foi construída de modo a permitir as seguintes combinações:

- a) Parede convencional de 1/2 tijolo (10 cm de espessura);
- b) Parede convencional de 1/2 tijolo mais 1/2 tijolo (20 cm de espessura);
- c) Parede convencional de 1/2 tijolo mais 1/4 de tijolo (15 cm de espessura);
- d) Parede térmica de 1/2 tijolo mais uma camada de material de mudança de fase mais 1/2 tijolo;
- e) Parede térmica de 1/2 tijolo, mais uma camada de material de mudança de fase, mais 1/4 de tijolo.

Estas combinações são possíveis, devido à construção da parte externa da parede em módulos conforme Figura 4.2 na espessura de 1/2 tijolo de 1/4 de tijolo. Estes módulos são sobrepostos uns aos outros e fixados na parede interna inteiriça, por pinos com porcas, arruelas e cantoneiras de contenção, convenientemente colocados conforme visto na Figura 4.2.

A cobertura foi feita em "uma água", com telhas de fibro-cimento, perfil ondulado, espessura 6 mm, altura 5,1 cm, largura útil de 92 cm, inclinação 10% (mínima para colocação sem cordão de vedação) e fixada em terças de madeira por parafusos e arruelas, conforme visto na figura 4.6.

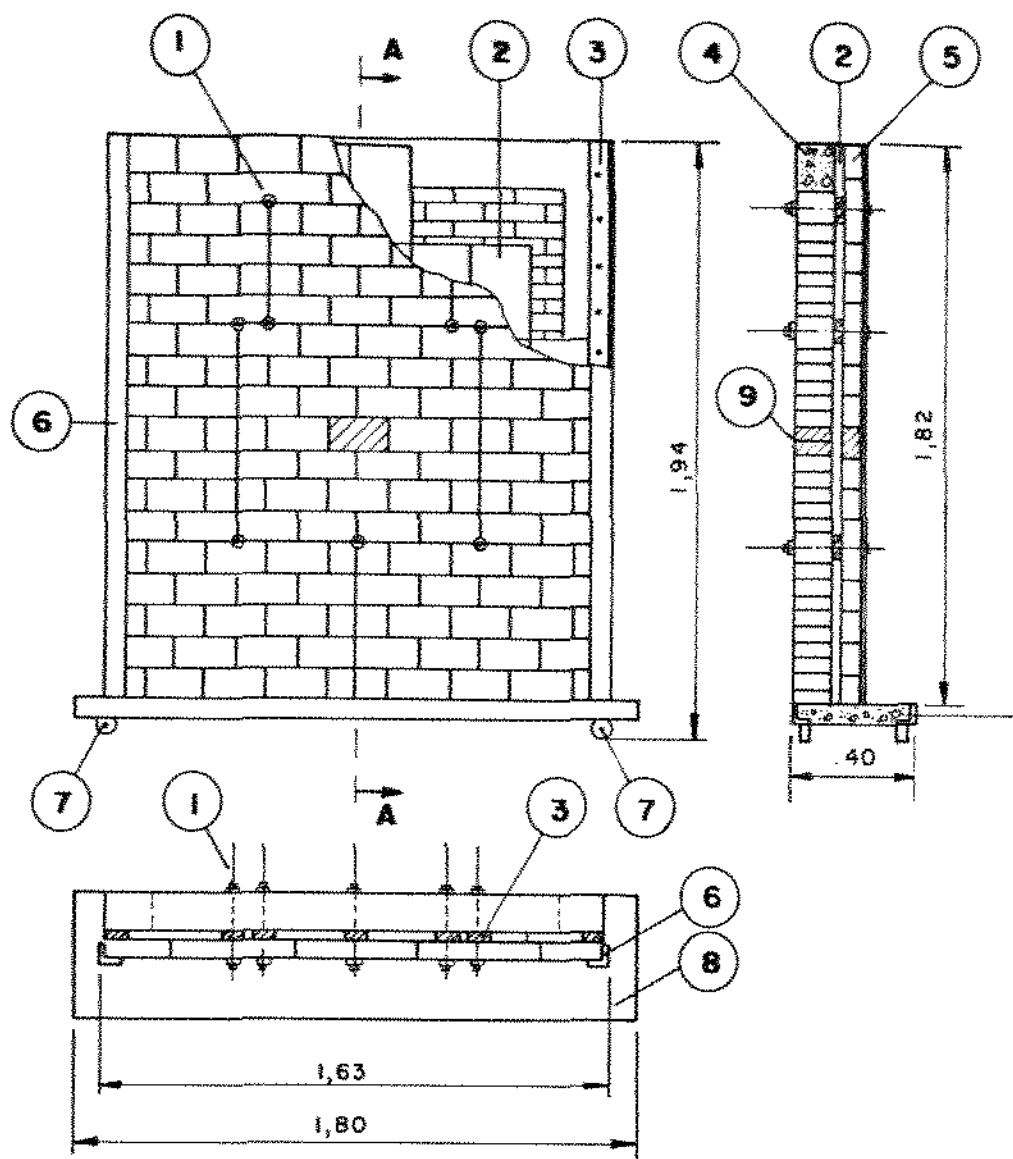
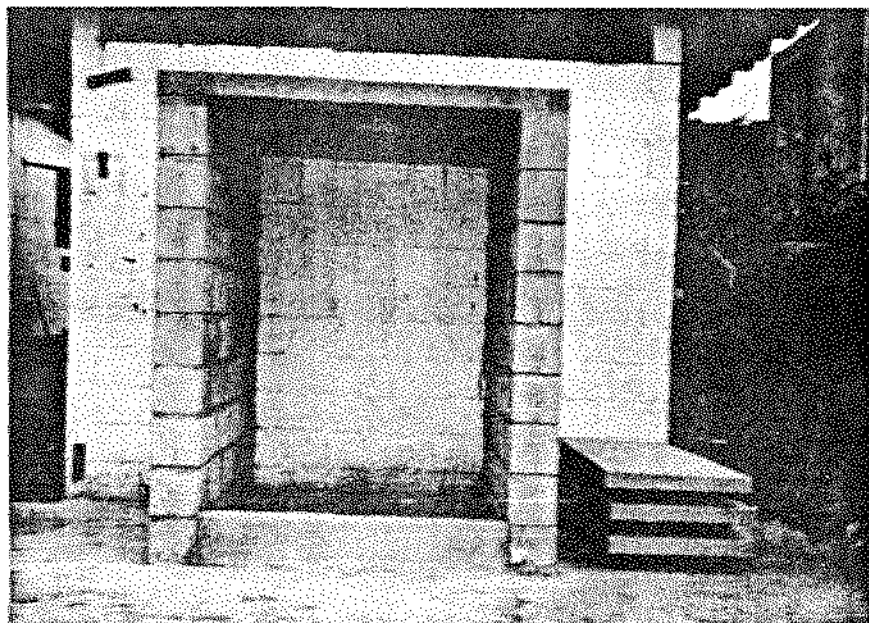


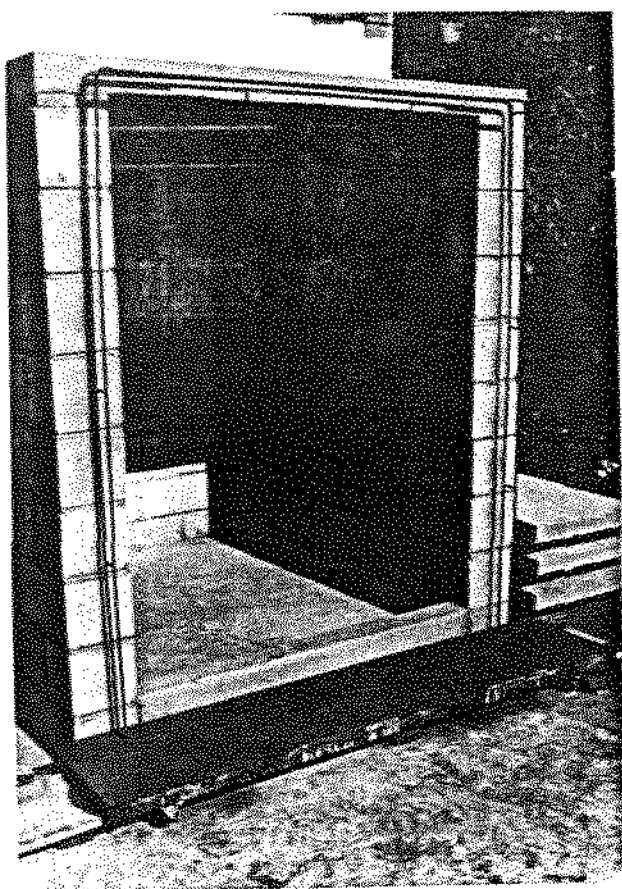
Figura 4.2 - Desenho em escala 1:25 da parede face norte.

- ① Parafuso, porcas e arruelas, ② Material de mudança de fase, ③ Espaçadores, ④ Cinta de concreto da parede interna, ⑤ Parede externa montada em módulos, ⑥ Cantoneiras de contenção, ⑦ Roletes, ⑧ Base, ⑨ Tijolos instrumentados.

A laje é do tipo pré-fabricada para forros, intereixo 41 cm, espessura 10 cm, capeado com 2 cm de concreto no traço 1:2:3 (cimento, areia média, pedra 1).



(a)



(b)

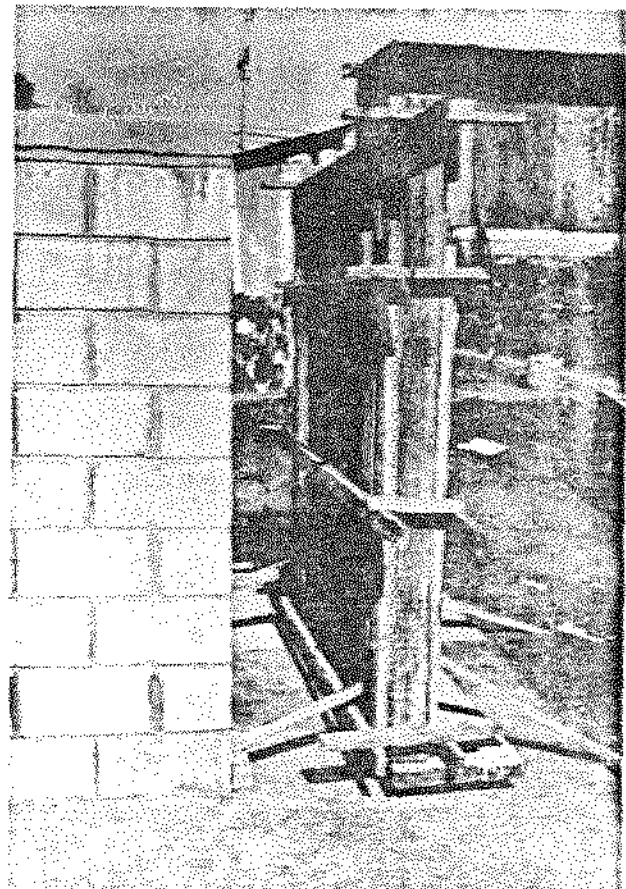


(c)

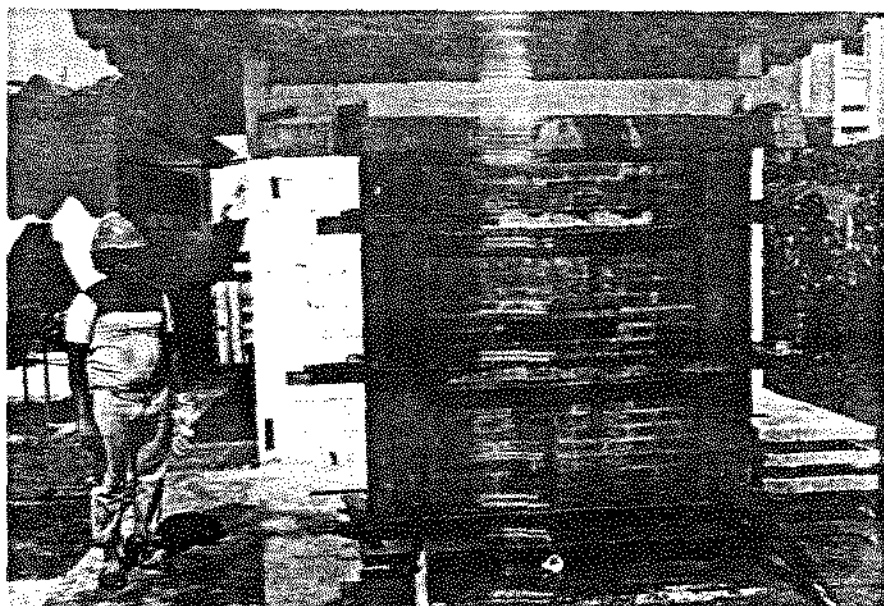
Figura 4.3 - Fotografias dos detalhes da estrutura básica da cela de testes. (a) Paredes laterais e teto, Obs.: Ao fundo sala de medidas, (b) e (c) Detalhes da montagem da parede interna inteiriça.



(a)



(b)

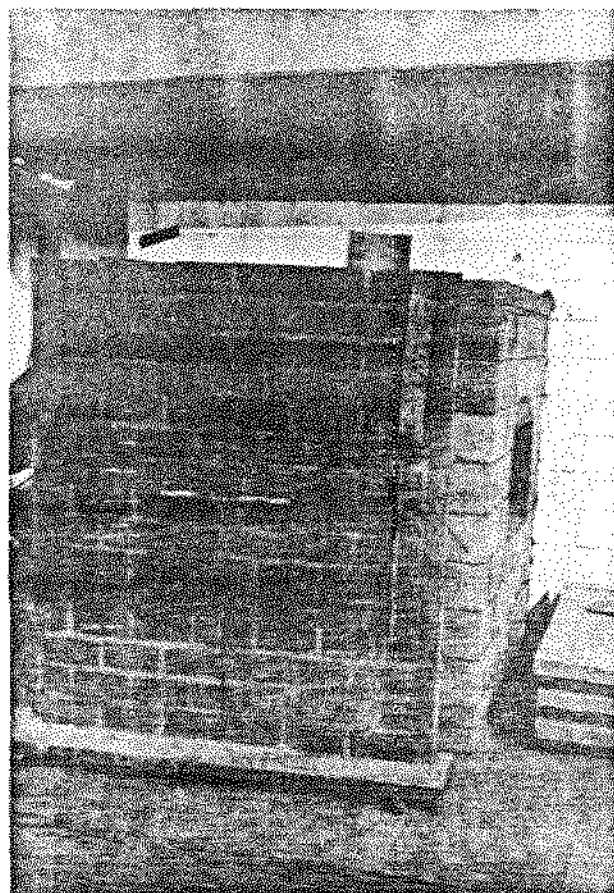


(c)

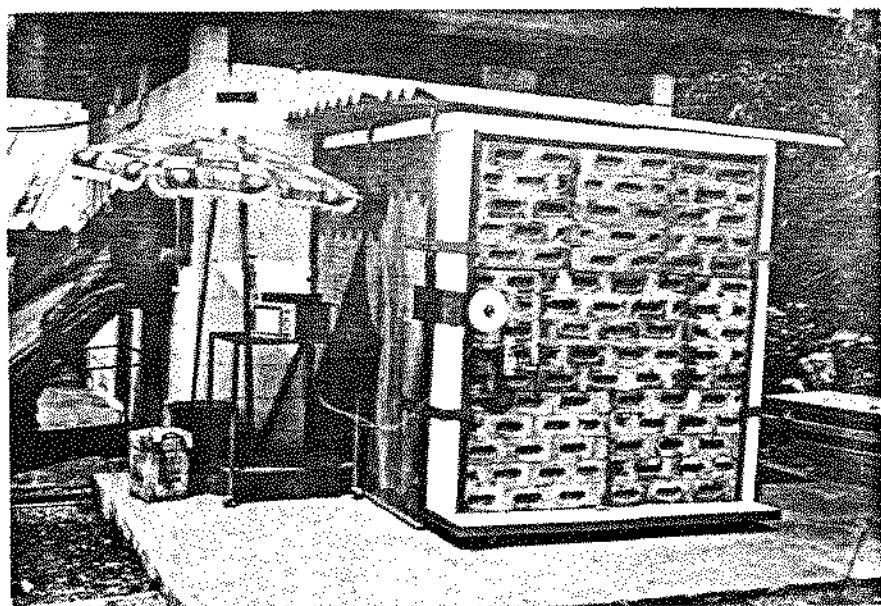
Figura 4.4 - Fotografias dos detalhes construtivo da parede inteiriça (a) Levantamento da parede, (b), e (c) Concretagem das laterais.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 - Fotografias dos detalhes da parede modular (Desmontável) e teste com a parede. (a) e (b) Construção da parede externa em módulos, (c) Parede em teste.

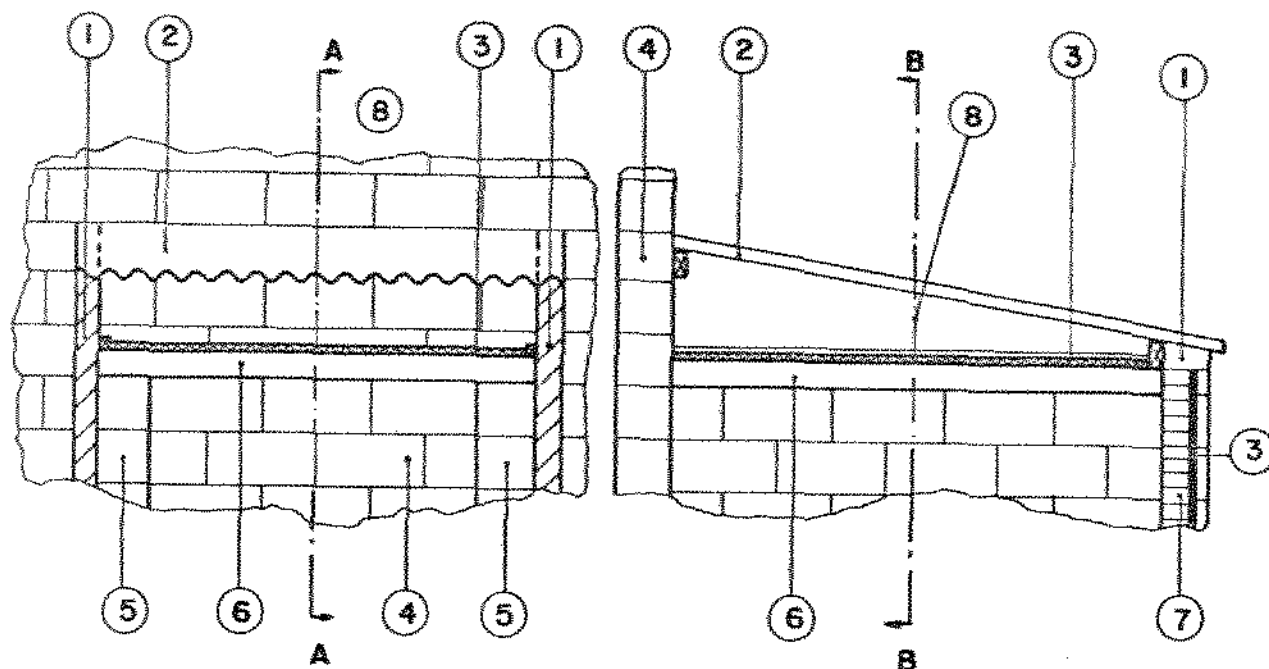


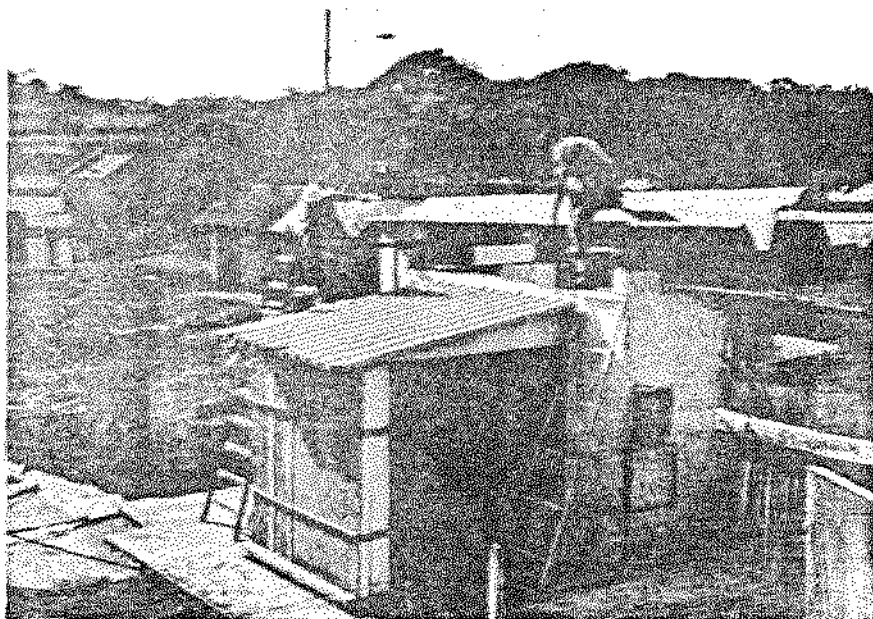
Figura 4.6 - Cobertura (telha de amianto laje do tipo preel).

- ① Placa de isopor, ② Telha fibro cimento, ③ Placa de material de mudança de fase, ④ Parede do fundo da cela, ⑤ Parede lateral, ⑥ Laje de cobertura, ⑦ Parede face norte da cela, ⑧ Região instrumentada.

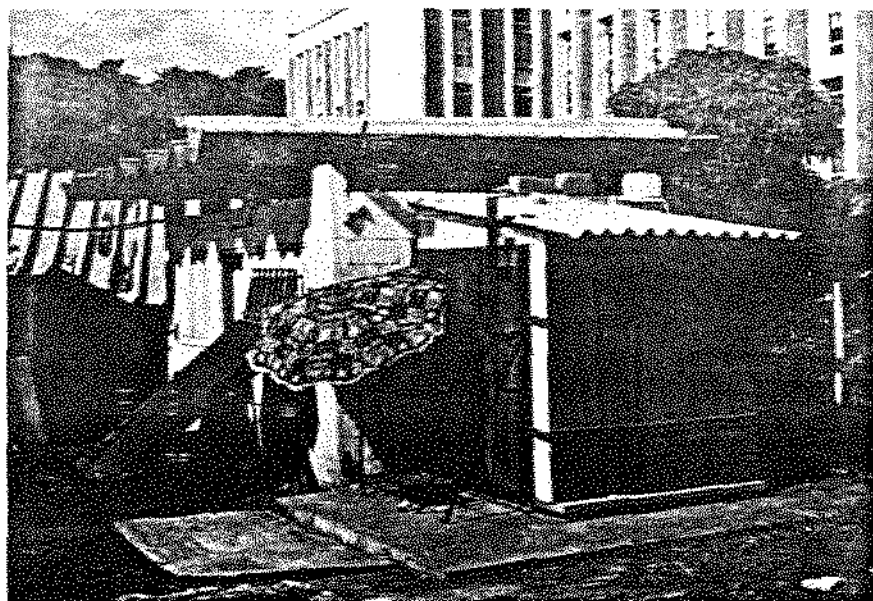
O piso é todo de concreto no traço 1:5:10 (cimento, areia grossa, pedra 4) sarrafada e capeado com 1,0 cm de massa de cimento e areia no traço (1:5).

O material de mudança de fase utilizado é uma mistura de Polietileno-glicol 600 e Polietileno-glicol 1000 (no caso ATPEG 600 em ATPEG 1000 do Grupo Ultra) na proporção de 4:1 em massa, onde o processo de escolha é descrito no Anexo 9.

Como não existem valores conhecidos das propriedades

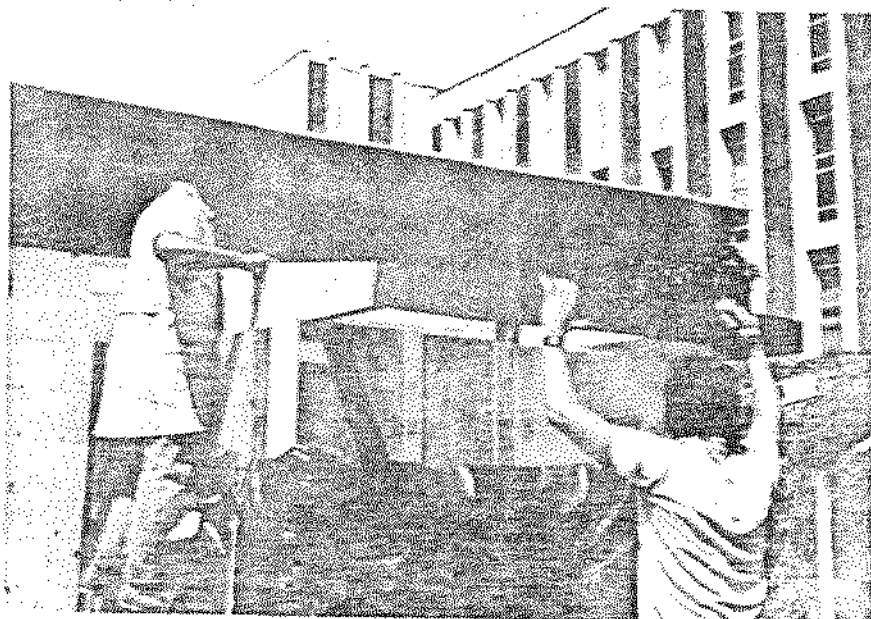


(a)



(b)

Figura 4.7 - Fotografias dos detalhes do teste da cobertura, (a) Retirada do beiral da sala de medidas para eliminar o sombreamento, (b) Cobertura em teste.



(a)



(b)

Figura 4.8 - Fotografias dos detalhes construtivo da cobertura.  
(a) Estrutura da telha, (b) Colocação da telha.

termofísica deste material, as mesmas foram levantadas nos laboratórios da UNICAMP conforme descrito no anexo B,

Este material apresentou as seguintes propriedades:

|                                    |   |              |
|------------------------------------|---|--------------|
| Calor latente de fusão             | = | 150,5 kJ/kg  |
| Calor específico do sólido (20°C)  | = | 1,64 kJ/kg°C |
| Calor específico do líquido (40°C) | = | 1,67 kJ/kg°C |
| Temperatura de mudança de fase     | = | 23 ± 2,5°C   |
| Massa específica do sólido (20°C)  | = | 1135,4 kg/m³ |
| Massa específica do líquido (40°C) | = | 1118,1 kg/m³ |
| Condutividade Térmica (44°C)       | = | 0,53 W/m °C  |

Para construir placas deste material, o mesmo foi acondicionado quando líquido, dentro de sacos plásticos previamente colocados dentro de formas (Fig. 4.9 e 4.10). Aguardava-se a total solidificação após a qual retirava-se o conjunto que era armazenado dentro de geladeira.

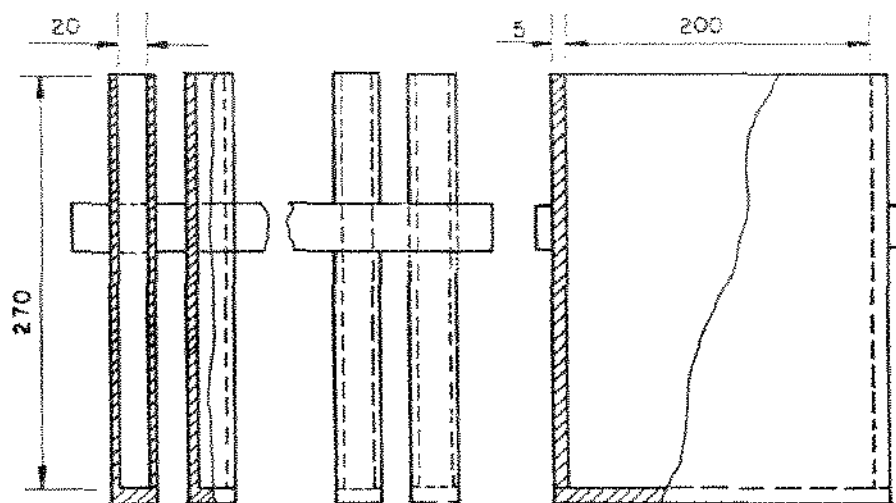
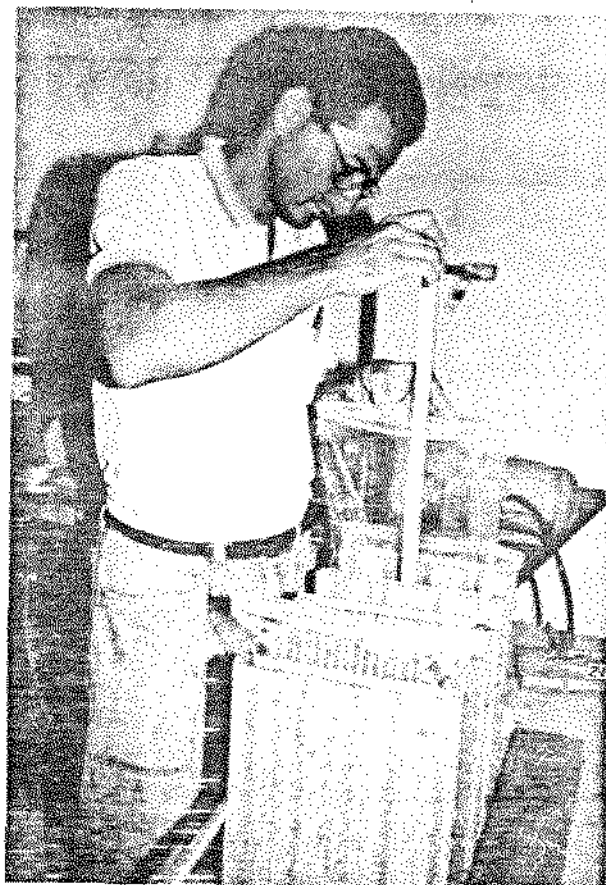


Figura 4.9 - Conjunto de doze formas de madeira.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Fotografia dos detalhes da construção das placas de material de mudança de fase, (a) Formas recebendo os sacos plásticos, (b) Enchimento das formas, já com os sacos plásticos, com material de mudança de fase, na fase líquida.

A embalagem plástica utilizada foi a marca comercial "ZIP" devido a facilidade de lacramento. O conjunto de formas é o mostrado nas Figuras 4.9 e 4.10 obtendo-se placas na configuração vista na Figura 4.11.

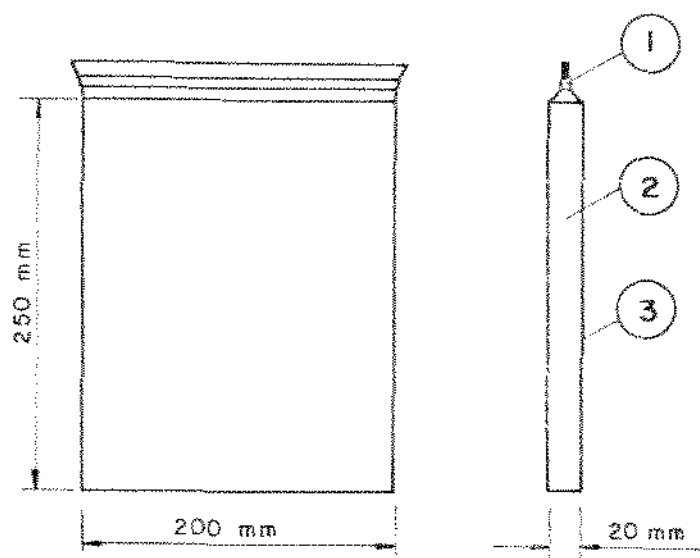


Figura 4.11 - Placas de material de mudança de fase (① lacre, ② material de mudança de fase, ③ sacos plásticos).

#### 4.2. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIDAS DE TEMPERATURA DO MODELO

Para verificar a distribuição da temperatura no interior da cela de testes e principalmente na superfície e no interior da parede térmica, foram alocados um conjunto de sensores para o levantamento do campo térmico conforme segue:

##### a) Parede com face Norte

Por se tratar da parede onde se efetuam as modificações propostas, tomou-se um redobrado cuidado na instrumentação. Escolheu-se a região central da parede (conforme Figura 4.2), com

o objetivo de se minimizar o efeito de borda e transversalmente a esta, ou seja, ao longo da espessura, nos tijolos e no material de mudança de fase (quando presente), instalou-se o conjunto de sensores conforme visto na Figura 4.12.

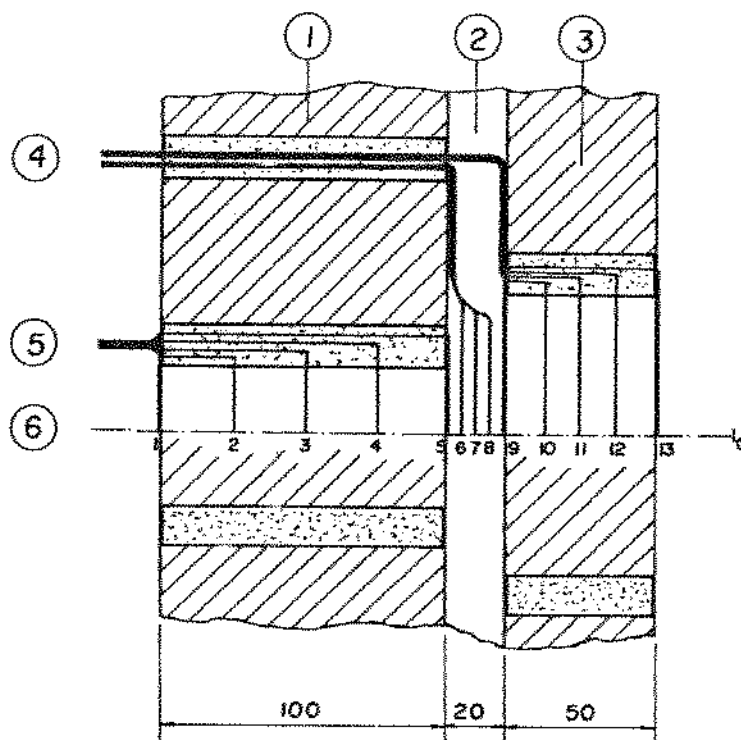


Figura 4.12 - Detalhe em corte transversal da parede térmica com a distribuição dos pontos de tomada de temperaturas.

- ① Parede interna ( $1/2$  tijolo);
- ② Camada de material de mudança de fase;
- ③ Parede externa ( $1/4$  tijolo);
- ④ Chicote de extensão dos termopares do material de mudança de fase e parede externa;
- ⑤ Chicote de extensão dos termopares da parede interna e
- ⑥ Linha de centro geométrico da parede térmica.

Estes conjuntos de pontos sensores foram introduzidos em furos de 3,0 mm de diâmetro abertos nos tijolos.

Durante a instrumentação dos modelos, os pontos sensores receberam uma determinada quantidade de pasta de contato térmico, para que se melhorassem as condições de aderência e foram amarradas externamente ao tijolo por cordões de amianto antes do seu assentamento definitivo na parede.

Na parede interna (Figura 4.2) tomou-se cuidado, deixaram-se furos (tubos de plásticos de 5,0 mm de diâmetro) para que fosse possível a passagem dos fios dos sensores do material de mudança de fase e da parede desmontável (ver Figura 4.1, 4.2 e 4.12). O conjunto de extensões destes sensores formam um "chicote" que através de um furo na parede do fundo da cela chegam até a sala de medidas onde são conectados a uma chave seletora de canais e esta por sua vez ligado ao milivoltímetro.

#### b) Cobertura (Teto-Laje)

Aqui também, tomou-se redobrado cuidado com a instrumentação pois são efetuadas as modificações propostas, sendo o material de mudança de fase disposto sobre a laje.

Para se eliminar o máximo possível o efeito de borda, aqui também tomou-se a região central da cobertura (Figura 4.6).

Como a laje adotada foi a do tipo prel composta basicamente de vigotas com tabelas e o conjunto recoberto com uma camada de concreto, tomou-se cuidado de se tomar leituras de temperaturas médias entre as vigotas e as tabelas ou seja entre os pontos (1) e (3) e pontos (2) e (4) conforme esquematizado nas Figuras 4.13 e 4.14.

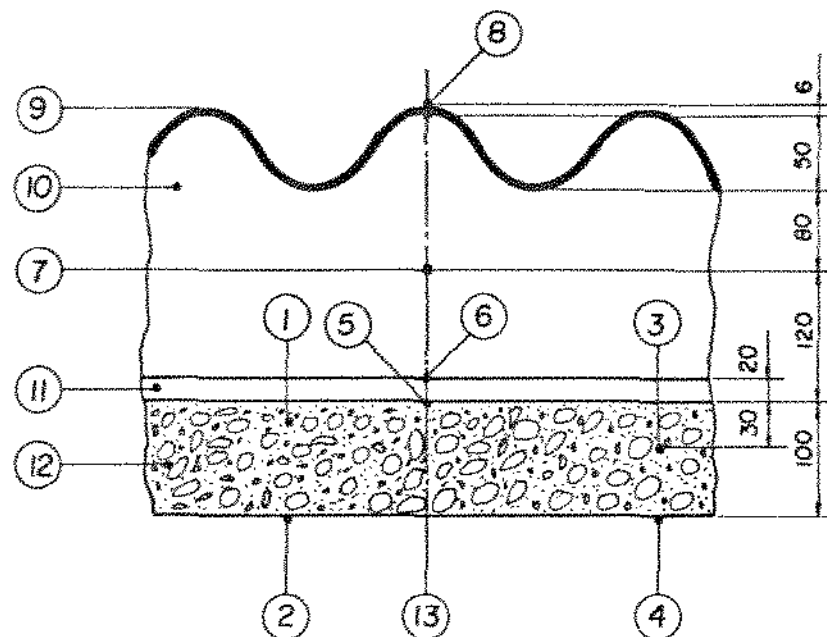


Figura 4.13 - Corte transversal da cobertura com material de mudança de fase. (1) Termopar entre a camada de concreto e a vigota; (2) Termopar parte inferior da vigota; (3) Termopar entre a camada de concreto e a tavela; (4) Termopar na parte interior da tavela; (5) Termopar em cima da camada de concreto; (6) Termopar em cima da camada de material de mudança de fase; (7) Termopar no ponto médio da camada de ar; (8) Par de termopar na superfície superior e na inferior da telha; (9) Telha; (10) Ar; (11) Material de mudança de fase; (12) Laje; (13) Linha do centro geométrico da cobertura).

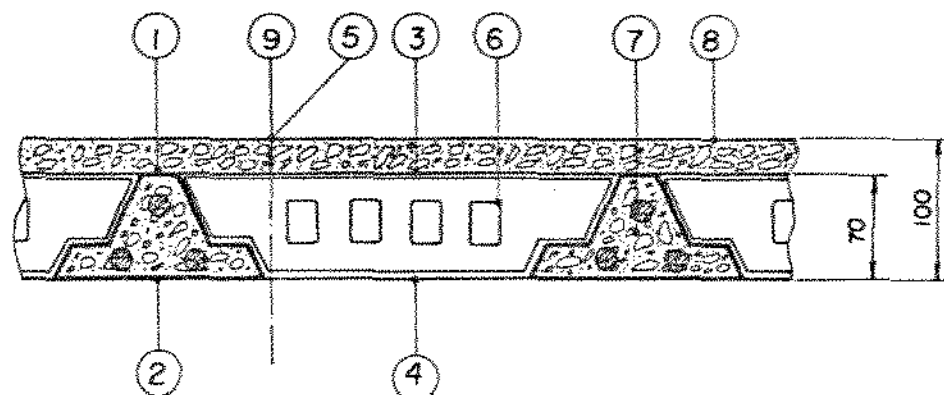


Figura 4.14 - Detalhe esquemático dos pontos de tomada de temperatura na laje de cobertura. ① Ponto entre a camada de concreto e a vigota; ② Ponto na parte inferior da vigota; ③ Ponto entre a camada de concreto e a tavela; ④ Ponto parte inferior da tavela; ⑤ Ponto na superfície superior da camada de concreto; ⑥ Tavela; ⑦ Vigotas; ⑧ Cobertura de concreto; e ⑨ Linha do centro geométrico da cobertura.

#### c) Parede do fundo e paredes laterais da cela

Como o objetivo neste caso é uma avaliação do fluxo de calor nestas paredes, utilizaram-se pares de termopares colocados um na face externa e outro na face interna de cada parede.

#### d) Ar ambiente externo e ar do ambiente interno da cela

A temperatura do ar externo foi obtida pela leitura de um termômetro de mercúrio de haste e bulbo de vidro com precisão de 0,1 °C, marca Incoterm e nº 10607 colocado na sala de medidas à sombra e ventilado.

A temperatura do ar interior da cela foi obtida por um termopar colocado na região central da cela de testes.

#### 4.3. SELEÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE TEMPERATURA, DE RADIAÇÃO SOLAR E VELOCIDADE DO VENTO

##### a) Medição de temperatura

Para a faixa de temperatura dos testes (10 e 80 °C) foram selecionados termopares entre aqueles disponíveis no laboratório. No caso da parede térmica, da cobertura e tomada de temperatura do interior da cela de testes, o termopar escolhido foi o do tipo (Cromel Alumel) AWG 20. Já para as paredes laterais e a parede do fundo da cela escolheram-se termopares do tipo J (Ferro-Costantan) AWG 20.

Estes termopares foram calibrados com o auxílio de um termômetro de mercúrio de haste e bulbo de vidro com precisão de 0,1 °C, marca Incotherm nº 10607, em uma aparelhagem específica para este fim, conforme recomenda a ASTM [20] e Benedict[21].

Os termopares foram calibrados individualmente utilizando-se o método decrescente de variação de temperatura, um seletor de canais e um milivoltímetro da marca Fluke (2150A -Multipont). O mesmo aparelho foi utilizado posteriormente nas leituras do termopar.

##### b) Medição de radiação

A intensidade de radiação foi medida por um radiômetro EPPLEY, modelo PSP, colocado em um suporte especialmente construído para acoplar este medidor à cela de testes. Para o registro do sinal utilizou-se um registrador gráfico HP modelo 7155B, de forma contínua, conforme visto na Figura 4.15.

### c) Velocidade do vento

Mediu-se a velocidade do vento através de um anemômetro do tipo turbina marca COLLE-PARMER, modelo 1717 com saída digital.

## 4.4. PROCEDIMENTO DE TESTES

### 4.4.1. Cella de testes

Por motivos de custos optou-se por testes em uma única cela. Para tanto foi necessário torná-la capaz de sofrer as modificações previstas.

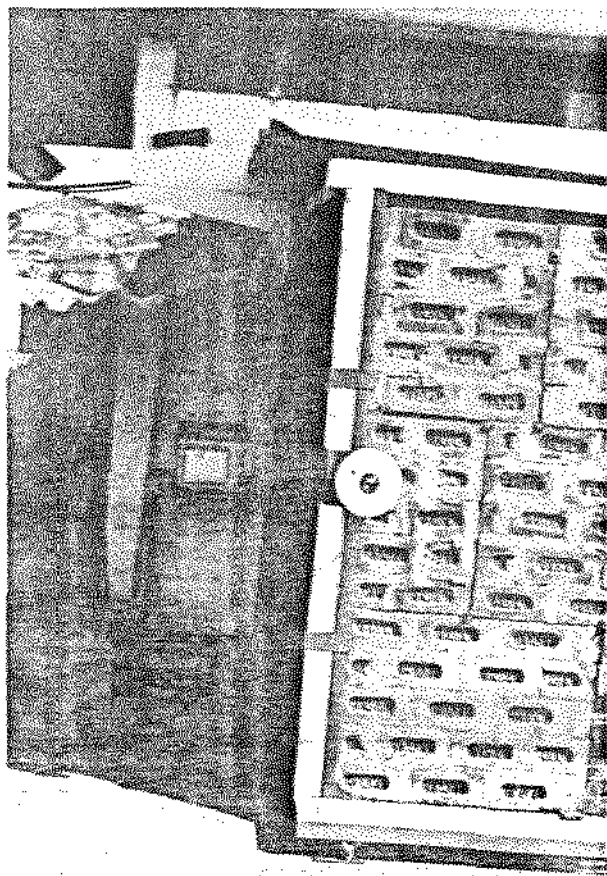
A solução foi a adoção de uma parede interna maciça e uma parede exterior em módulos conforme visto e detalhado nas Figuras 4.1 e 4.2. Já para a cobertura optou-se por um forro de laje com telhas de cimento amianto montada de forma a permitir a colocação e retirada de uma camada de material de mudança de fase, conforme mostrado nas Figuras 4.1 e 4.6.

### 4.4.2. O método dos testes

Como a cela de testes é única dividiram-se os testes em dois grupos básicos: o primeiro foi a cela sem o material de mudança de fase e o segundo foi a cela com o material de mudança de fase.

Estes grupos foram subdivididos em três tipos de testes:

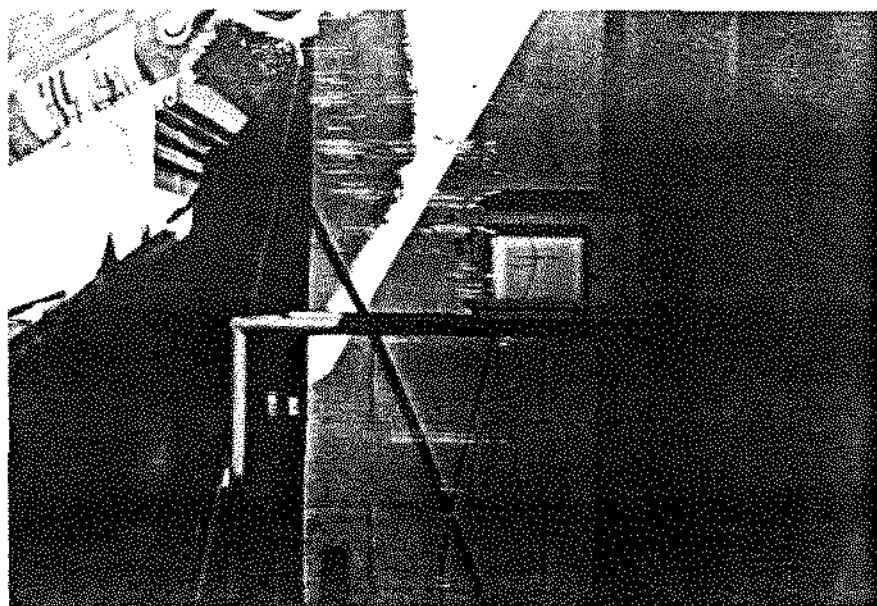
- (1) Teste só da cobertura
- (2) Teste só da parede face norte
- (3) Teste do conjunto cobertura e parede face norte



(a)

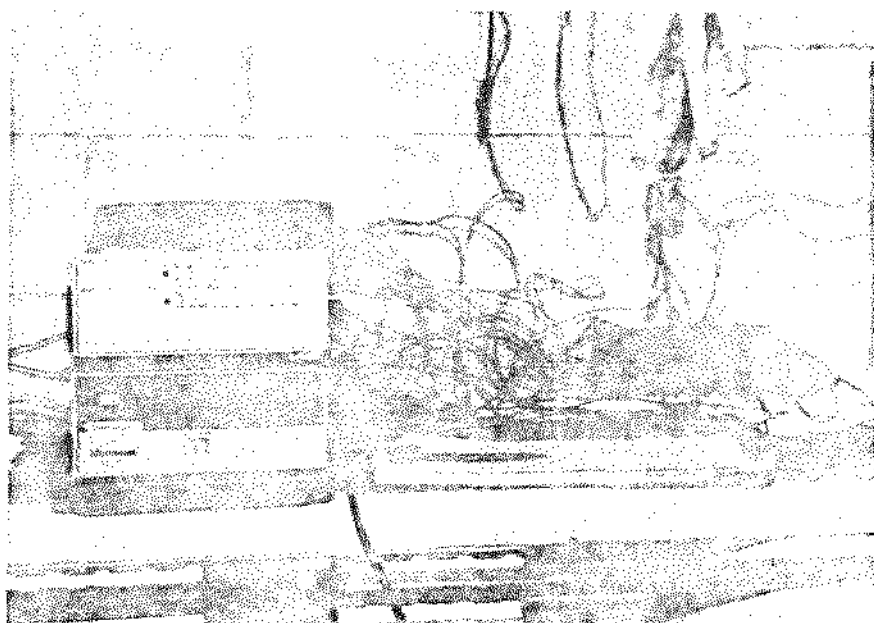


(b)

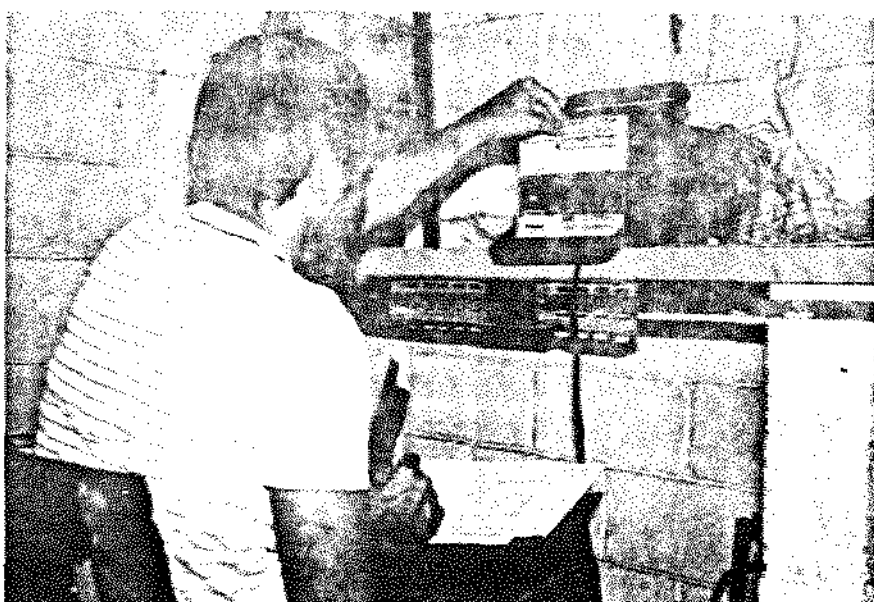


(c)

Figura 4.15 - Fotografias dos detalhes da leitura da radiação solar, (a) Parede, (b) Cobertura e (c) Registrador gráfico.



(a)



(b)

Figura 4.16 - Fotografia dos detalhes da tomada de temperatura  
(a) Seletor de canais com o termômetro digital,  
(b) Leitura típica.

Este procedimento gerou seis tipos distintos de testes:

1. Testes isolados:
  - 1.1. Cobertura sem material de mudança de fase
  - 1.2. Cobertura com material de mudança de fase
  - 1.3. Parede face norte sem material de mudança de fase
  - 1.4. Parede face norte com material de mudança de fase.
2. Teste conjunto
  - 2.1. Cobertura e parede face norte sem material de mudança de fase
  - 2.2. Cobertura e parede face norte com material de mudança de fase.

Nos testes isolados tanto da cobertura quanto da parede mantinha-se o lado não em teste recoberto com uma grossa camada de isopor (80 mm), sustentada por uma chapa de maderit de 10mm.

Os testes foram todos preparados um dia antes do dia de leituras. Primeiro: para que a cela entrasse em regime normal de insolação e resfriamento noturno. Segundo: por questões de segurança já que a mesma ficava em campo aberto. Para tanto, no dia que antecedia à leitura, tirava-se logo pela manhã o plástico de cobertura e proteção da cela e preparava-se a parede e/ou a cobertura para os testes. Conectavam-se os terminais dos termopares à chave seletora de canais e instalava-se o suporte do solarímetro.

Pela madrugada do dia de leitura, terminava-se a montagem conectando-se o milivoltímetro e instalando-se o radiômetro com o respectivo registrador gráfico.

Após ligar os aparelhos esperavam-se 30 minutos (mais ou menos) para o início das leituras.

A leitura da temperatura era feita visualmente de meia em meia hora Figura 4.16 e os resultados anotados em uma planilha. Esta operação demorava de um minuto e meio a dois minutos e meio, motivo pelo qual retornava-se no final de cada bateria de leitura ao primeiro valor lido tirando-se daí o desvio causado pela leitura não instantânea.

O registro da insolação era feito por um registrador gráfico contínuo, conforme Figura 4.16.

O tempo era medido por um cronômetro acumulativo ajustado ao horário local, tomando-se os devidos cuidados com o horário de verão.

#### 4.5. RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS

##### 4.5.1. Resumos dos procedimentos e testes realizados

Os testes realizados nas paredes restringiu-se as paredes do tipo  $1/2$  tijolo mais  $1/4$  tijolo, com ou sem o material de mudança de fase entre elas. A camada de material de mudança de fase, utilizada foi na espessura de 20 mm e 40 mm conforme visto na Figura 4.2.

No caso dos testes da cobertura utilizou-se somente a disposição vista na Figura 4.6 ou seja uma cobertura normal com telhas de cimento amianto, mais laje do tipo prel com ou sem a camada de 20 mm de material de mudança de fase.

Devido a adoção de uma única cela de testes, foi necessário primeiro realizar os ensaios, sem o material de mudança de fase e depois realizar ensaios com o material de mudança de fase.

Para comprovar os efeitos observados na simulação numérica e na pré-avaliação (Anexo 8) procurou-se antes de tudo dias que apresentassem condições atmosféricas bem semelhantes. Isto tornou o trabalho muito árduo pois além de dividir as medidas em dois anos, ainda teve-se o imprevisto de chuvas e/ou céu encoberto por nuvens nos dias esperado.

Realizou-se um total de 38 testes envolvendo um total de 800 horas, com isto levantou-se os seguintes tipos básicos de resultados:

- (1) Perfil de temperatura ao longo da espessura da parede convencional e parede térmica para as várias horas do dia.
- (2) Variação da temperatura do ar atmosférico externo, do ar atmosférico no interior da sala, juntamente com a variação da temperatura da face externa e da face interna das paredes.
- (3) Intensidade da radiação solar incidente nas paredes.
- (4) Perfil de temperatura ao longo da espessura do telhado e laje sem e com o material de mudança de fase.
- (5) Variação da temperatura do ar atmosférico externo, do ar atmosférico interno da sala, juntamente com a variação da temperatura na face externa da telha e na face interna da laje.
- (6) Intensidade da radiação solar incidente na telha.

As experiências foram realizadas na ordem mostrada na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Experiências realizadas

| PAREDE CONVENCIONAL |     |         | COBERTURA CONVENCIONAL |     |         |
|---------------------|-----|---------|------------------------|-----|---------|
| Nº EXP.             | ANO | DIA     | Nº EXP.                | ANO | DIA     |
| 1                   | 87  | 190     | 1                      | 87  | 192     |
| 2                   | 87  | 191     | 2                      | 87  | 198     |
| 3                   | 87  | 197     | 3                      | 87  | 199     |
| 4                   | 87  | 203     | 4                      | 88  | 125     |
| 5                   | 87  | 204     | 5                      | 88  | 126     |
| 6                   | 87  | 220     | 6                      | 88  | 155     |
| 7                   | 87  | 247     | 7                      | 88  | 158     |
| PAREDE TÉRMICA      |     |         | COBERTURA TÉRMICA      |     |         |
| Nº EXP.             | ANO | DIA     | Nº EXP.                | ANO | DIA     |
| 8                   | 88  | 187     | 8                      | 88  | 171     |
| 9                   | 88  | 199     | 9                      | 88  | 172     |
| 10                  | 88  | 200     | 10                     | 88  | 202     |
| 11                  | 88  | 201     | 11                     | 88  | 203     |
| 12                  | 88  | 216     | 12                     | 88  | 237     |
| 13                  | 88  | 217     | 13                     | 88  | 245     |
| 14                  | 88  | 228     | 14                     | 88  | 246     |
| 15                  | 88  | 229/230 | 15                     | 88  | 243/244 |
| 16                  | 88  | 249/250 | 16                     | 88  | 260/261 |
| 17                  | 89  | 132     |                        |     |         |
| 18                  | 89  | 139/140 |                        |     |         |

Para caracterizar os testes realizados escolheu-se as seguintes experiências:

- Parede convencional experiência número 6, Figuras 4.17, 4.18 e 4.19,
- Parede térmica com 20 mm de material de mudança de fase experiência número 12, Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.
- Comparação da performance dos dois tipos de paredes, experiências 7 e 14, Figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30.
- Testes de 33 horas com a parede térmica de 20 mm de material de mudança de fase, experiência número 15,

Figuras 4.31, 4.32 e 4.33.

- Teste de 33 horas com a parede térmica de 40 mm de material de mudança de fase (instrumentado), experiência número 18, Figuras 4.34, 4.35, 4.36.
- Telhado convencional experiência número 6, Figuras 4.37, 4.38 e 4.39.
- Telhado térmico com 20 mm de material de mudança de fase, experiência número 9, Figuras 4.40, 4.41, 4.42.
- Comparação da performance dos dois tipos de coberturas, experiências número 6 e 9, Figuras 4.43, 4.44, 4.45.
- Teste de 33 horas com o telhado térmico de 20 mm de material de mudança de fase, experiência número 15, Figuras 4.46, 4.47, 4.48.
- Obs.: Os demais resultados dos testes realizados estão apresentado no Anexo 10.

#### 4.5.2. Resultados Experimentais

#### 4.5.2(a) Paredes

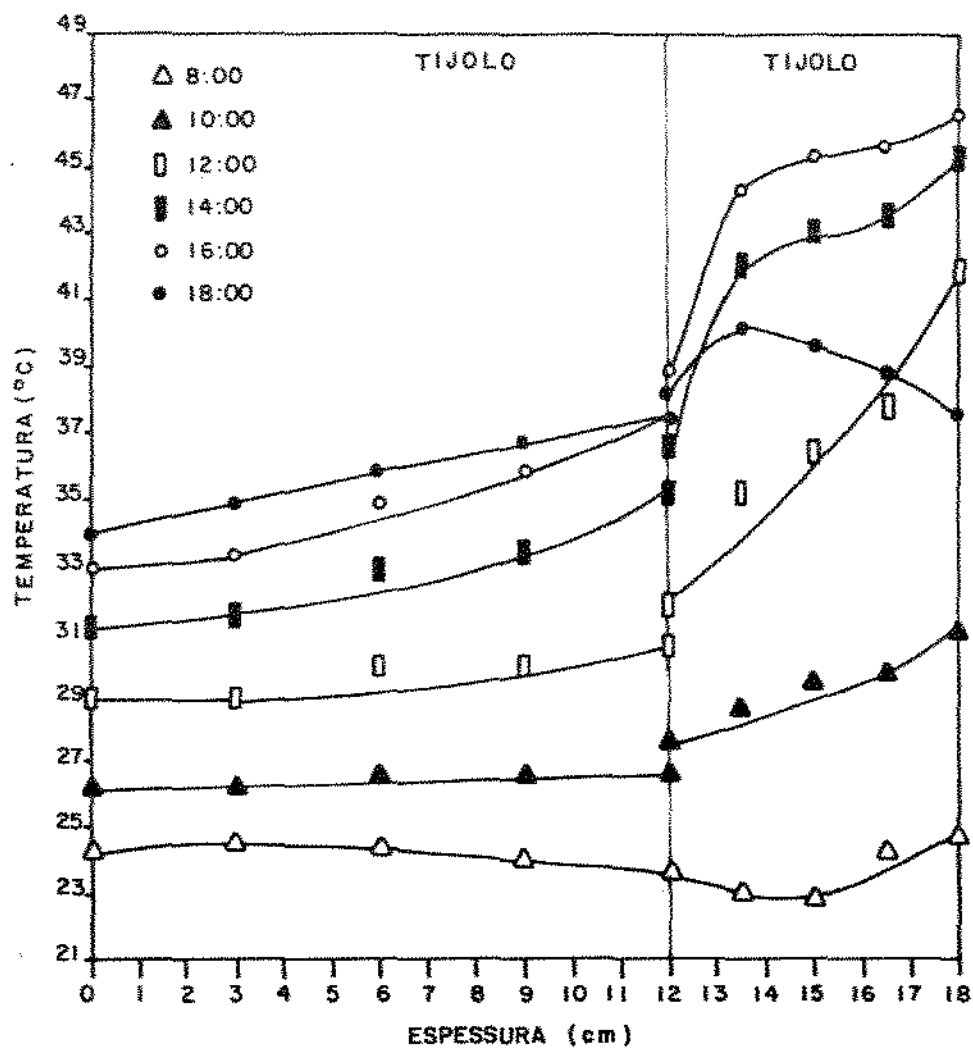


Figura 4.17 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 6).

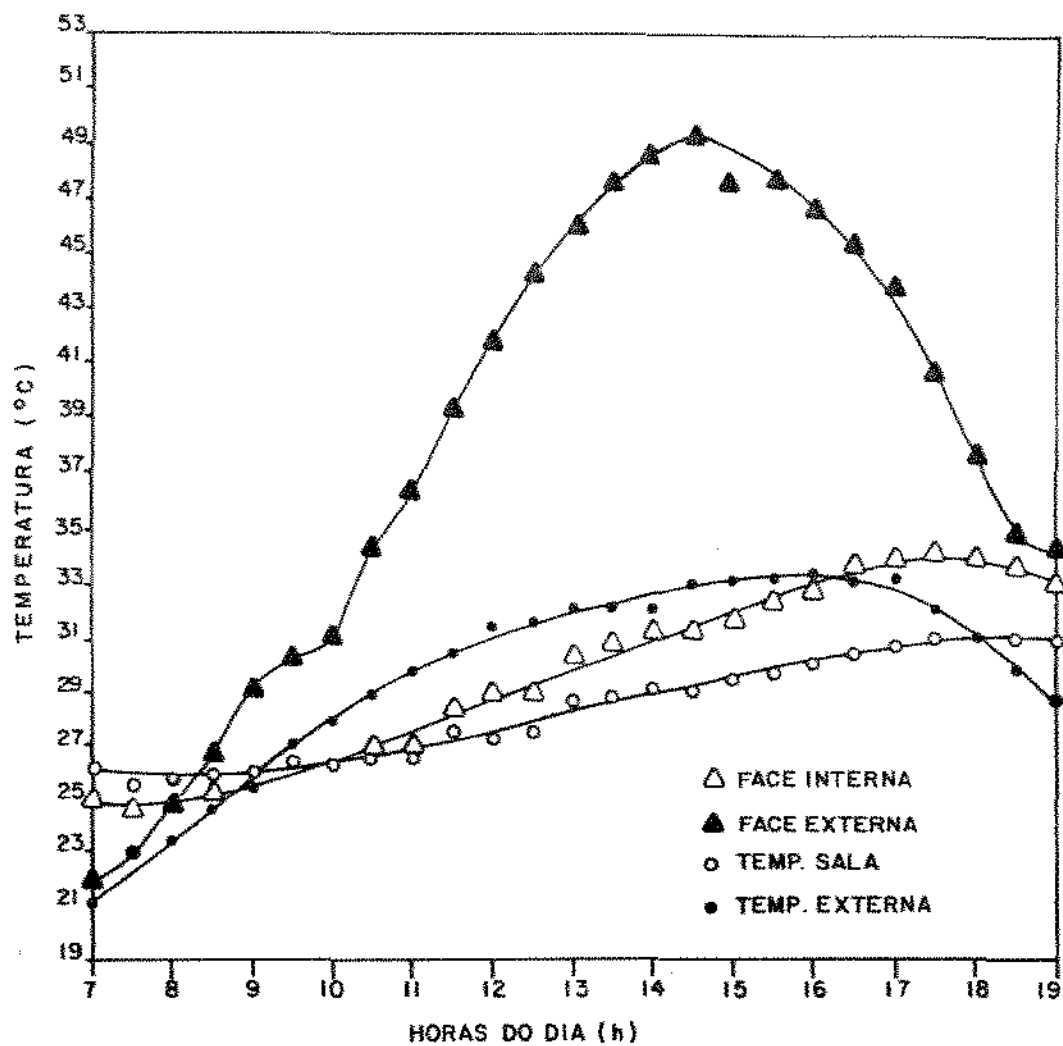


Figura 4.18 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência B).

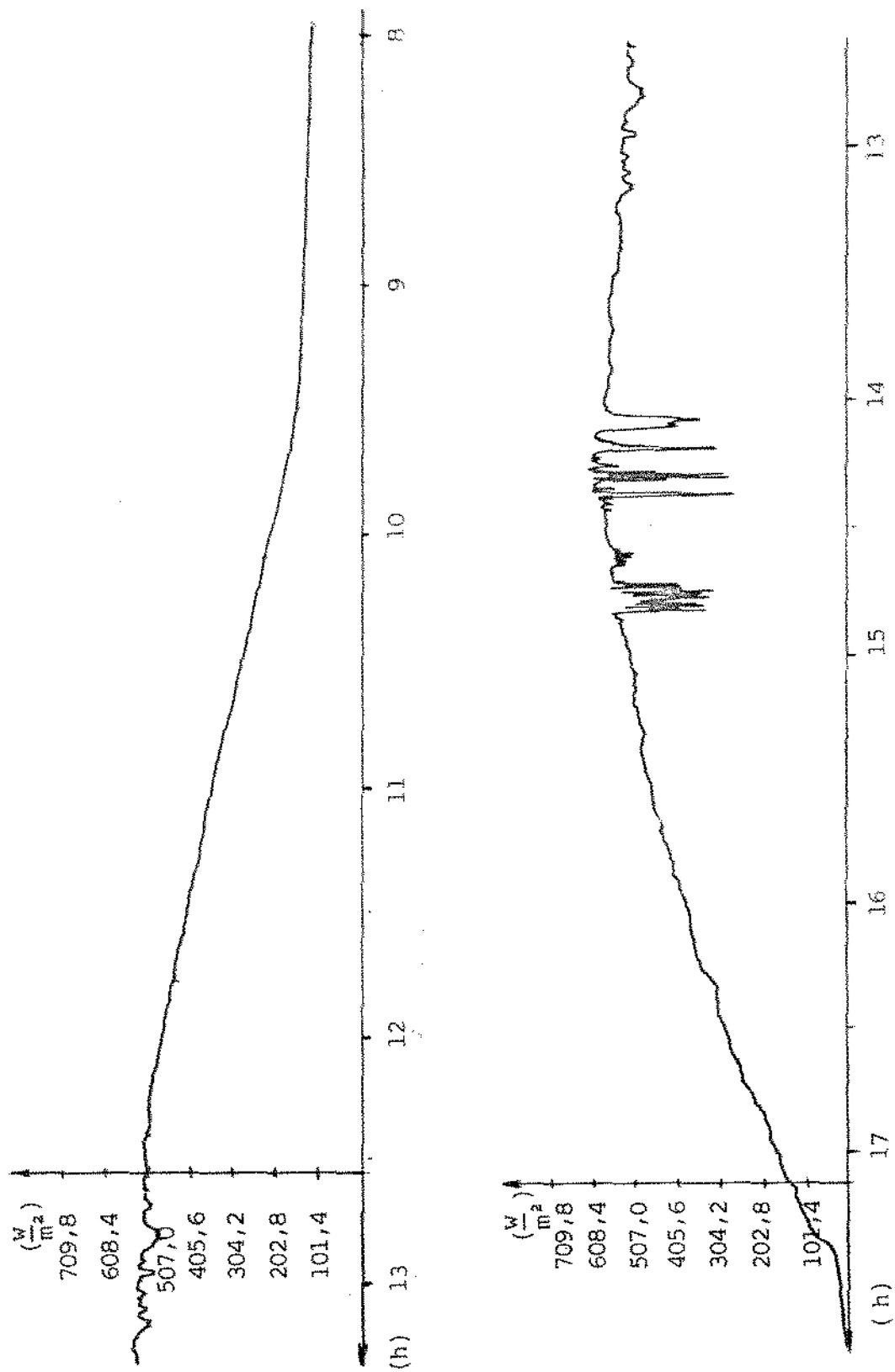


Figura 4.19 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 6 (radiação perpendicular a parede).

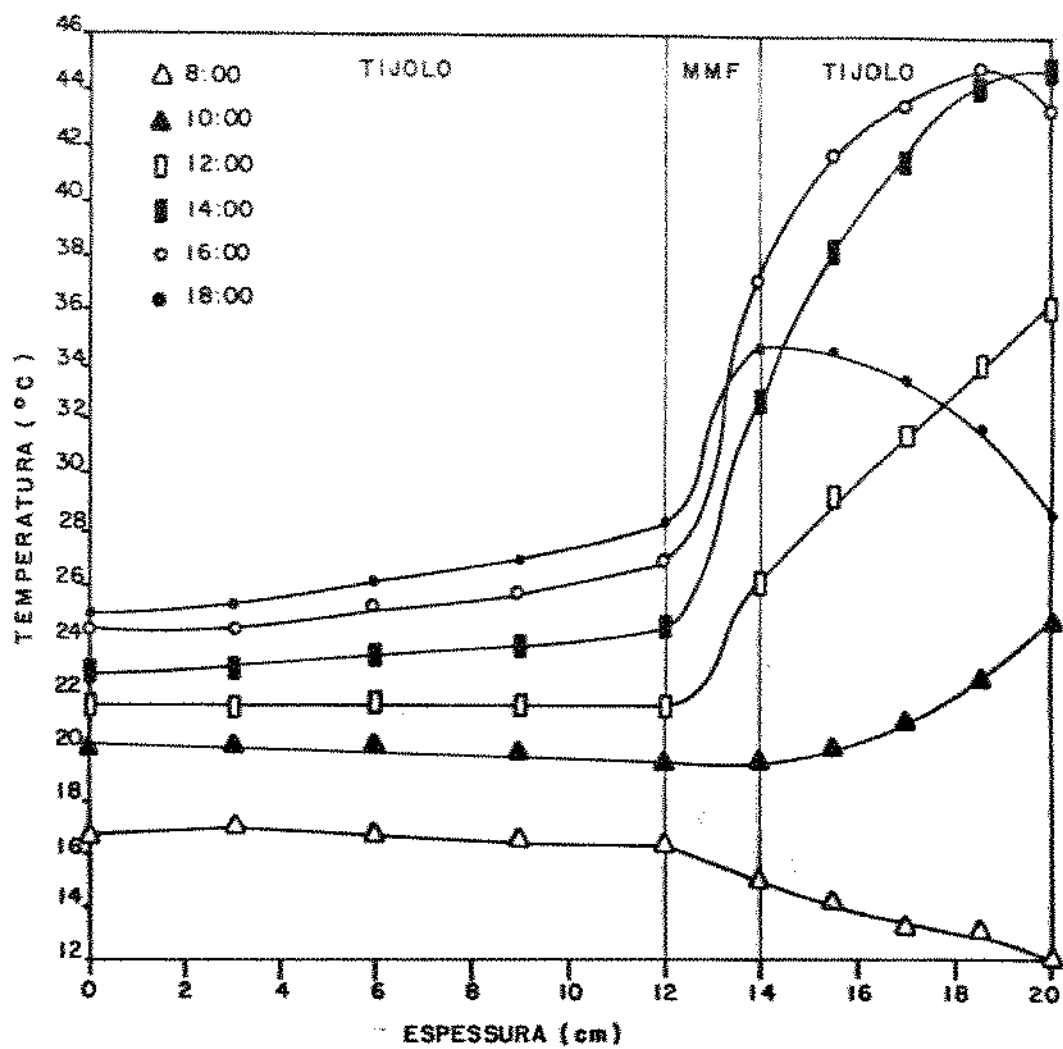


Figura 4.20 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 12).

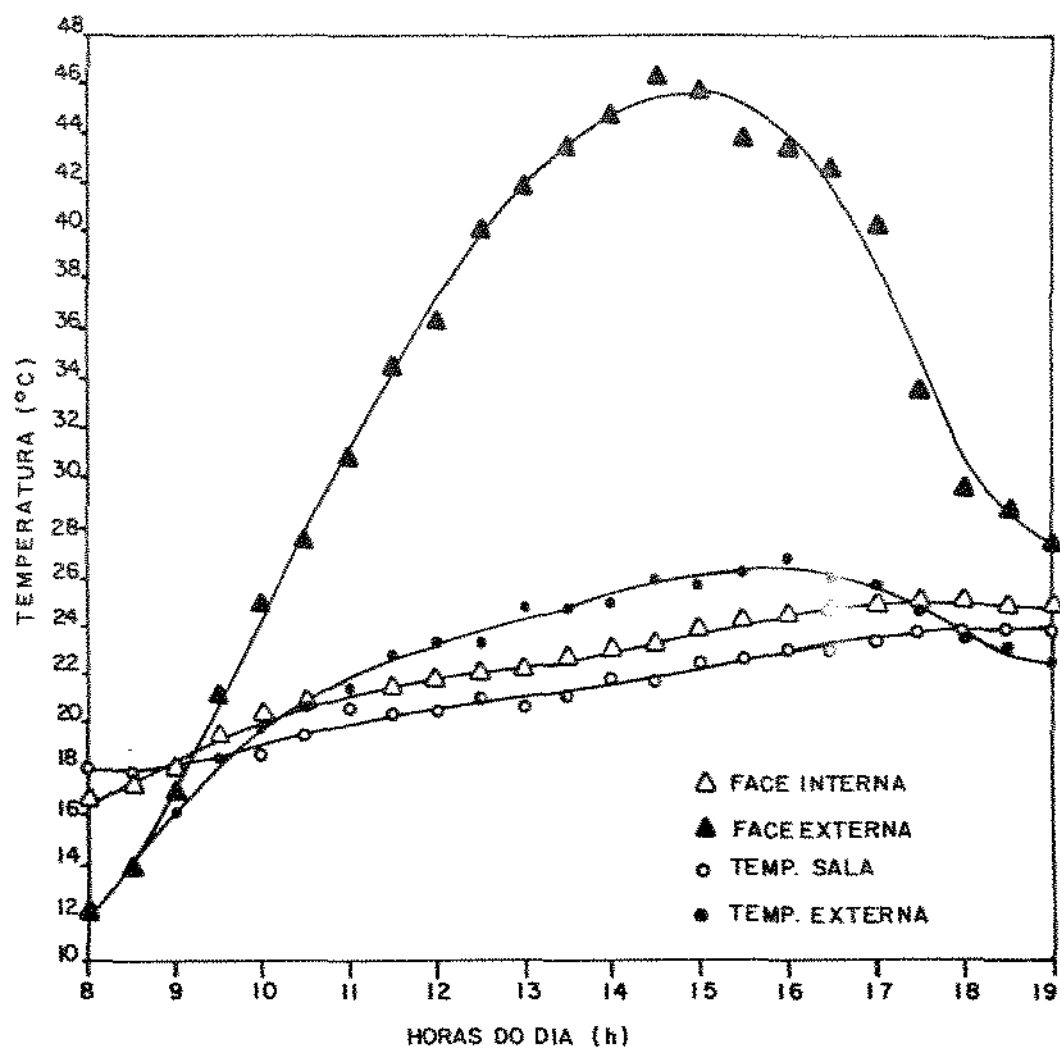


Figura 4.21 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 12).

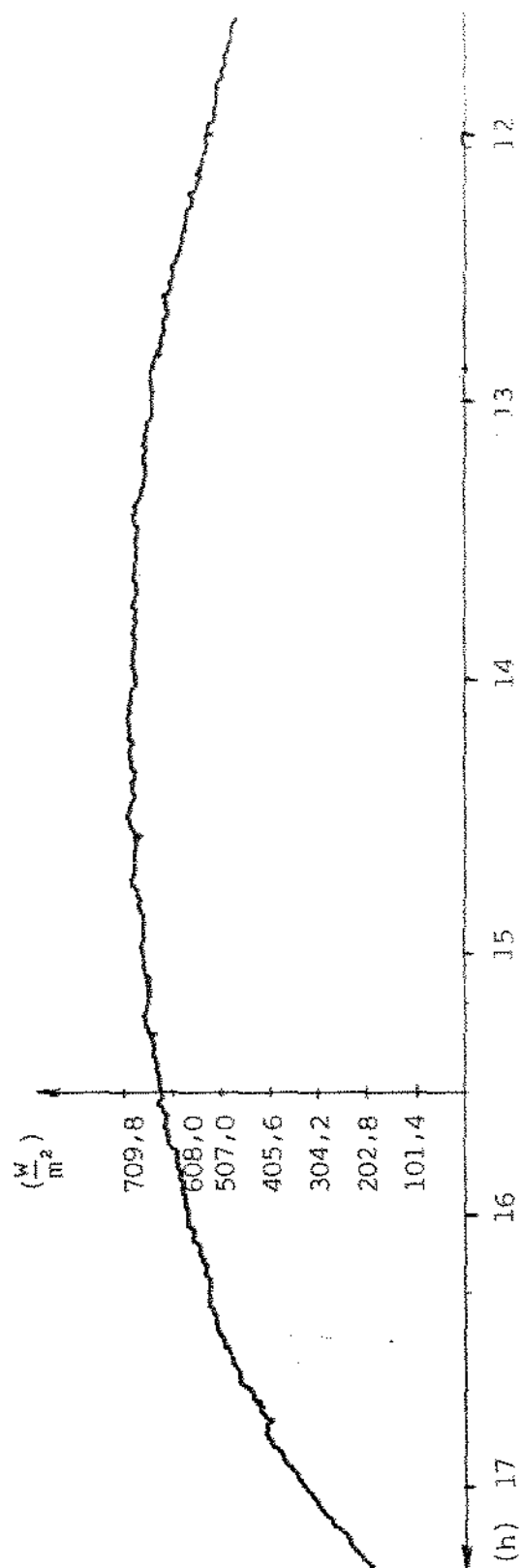


Figura 4.22 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 12 (radiação total no plano horizontal).

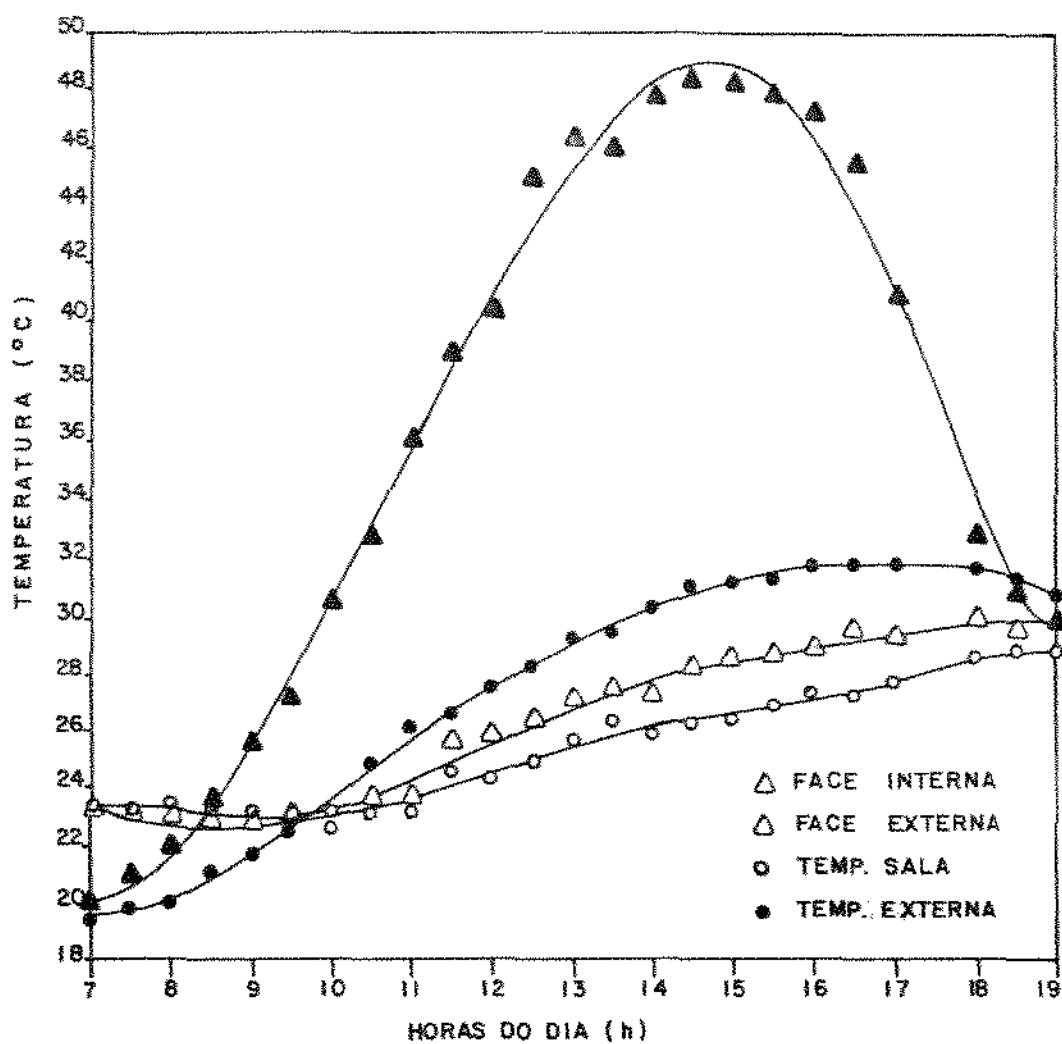


Figura 4.23 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 7).

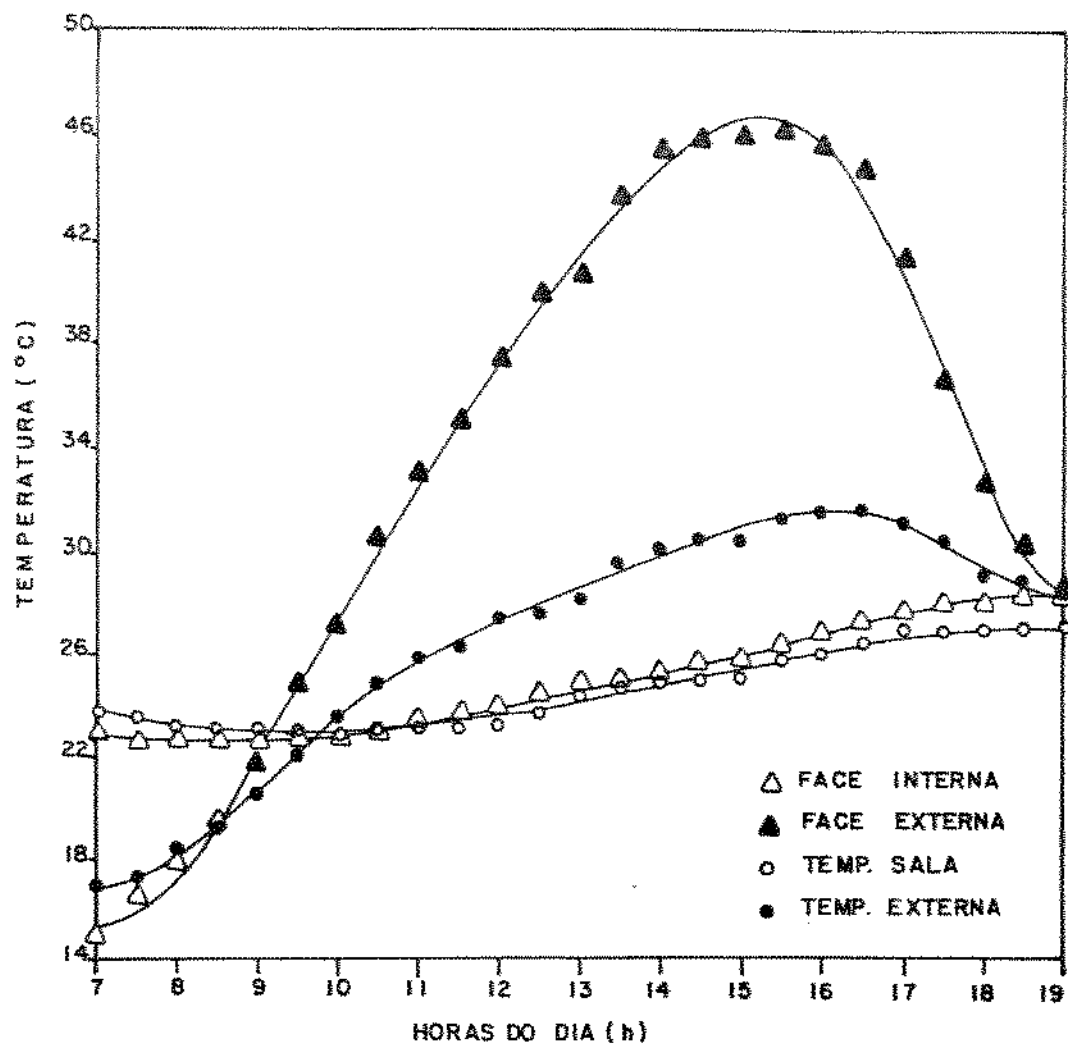


Figura 4.24 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 14).

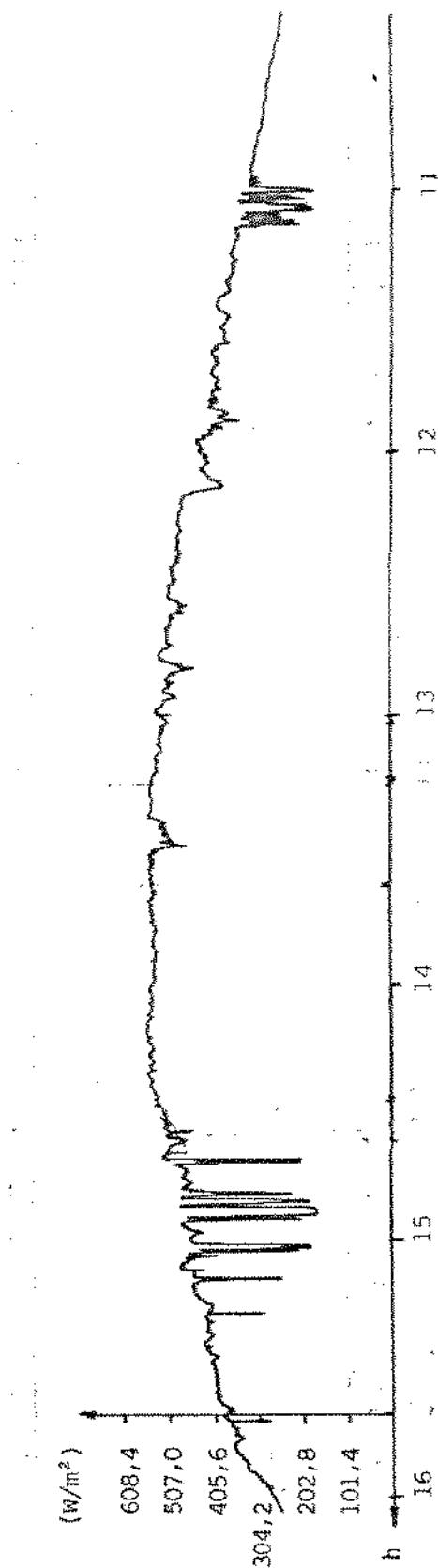


Figura 4.25 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 7 (radiação perpendicular a parede).

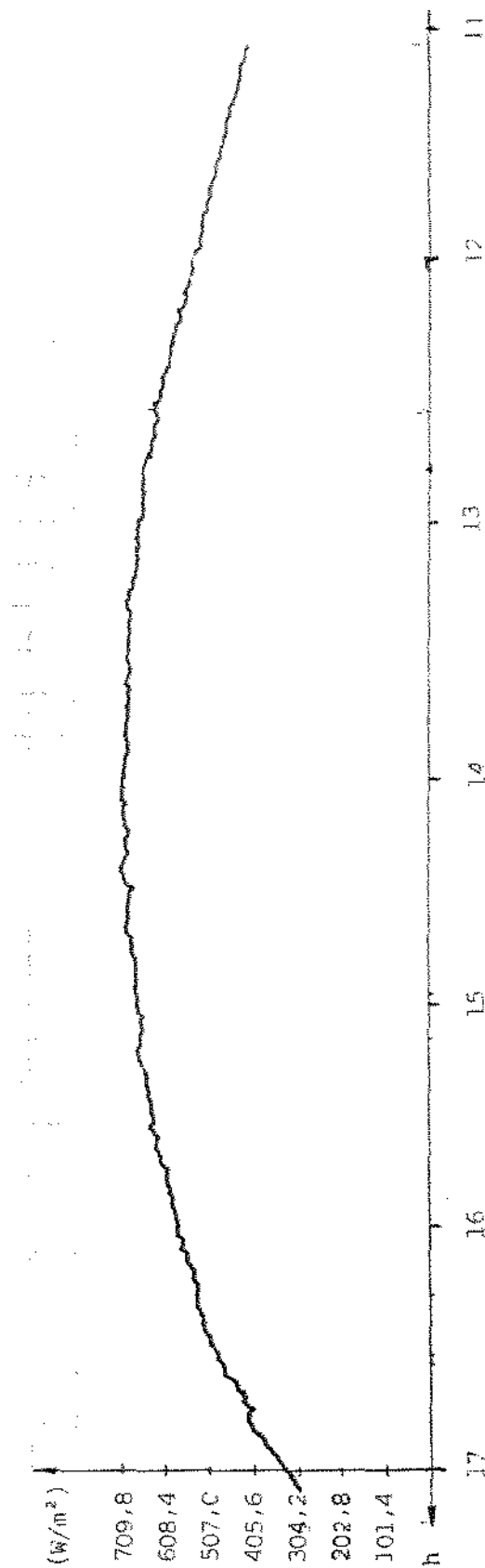


Figura 4.26 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 14 (radiação perpendicular a parede).

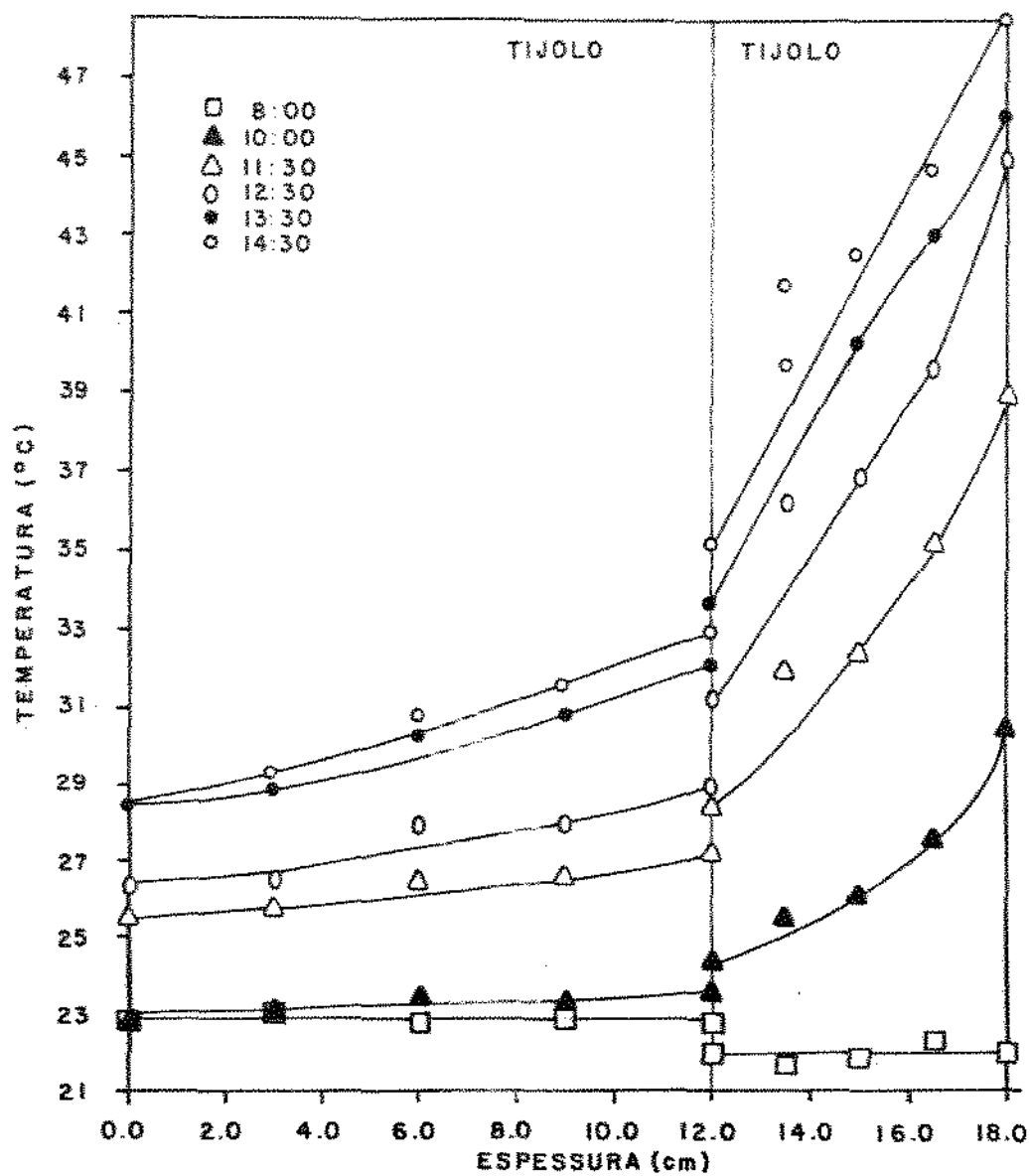
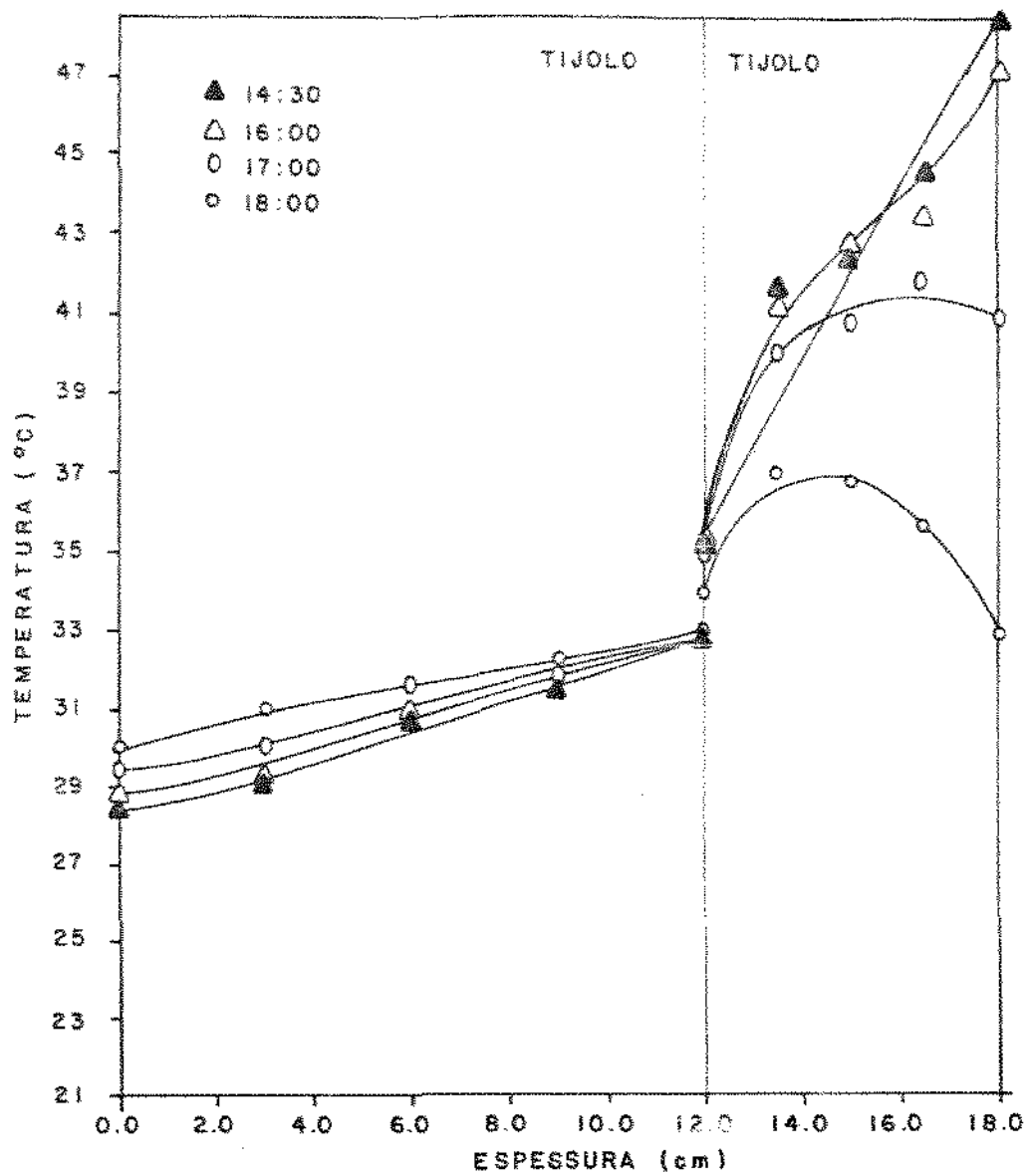


Figura 4.27 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas várias horas do dia (experiência 7).



Continuação da Figura 4.27

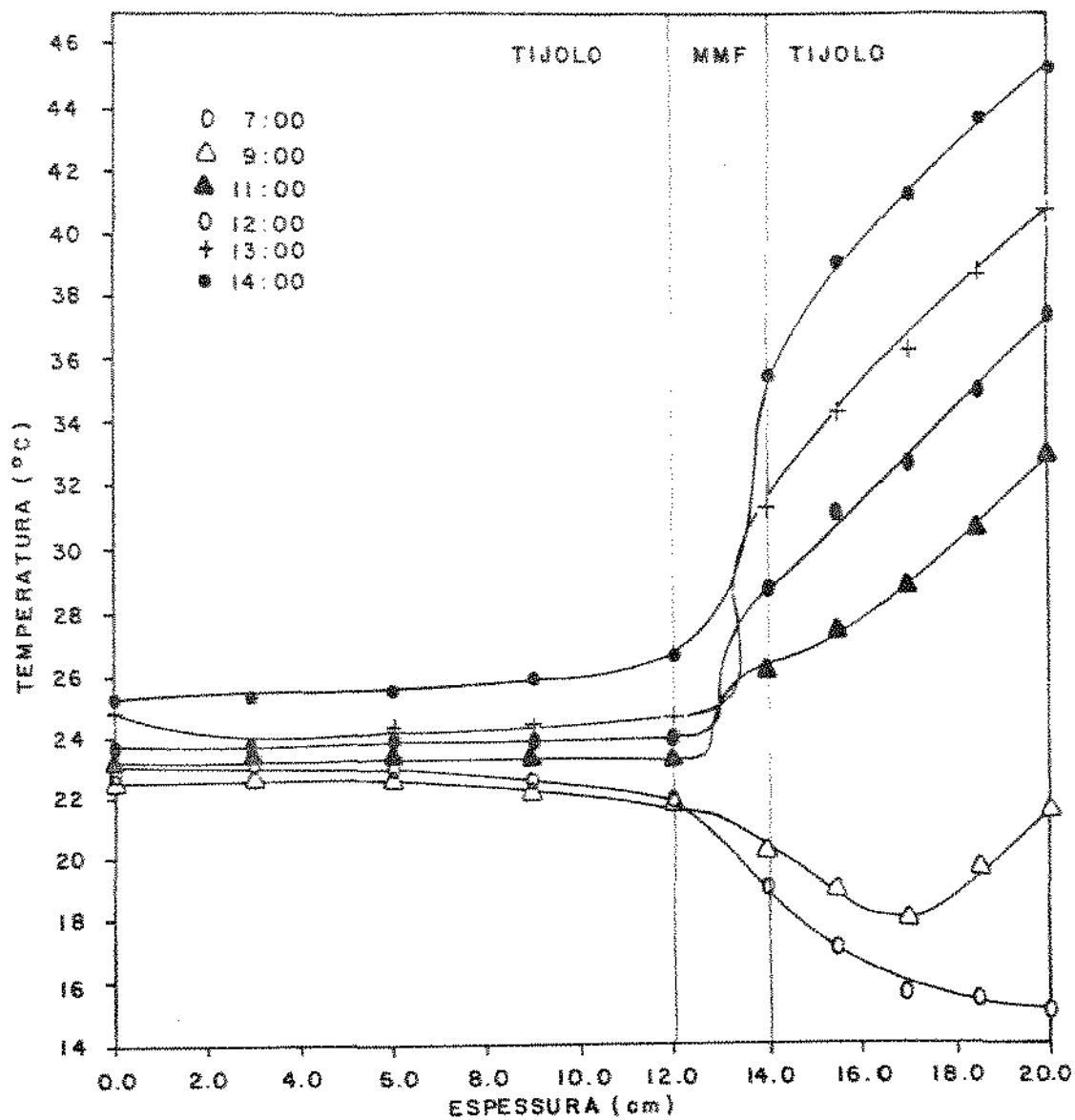
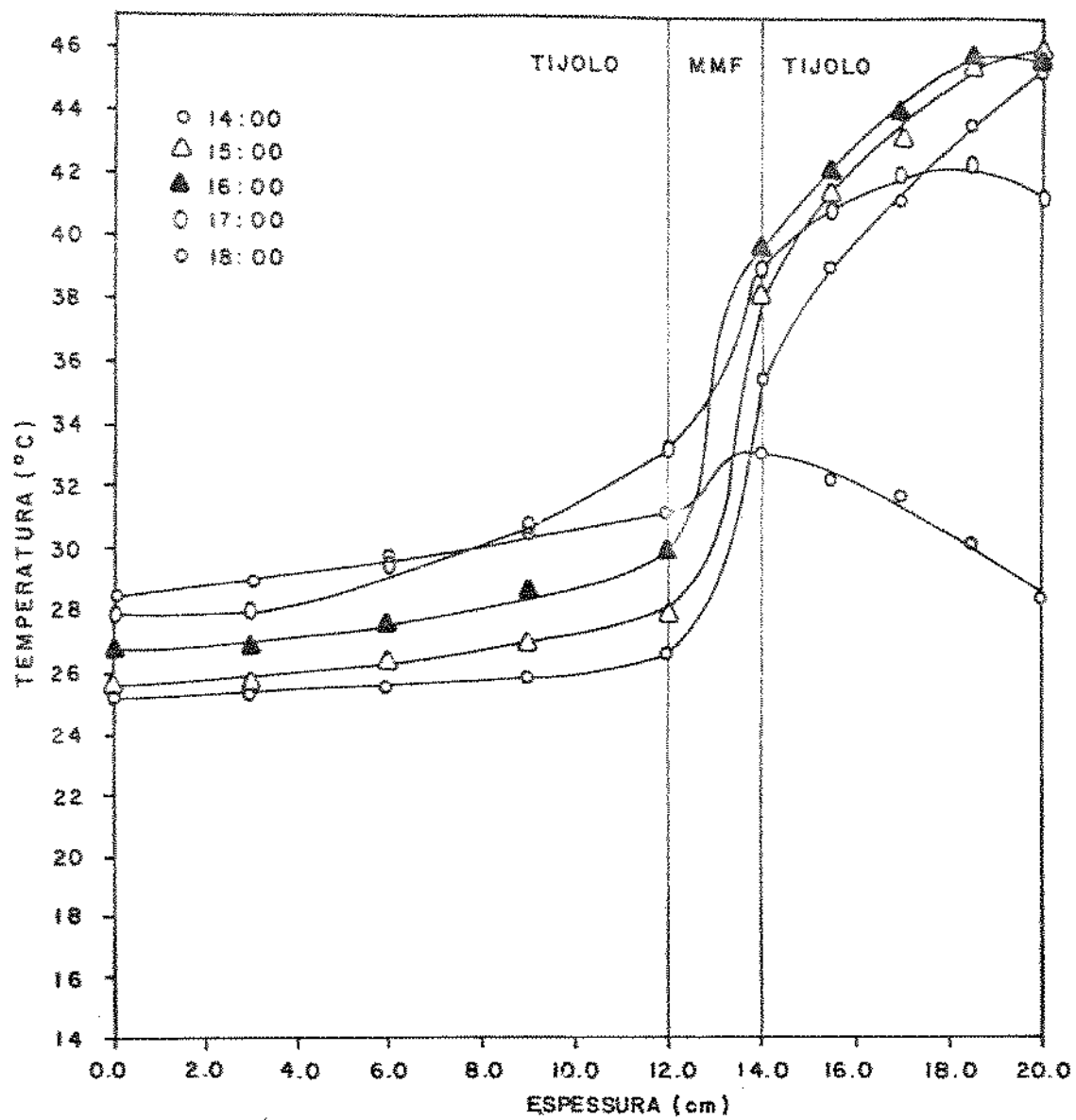


Figura 4.28 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 14).



Continuação da Figura 4.28

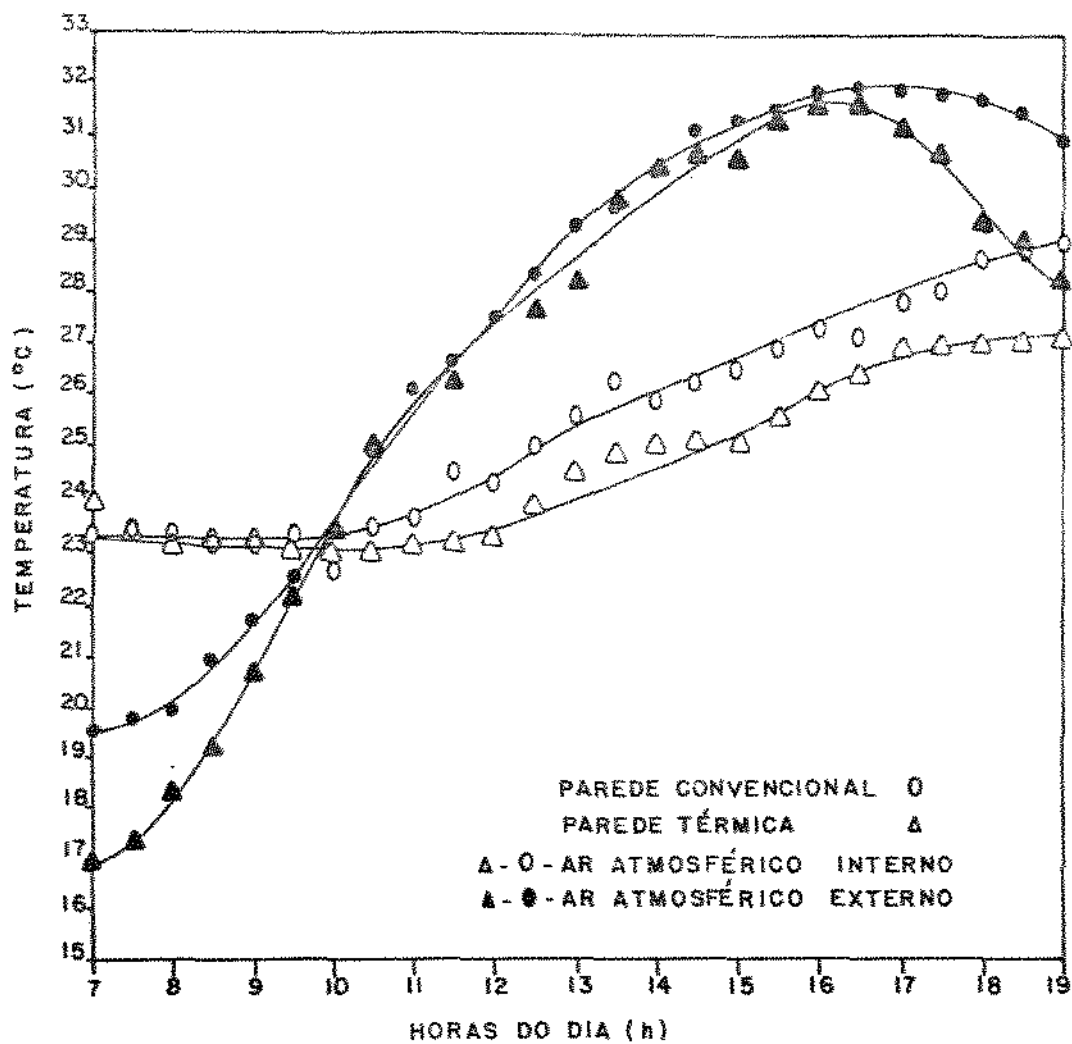


Figura 4.29 - Variação da temperatura do ar ambiente externo e interno para a parede convencional e parede térmica (experiência 7 e 14).

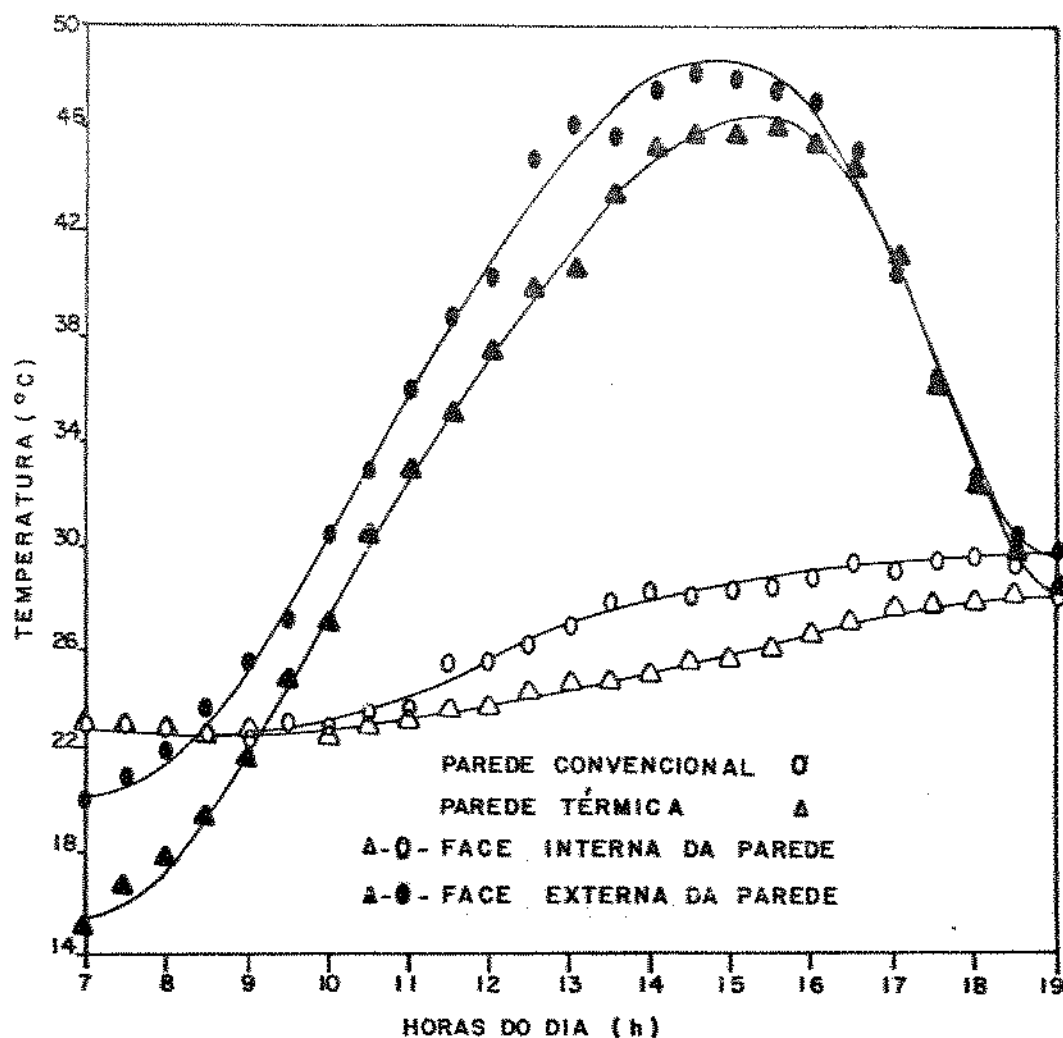


Figura 4.30 - Variação da temperatura das superfícies interna e externa da parede convencional e da parede térmica (experiência 7 e 14).

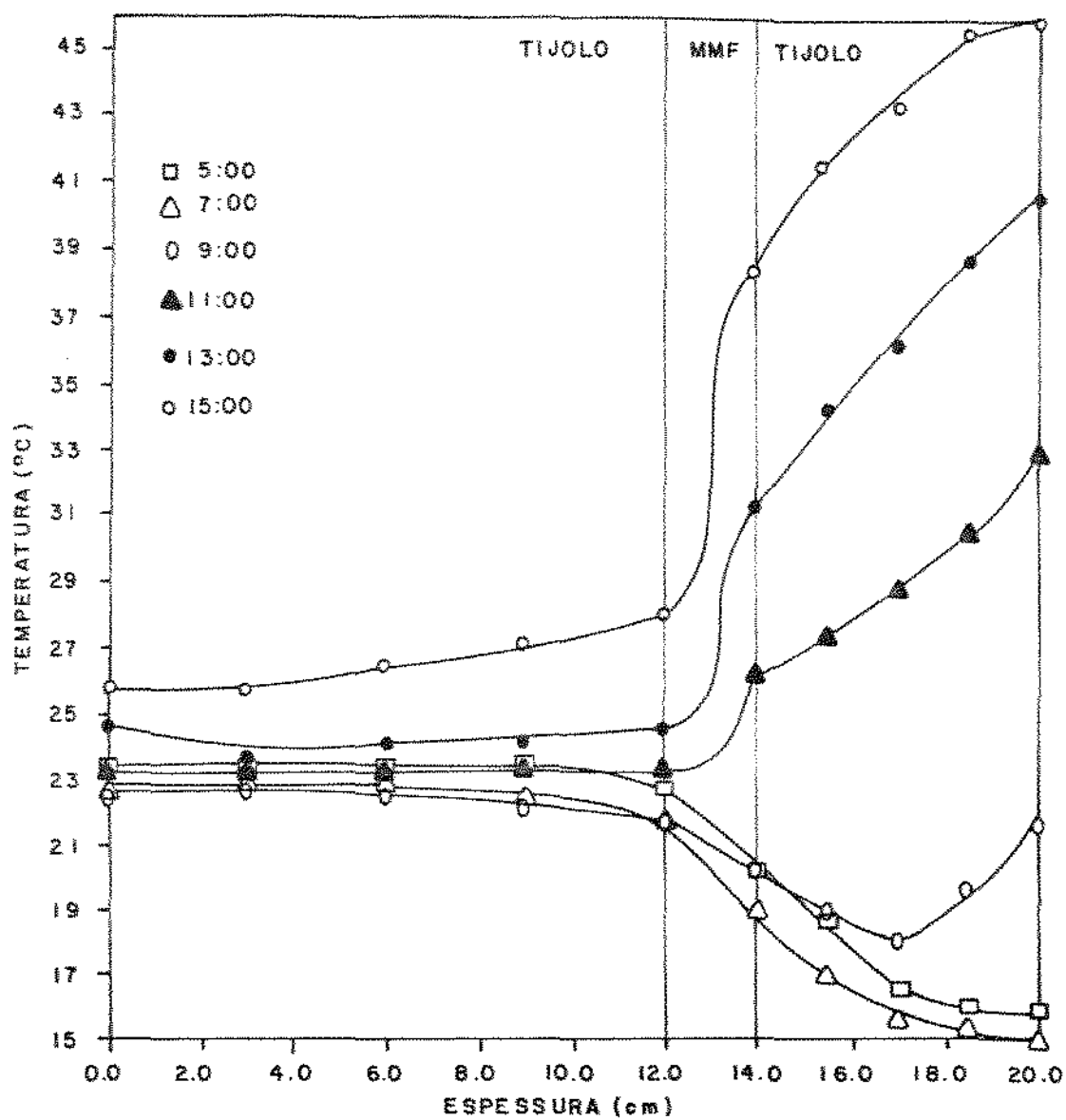
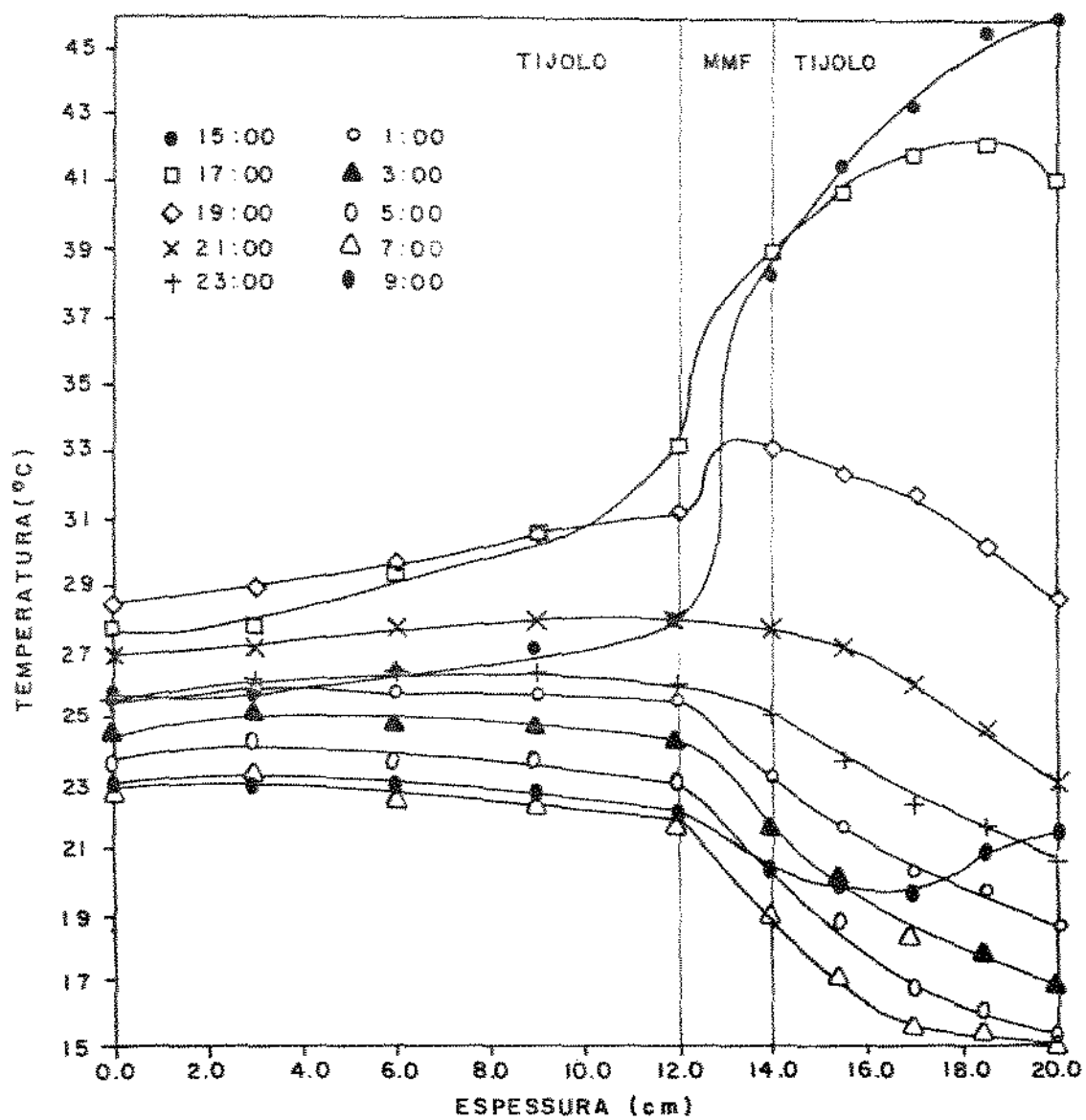


Figura 4.31 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia e da noite (experiência 15).



Continuação da Figura 4.31.

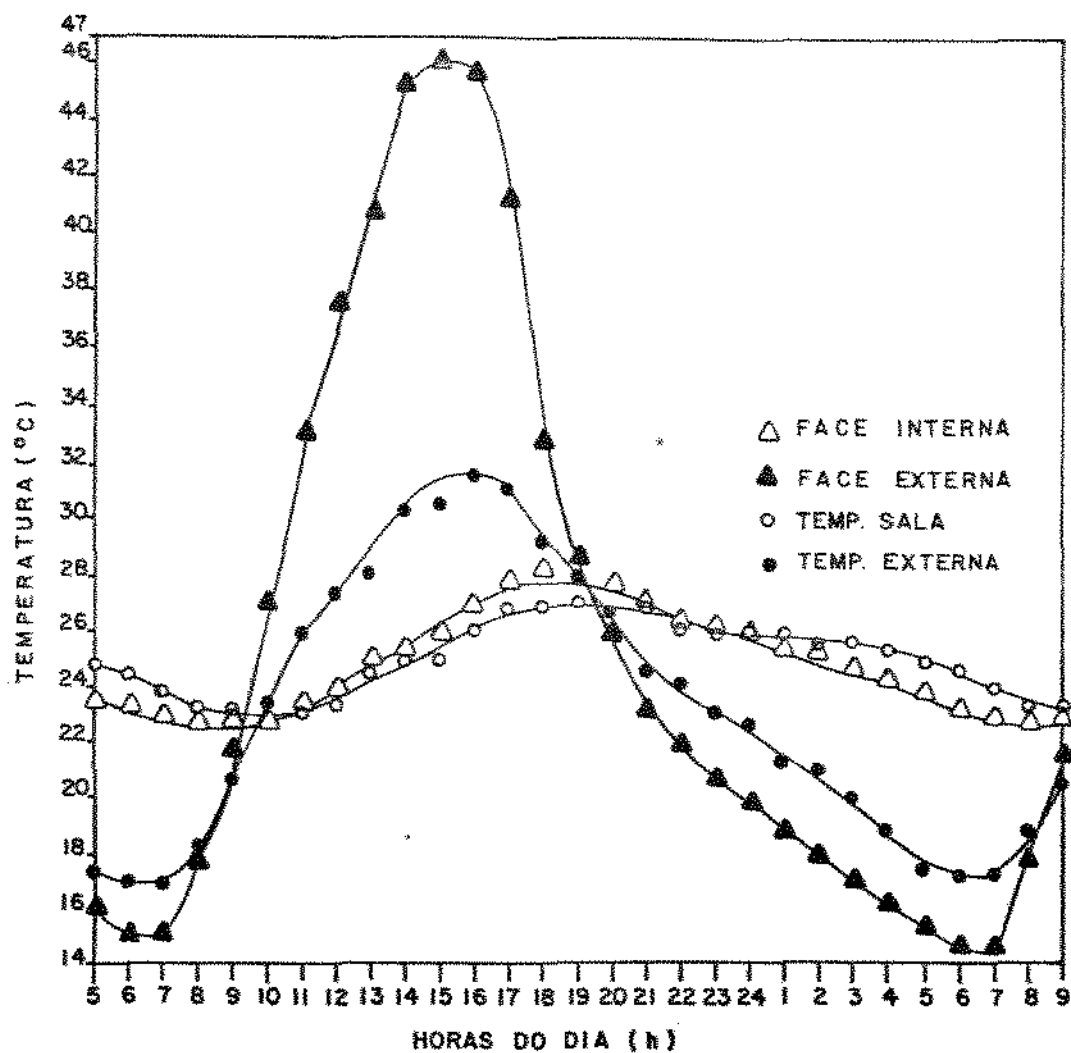


Figura 4.32 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia e da noite (experiência 15).

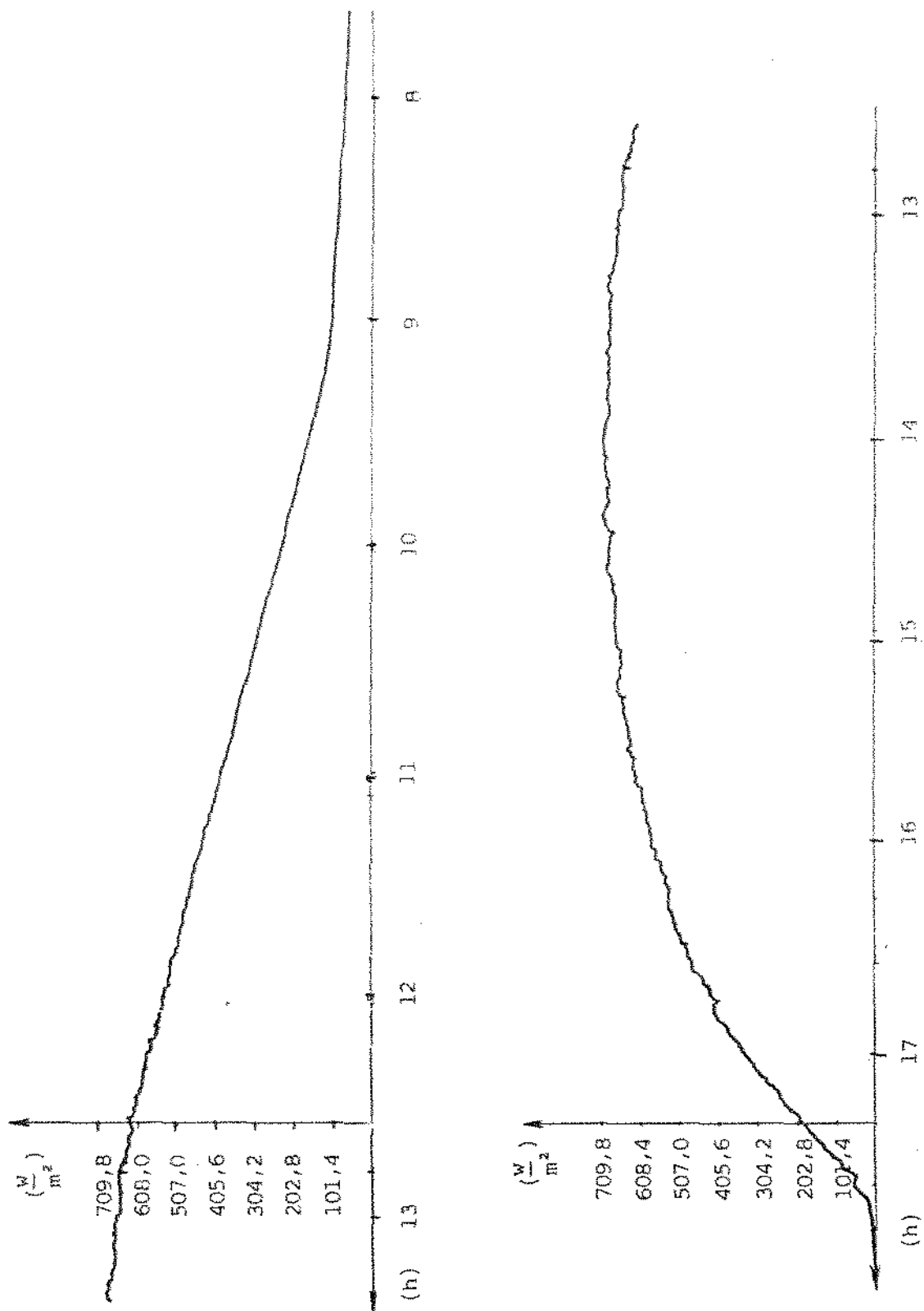


Figura 4.33 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 15  
radiação perpendicular a parede).

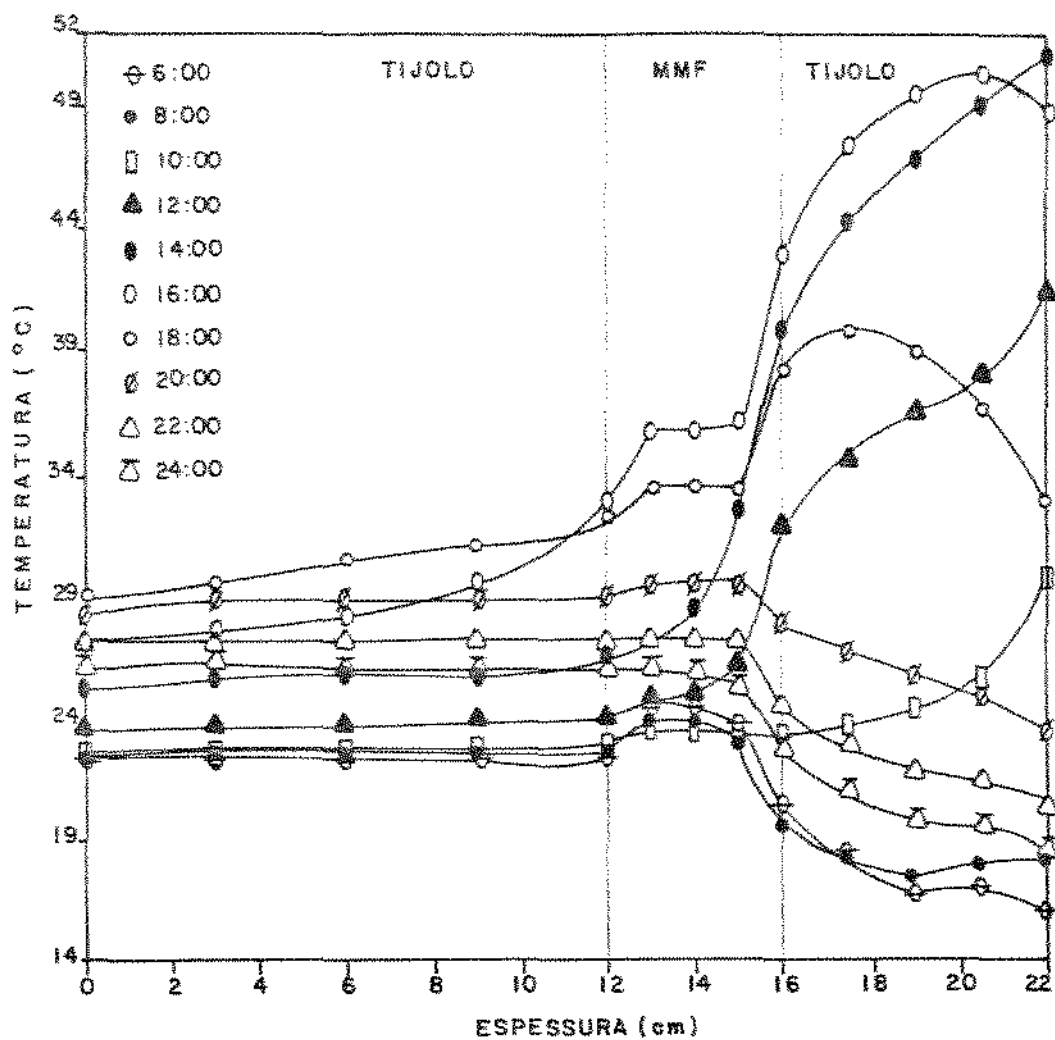
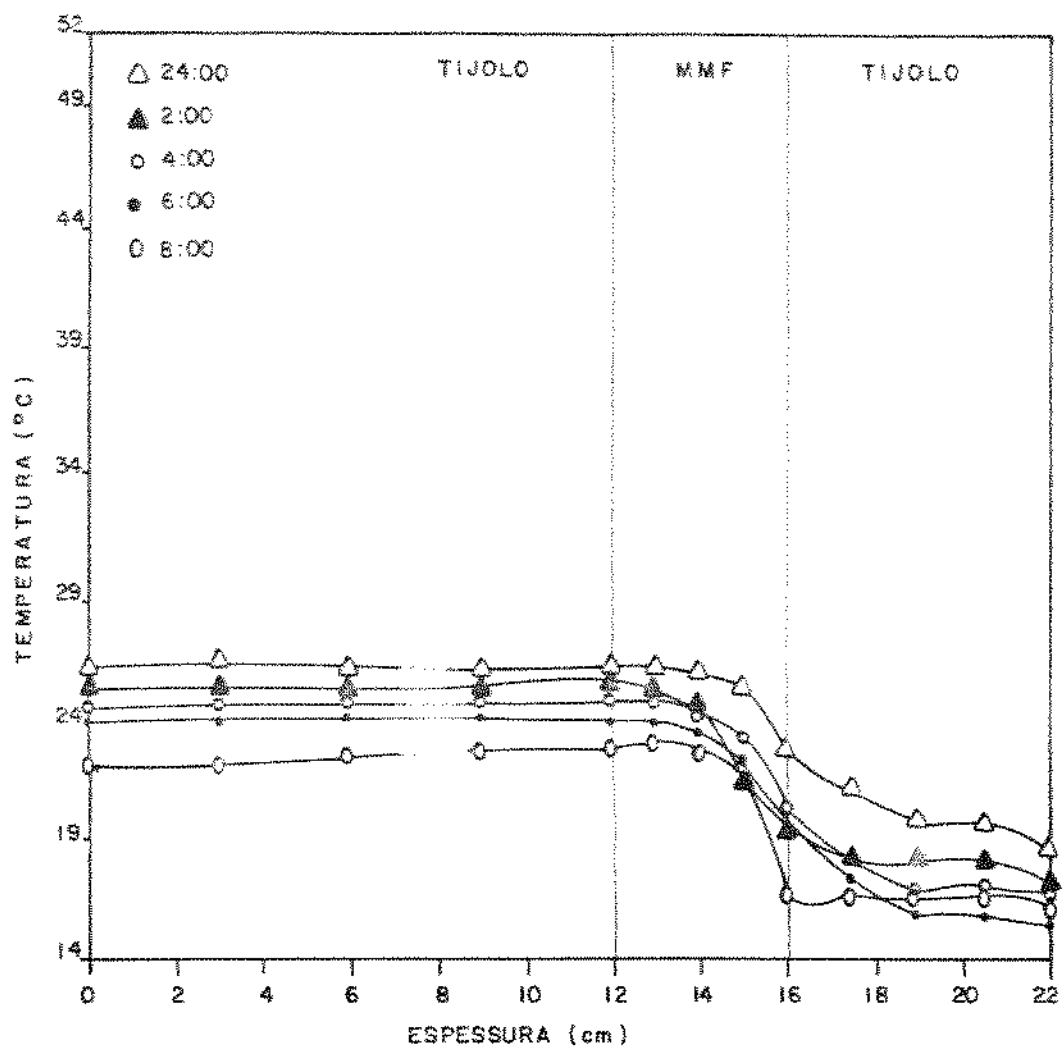


Figura 4.34 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica, com 40 mm de material de mudança de fase, nas várias horas do dia (experiência 18).



Continuação da Figura 4.34

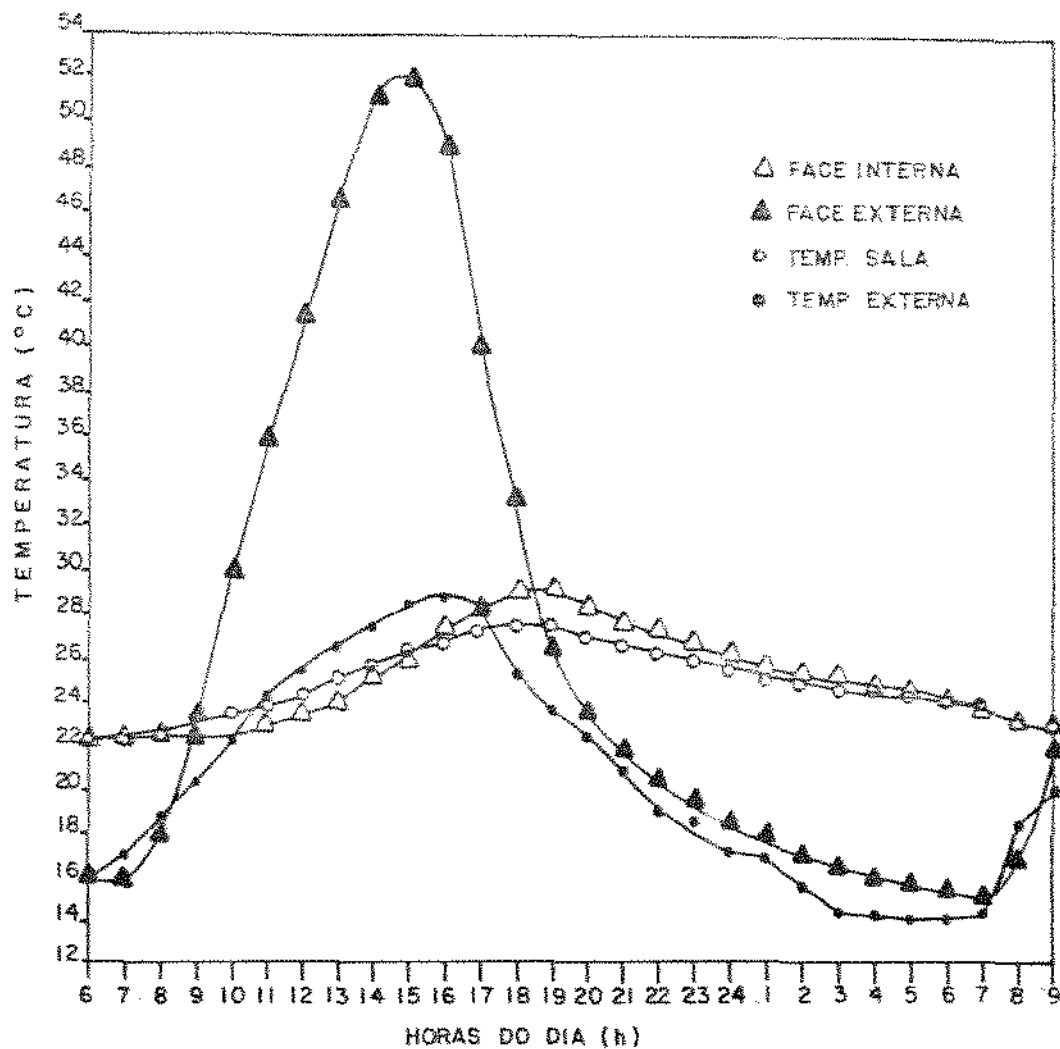


Figura 4.35 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica com 40 mm de material de mudança de fase (experiência 18).

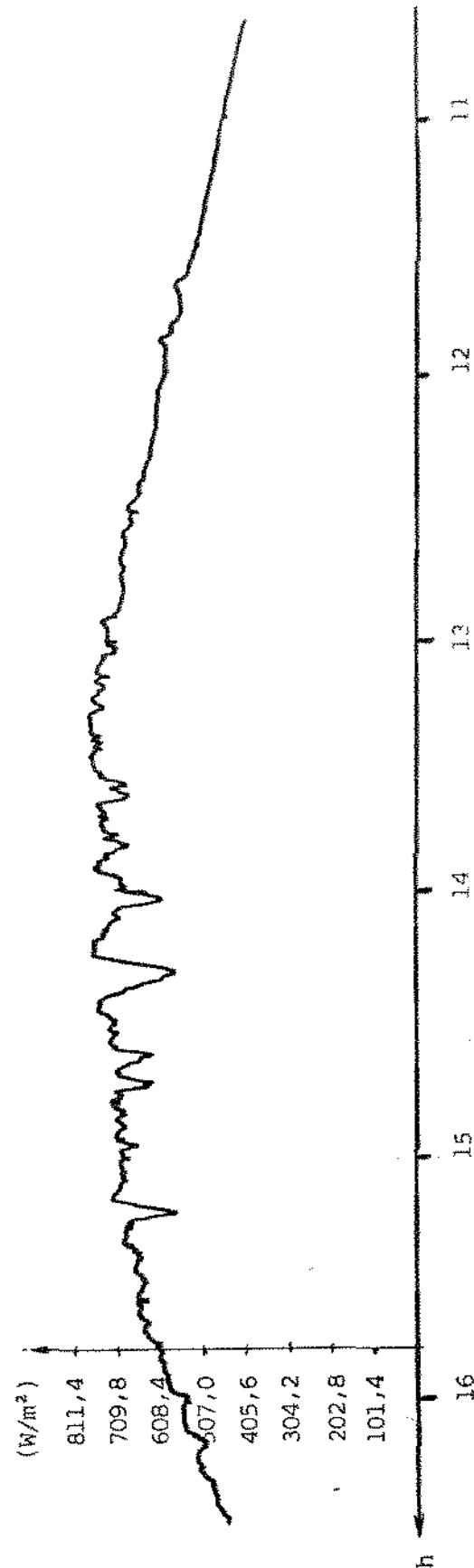


Figura 4.36 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 18 (radiação perpendicular a parede).

#### 4.5.2(b) Cobertura

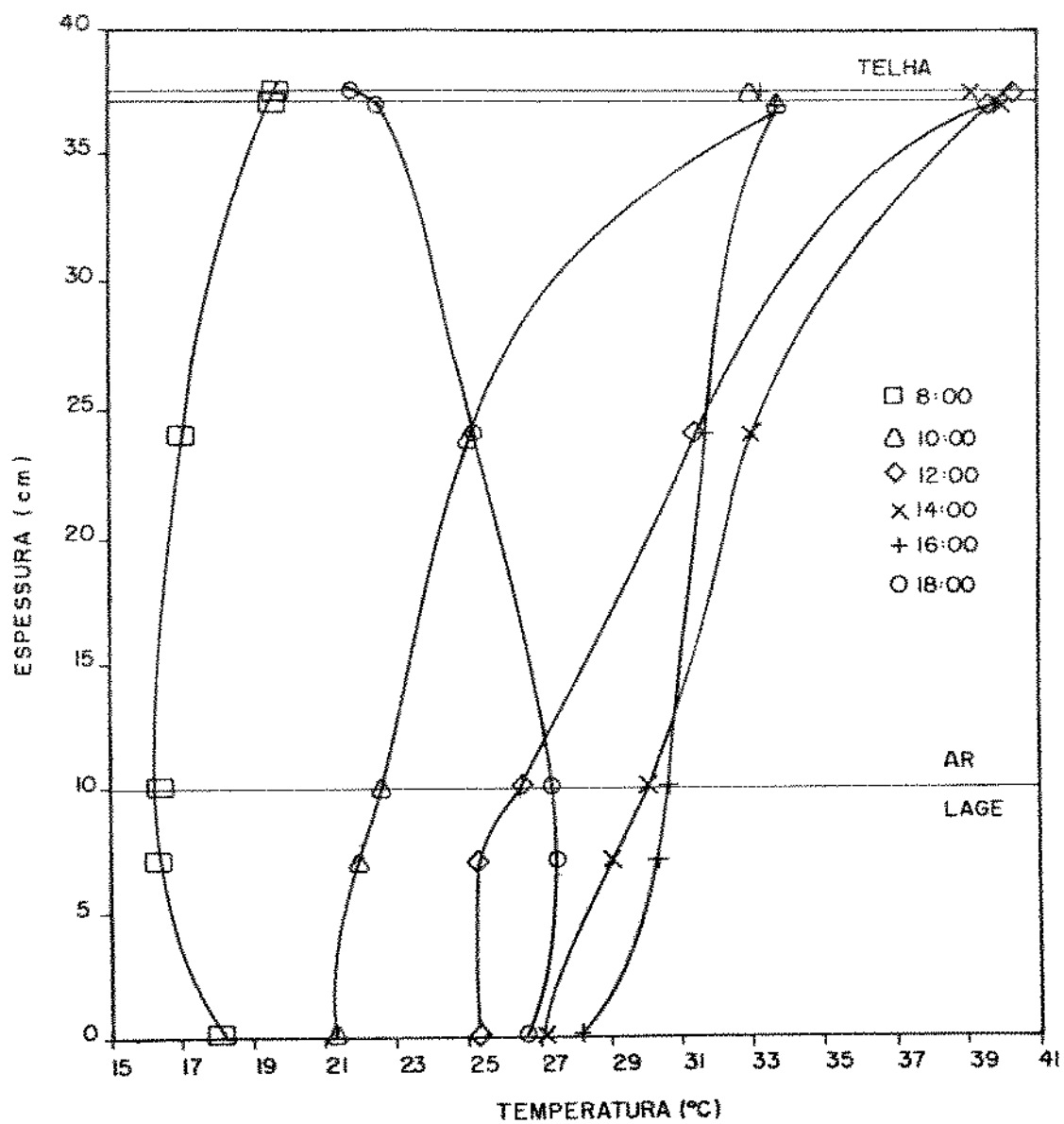


Figura 4.37 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas várias horas do dia (experiência 6).

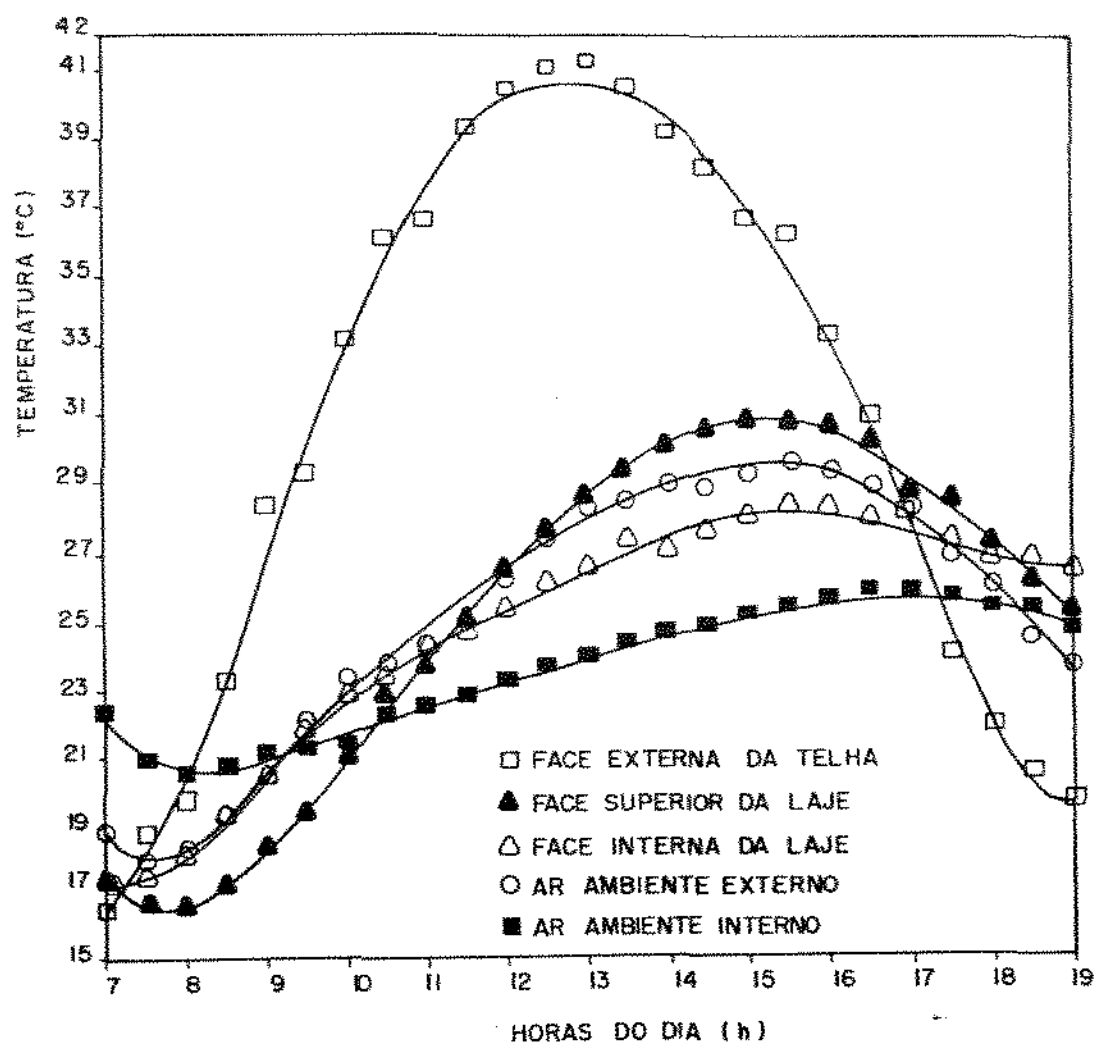


Figura 4.38 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional ao longo do dia (experiência 6).

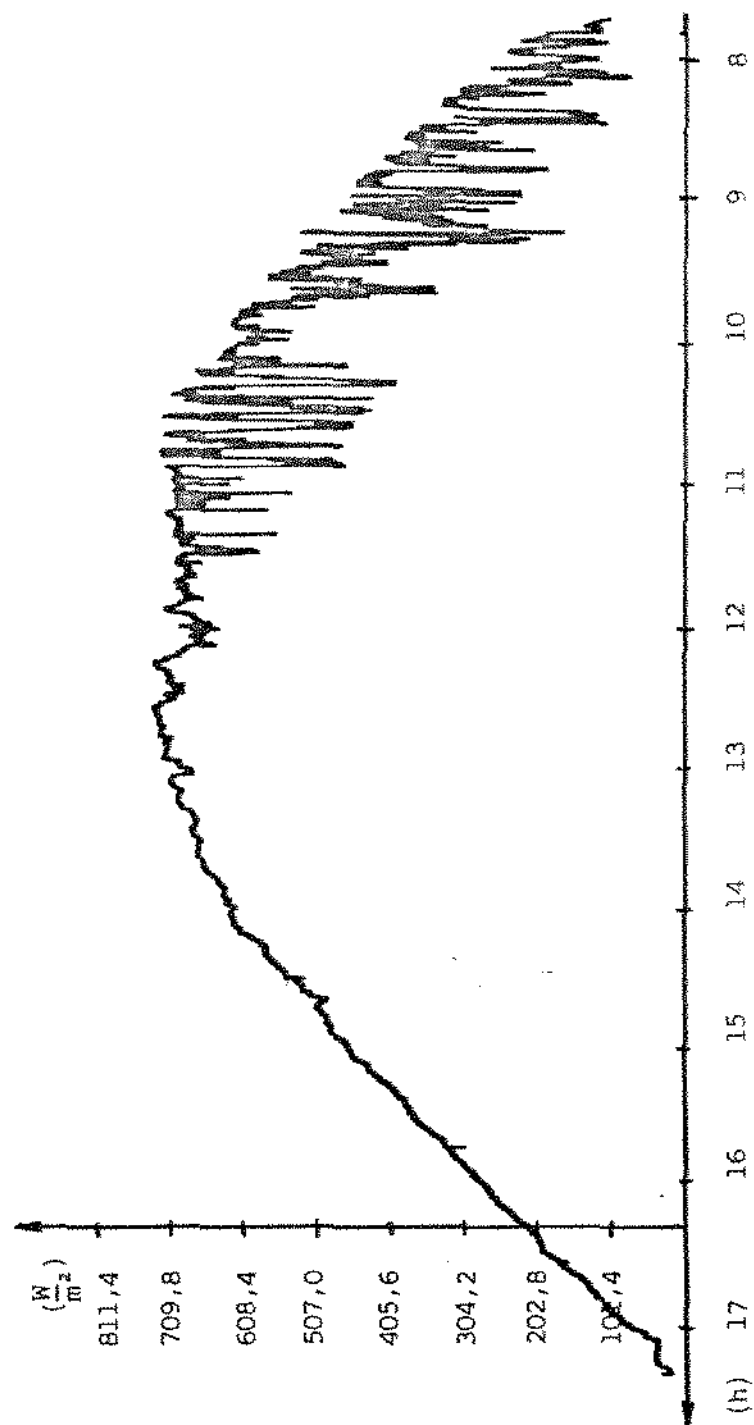


Figura 4.39 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 6  
(radiação na horizontal)

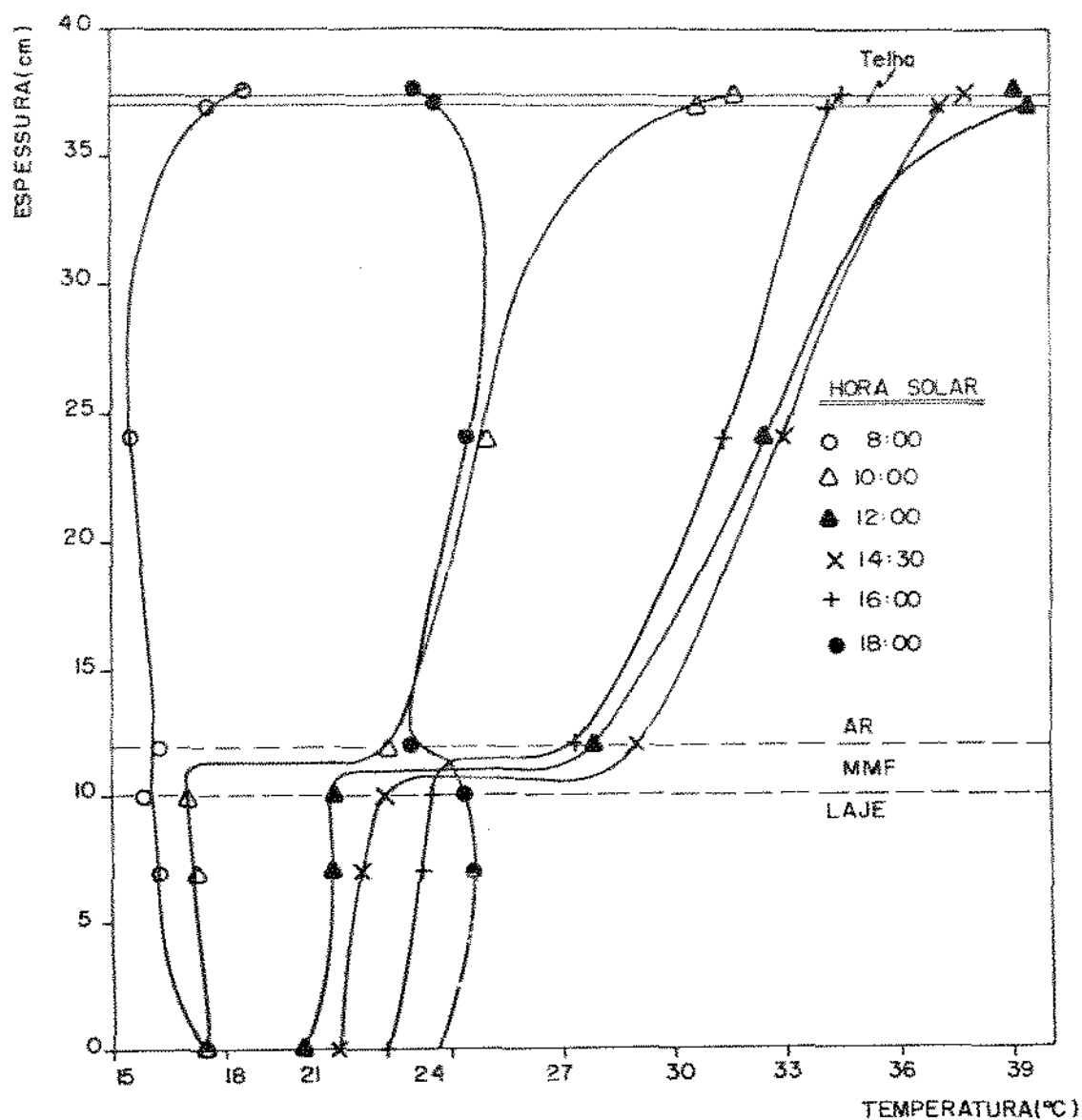


Figura 4.40 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica nas várias horas do dia (experiência 9).

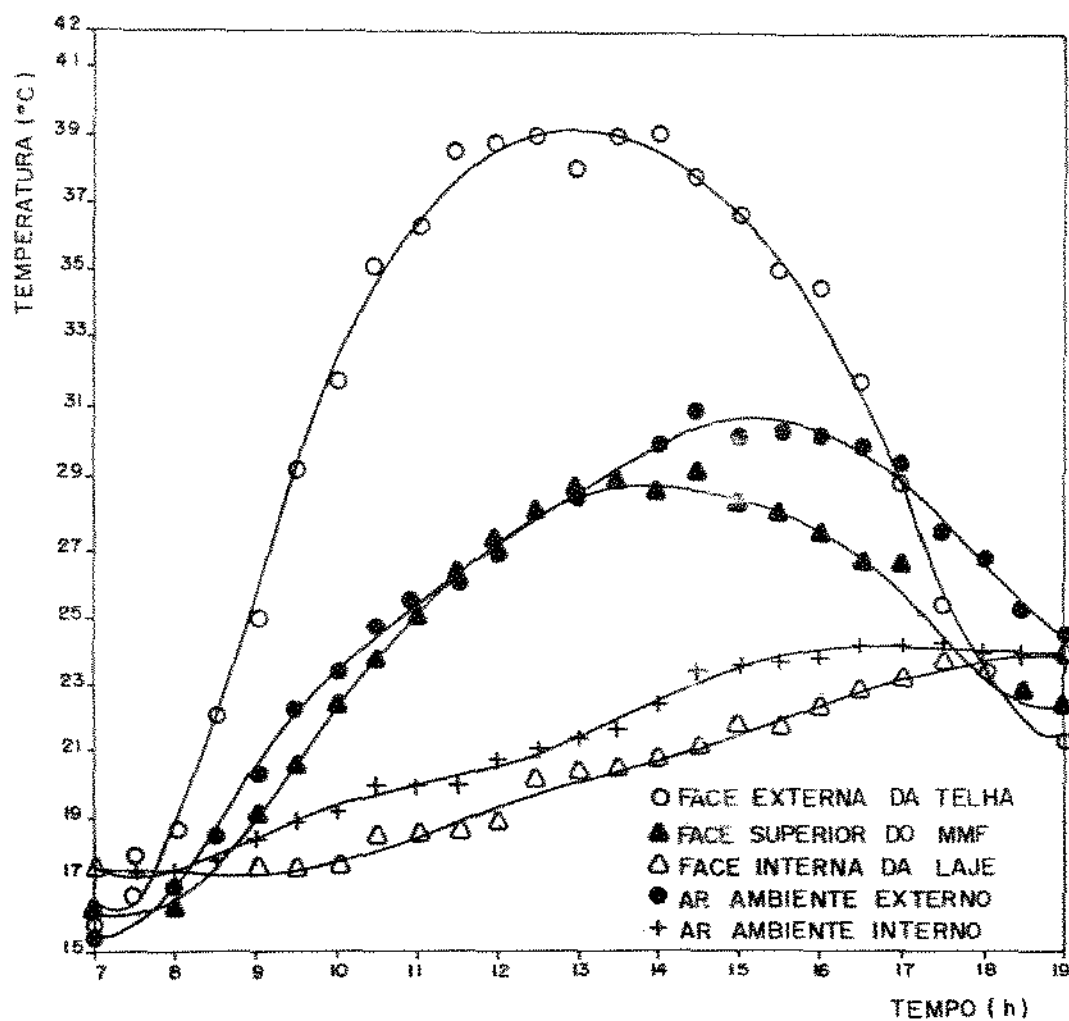


Figura 4.41 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 9).

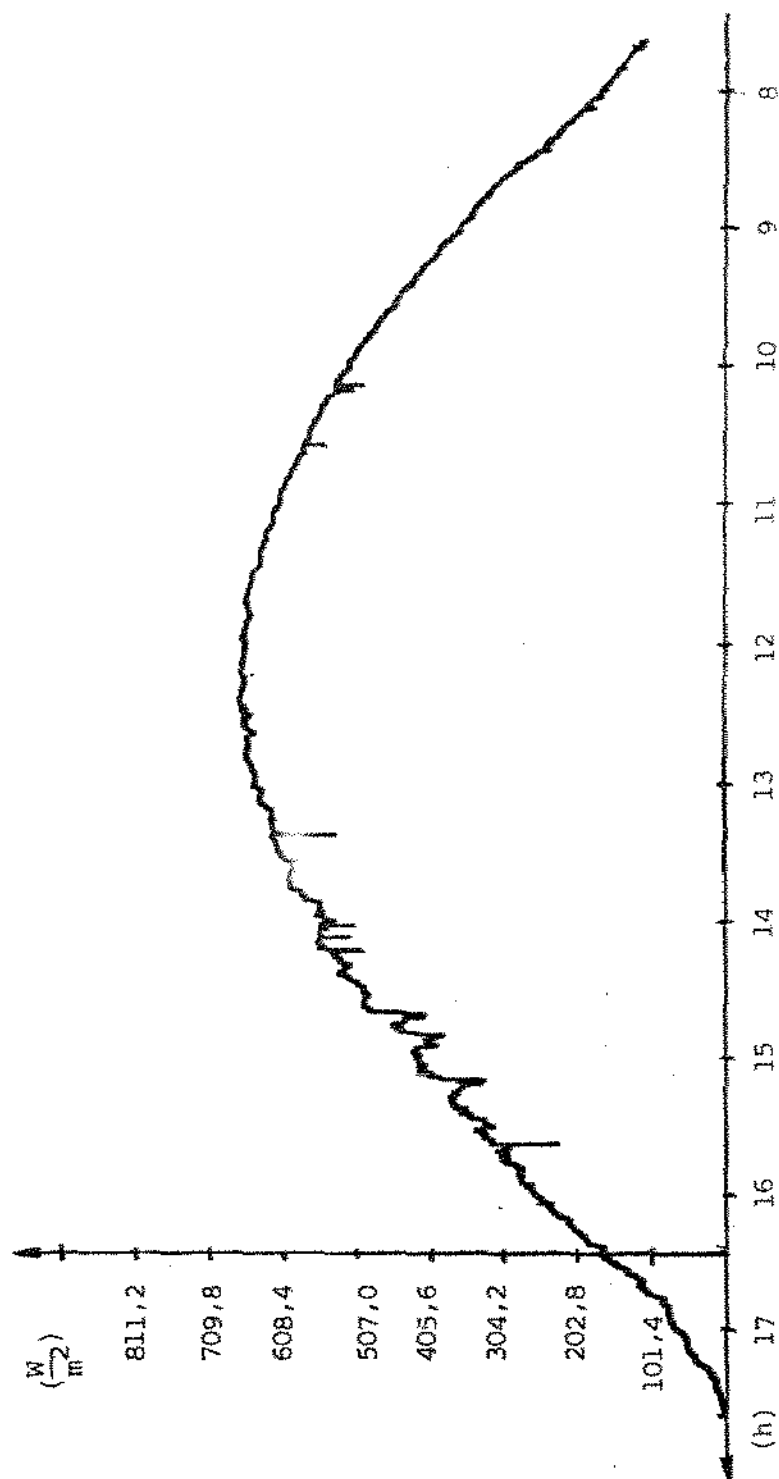


Figura 4.42 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 9 (radiação na horizontal).

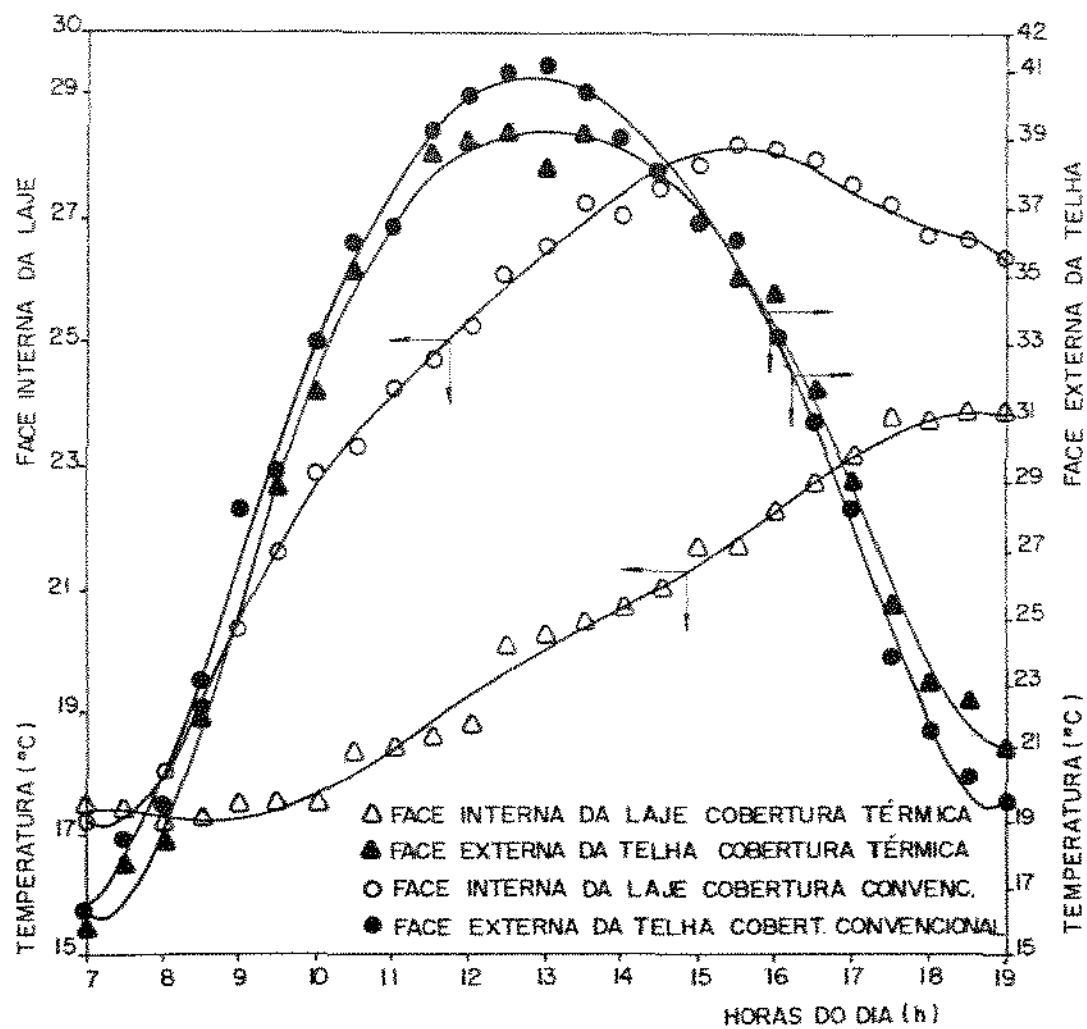


Figura 4.43 - Variação da temperatura da face externa da telha e da face interna da laje para a cobertura convencional e cobertura térmica (experiência 6 e 9).

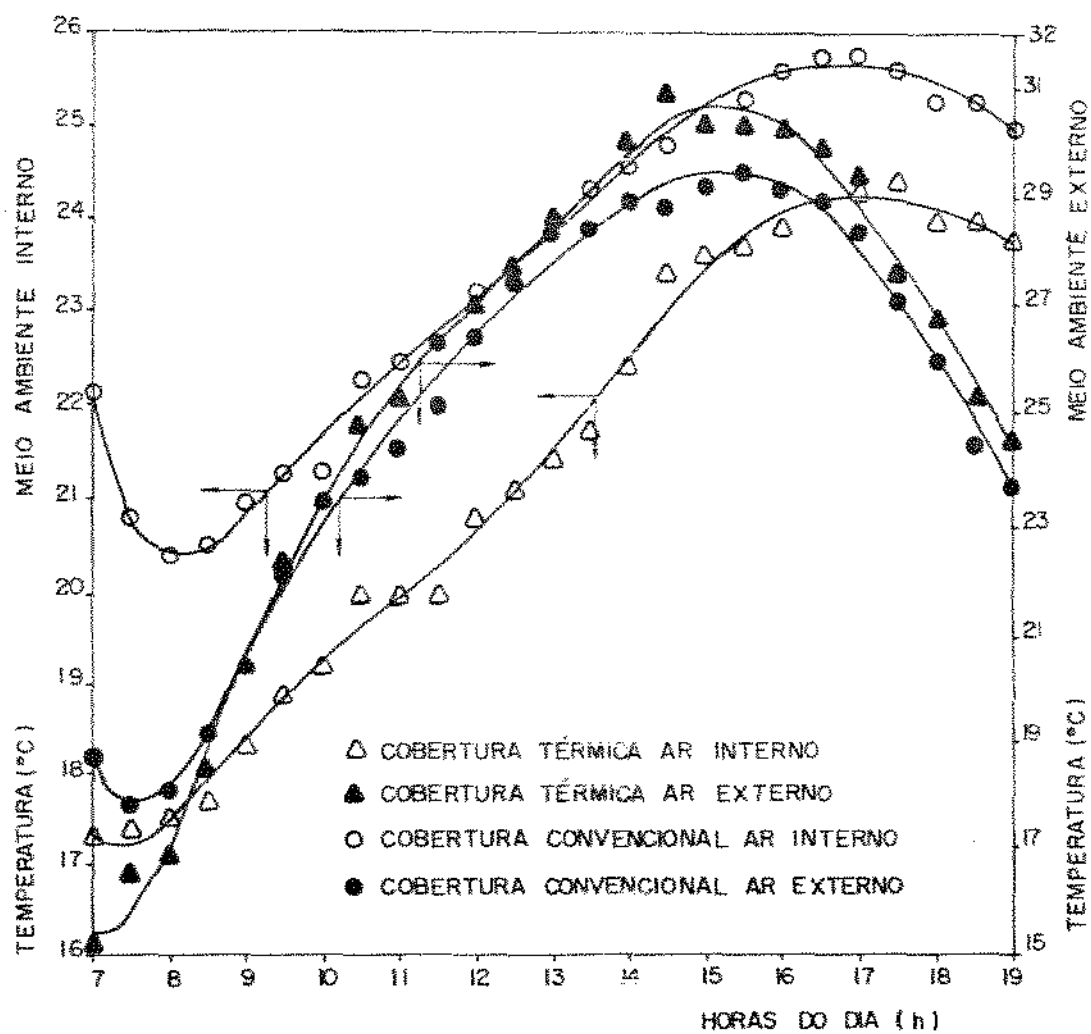


Figura 4.44 - Variação da temperatura do ar ambiente externo e interno para a cobertura convencional e cobertura térmica (experiência 6 e 9).

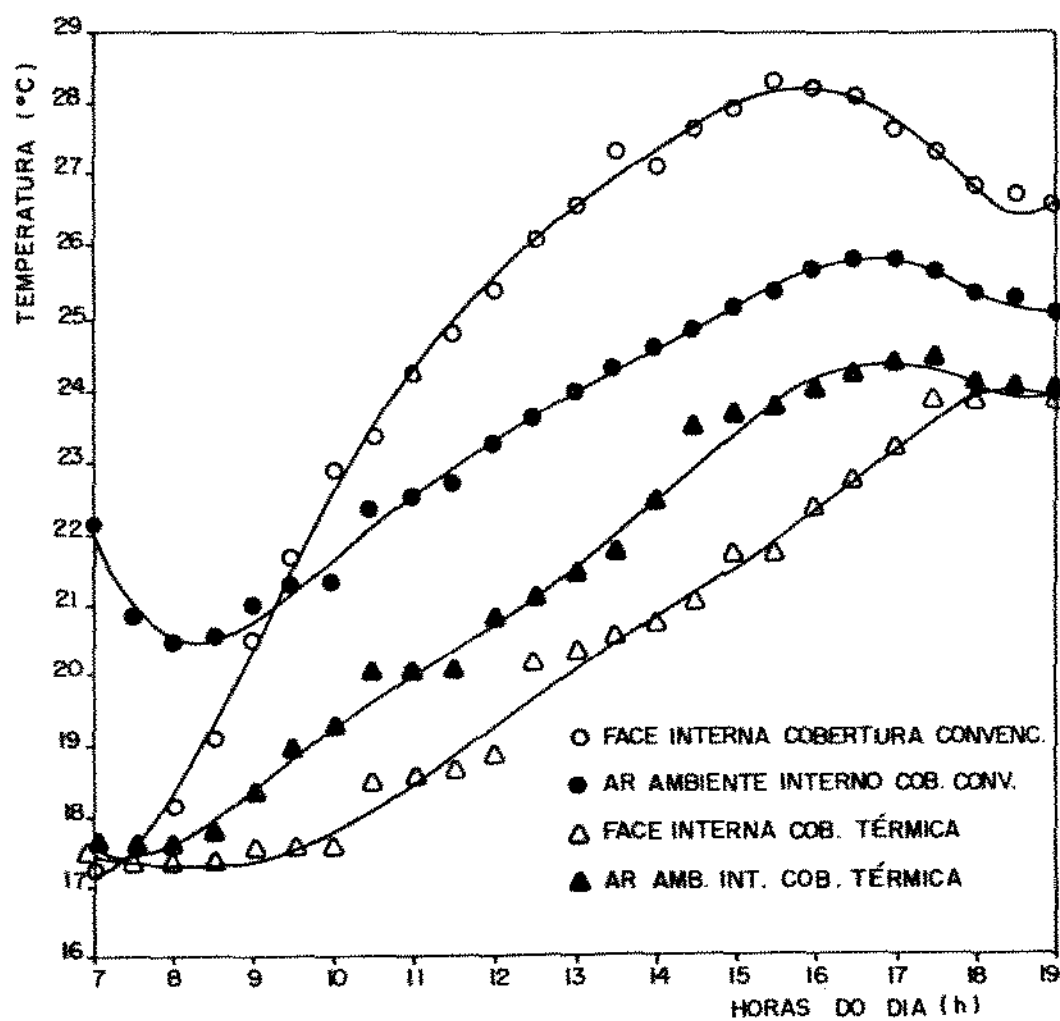


Figura 4.45 - Variação da temperatura da superfície interna da laje e do ar ambiente interno para a cobertura convencional e cobertura térmica (experiência 8 e 9).

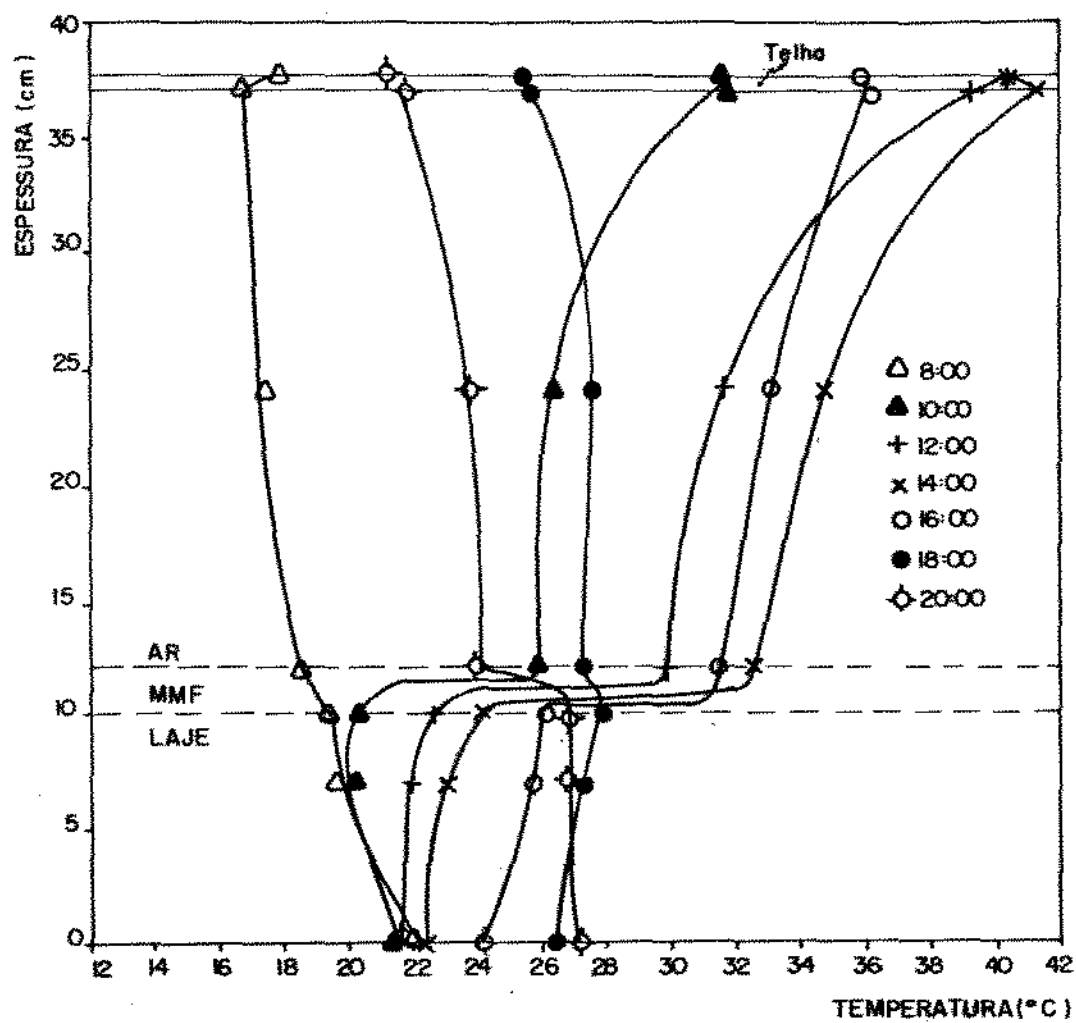
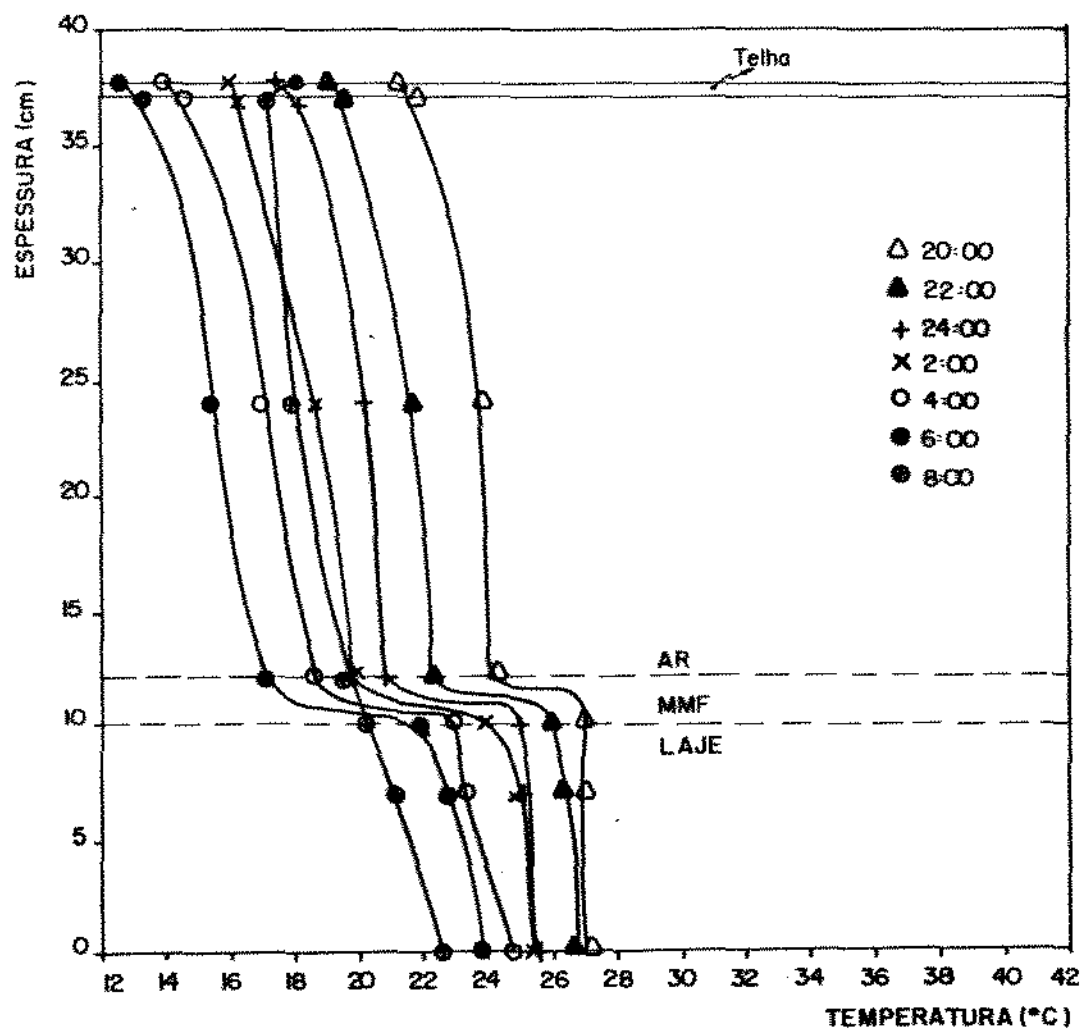


Figura 4.46 - Variação da temperatura ao longo da espessura de uma cobertura térmica nas várias horas do dia e da noite (experiência 15).



Continuação da Figura 4.46

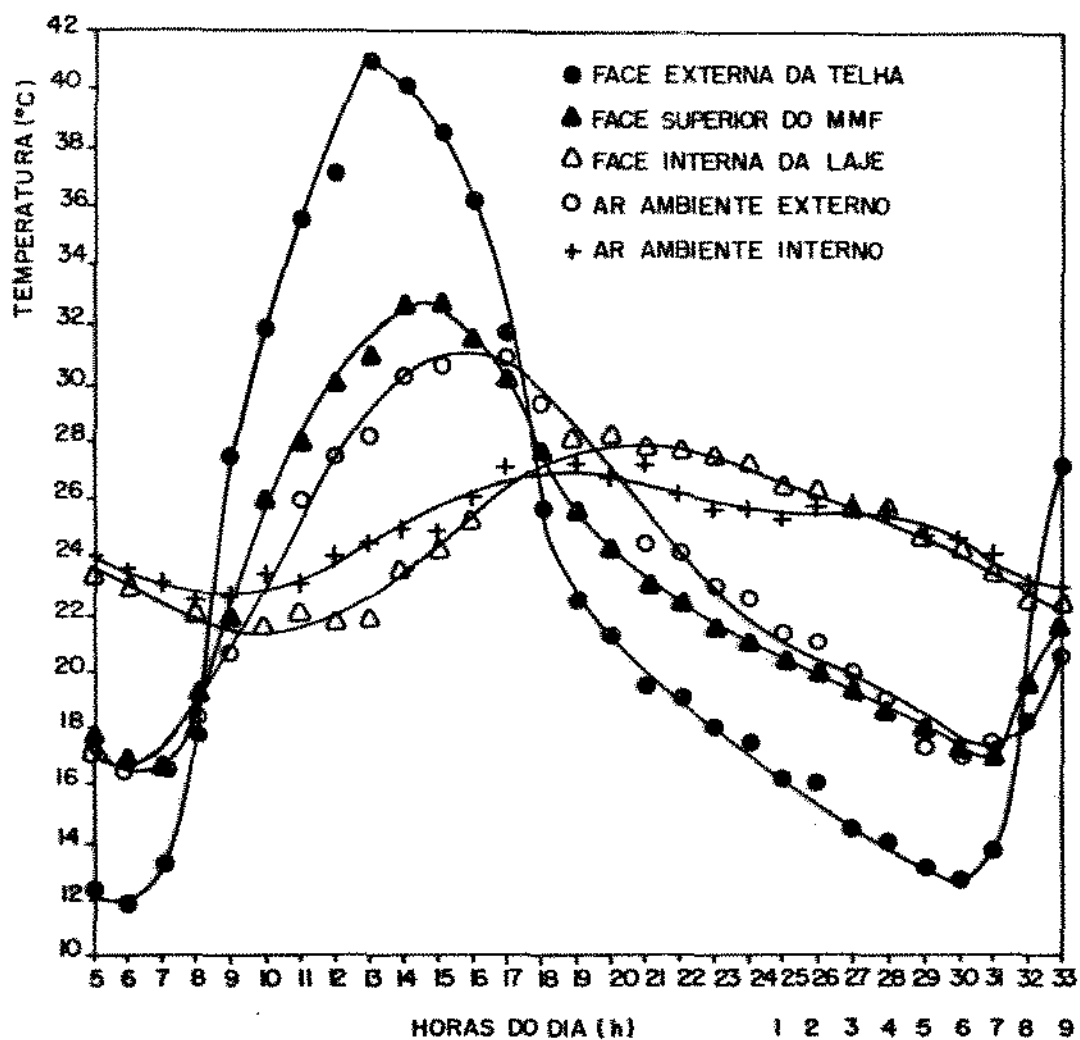


Figura 4.47 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica ao longo do dia e da noite (experiência 15).

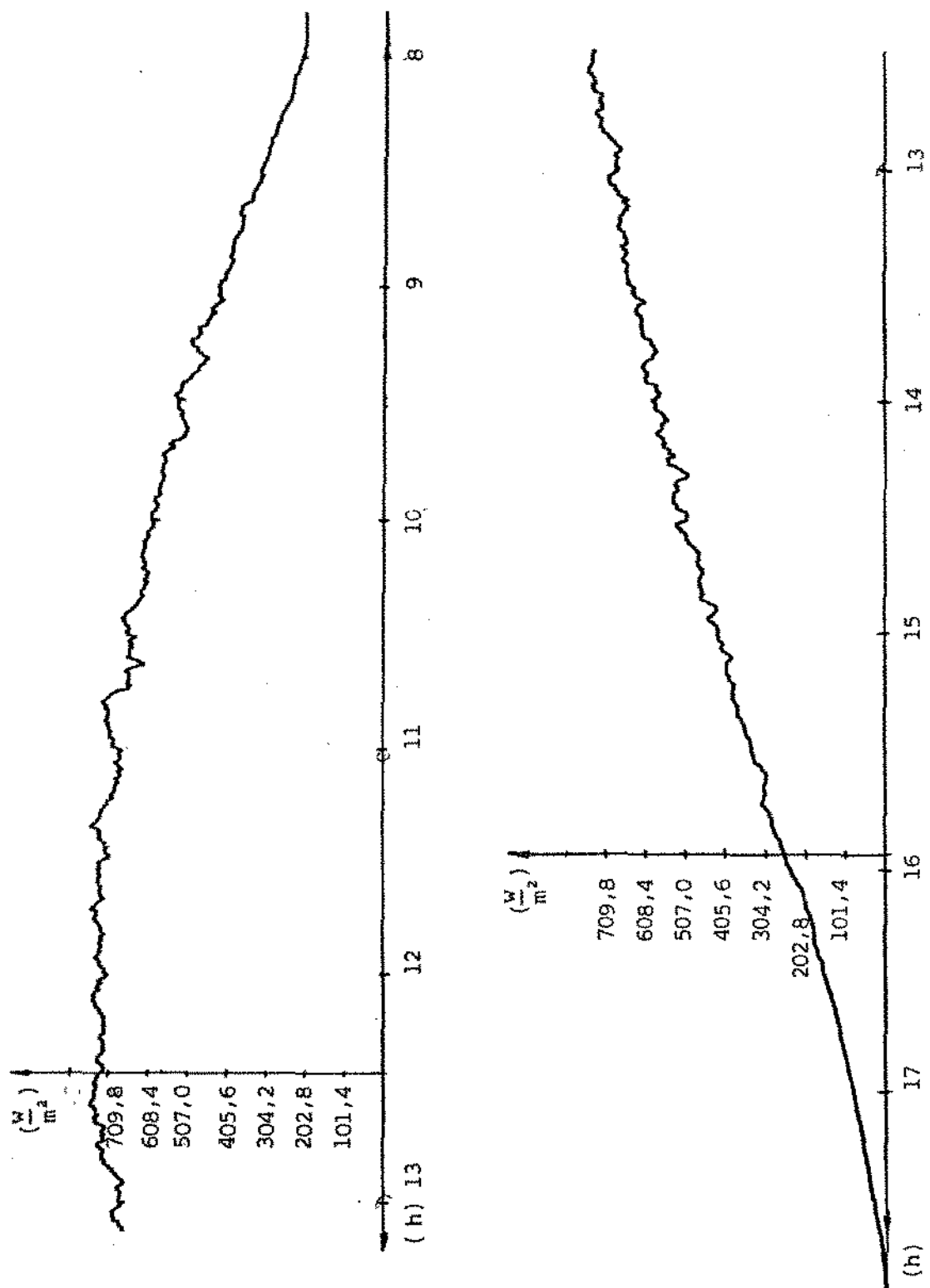


Figura 4.48 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 15 (radiação na horizontal).

#### 4.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Para que se possa avaliar o modelo analítico proposto, escolhemos os valores experimentais das seguintes experiências:

|                          |                                                             |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|
| PAREDE CONVENCIONAL -    | Experiência n <sup>o</sup> 7<br>(Figuras 4.23, 4.25, 4.27)  |
| PAREDE TÉRMICA -         | Experiência n <sup>o</sup> 14<br>(Figuras 4.24, 4.26, 4.28) |
| COBERTURA CONVENCIONAL - | Experiência n <sup>o</sup> 6<br>(Figuras 4.37, 4.38, 4.39)  |
| COBERTURA TÉRMICA -      | Experiência n <sup>o</sup> 9<br>(Figuras 4.40, 4.41, 4.42)  |

Na comparação utilizou-se na simulação os valores das propriedades já descritas nos itens

- 3.4.1 (a) - Tijolo
- 3.4.2 (a) - Telha
- 3.4.2 (b) - Ar Confinado
- 3.4.2 (c) - Laje
- Anexo 9 - Material de mudança de fase

Adotou-se como temperatura de mudança de fase da mistura de ATPEG, a temperatura de 23°C. Adotou-se também os perfis reais de temperatura obtidas experimentalmente para o ar externo à sala, e o perfil de radiação solar real registrada em cada experiência.

Com isto obteve-se os resultados mostrados nas figuras de 4.49 a 4.56.

Como nota-se, os resultados do modelo numérico e computacional reproduzem os resultados experimentais. Os desvios

apresentados na determinação dos perfis de temperatura, prendem-se a fatores avaliados e descritos a seguir:

a) Parede convencional (Figuras 4.49 e 4.50)

Observa-se um desvio máximo de  $4,7^{\circ}\text{C}$  as 16:00 horas causado pela não consideração da resistência de contato entre as paredes de  $1/2$  tijolo e de  $1/4$  de tijolo. Isto causa um desvio máximo de  $2,3^{\circ}\text{C}$  na determinação da temperatura da face interna da parede (Figura 4.50).

b) Parede térmica (Figuras 4.51 e 4.52)

Observa-se um desvio máximo de  $10,8^{\circ}\text{C}$  para as 16:00 horas. Este desvio se deve a combinação de três fatores: b.1) Temperatura de mudança de fase adotada com um valor fixo de  $23^{\circ}\text{C}$ , enquanto que na realidade tem-se uma faixa  $23 \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ ; b.2) calor latente de mudança de fase super estimado, pois nota-se pela curva das 16:00 horas que a frente de fusão ainda está presente na simulação, enquanto que experimentalmente verifica-se que todo o material de mudança de fase já está na fase líquida. b.3) As resistências de contato entre o tijolo externo e o material de mudança de fase, e este último com o tijolo interno. Estes fatores combinados causam um desvio máximo de  $4,5^{\circ}\text{C}$  na determinação da temperatura da face interna da parede (Figura 4.52).

c) Cobertura convencional (Figuras 4.53 e 4.54)

Observa-se um desvio máximo de  $2,5^{\circ}\text{C}$  às 8:00 h causado pelo valor médio das propriedades termofísicas do conjunto com face ao ar confinado. Isto implicou num desvio máximo de  $1,4^{\circ}\text{C}$  no cálculo da temperatura da superfície interna da Laje (Figura 4.54). Os resultados experimentais (Fig. 4.53) para às 16:00 e 18:00 horas, mostraram que a partir deste horário a camada de ar

confinado, entre laje e telha, não funciona mais como uma resistência à passagem de calor para o ambiente interno, pois a temperatura da telha está num valor bem próximo àquela verificada na superfície interna da laje.

d) Cobertura térmica (Figura 4.55 e 4.56)

Observa-se um desvio máximo de  $8,4^{\circ}\text{C}$  devido a quatro fatores combinados: d.1) valor médio adotado para as propriedades termofísicas do conjunto; d.2) Temperatura de mudança de fase adotada com um valor fixo de  $23^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a realidade tem-se uma faixa  $23 \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ ; d.3) Calor latente de mudança de fase super estimado; d.4) A resistência de contato entre o material de mudança de fase e a laje. Isto leva a um desvio máximo de  $2,9^{\circ}\text{C}$  na determinação da temperatura da face interna da laje (Figura 4.56). Observa-se também que pela consideração feita na modelagem teórica, de ser fixa a temperatura de mudança de fase, a resposta do modelo parece dar maior importância a resistência térmica imposta pela camada de ar confinado, o que não representa a realidade, visto que, por exemplo, às 16:00 horas, o gradiente real apresentado pelos dados experimentais é muito mais que aquele verificado na modelagem. Mostrando com isto que nos horários onde a camada de ar confinado não mais "segura o calor", a camada de material de mudança de fase oferecerá a resistência necessária.

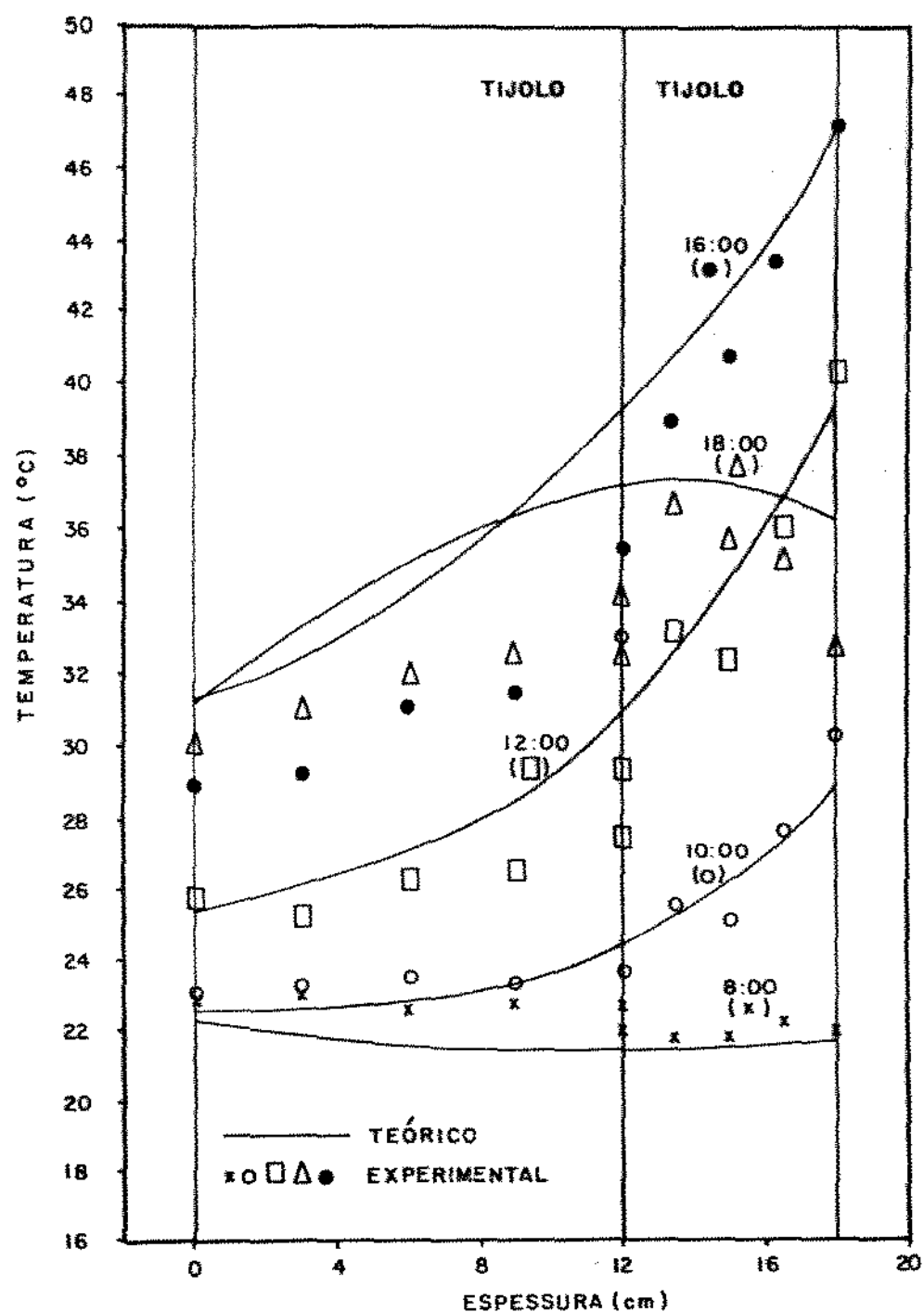


Figura 4.49 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional (Experiência 7)

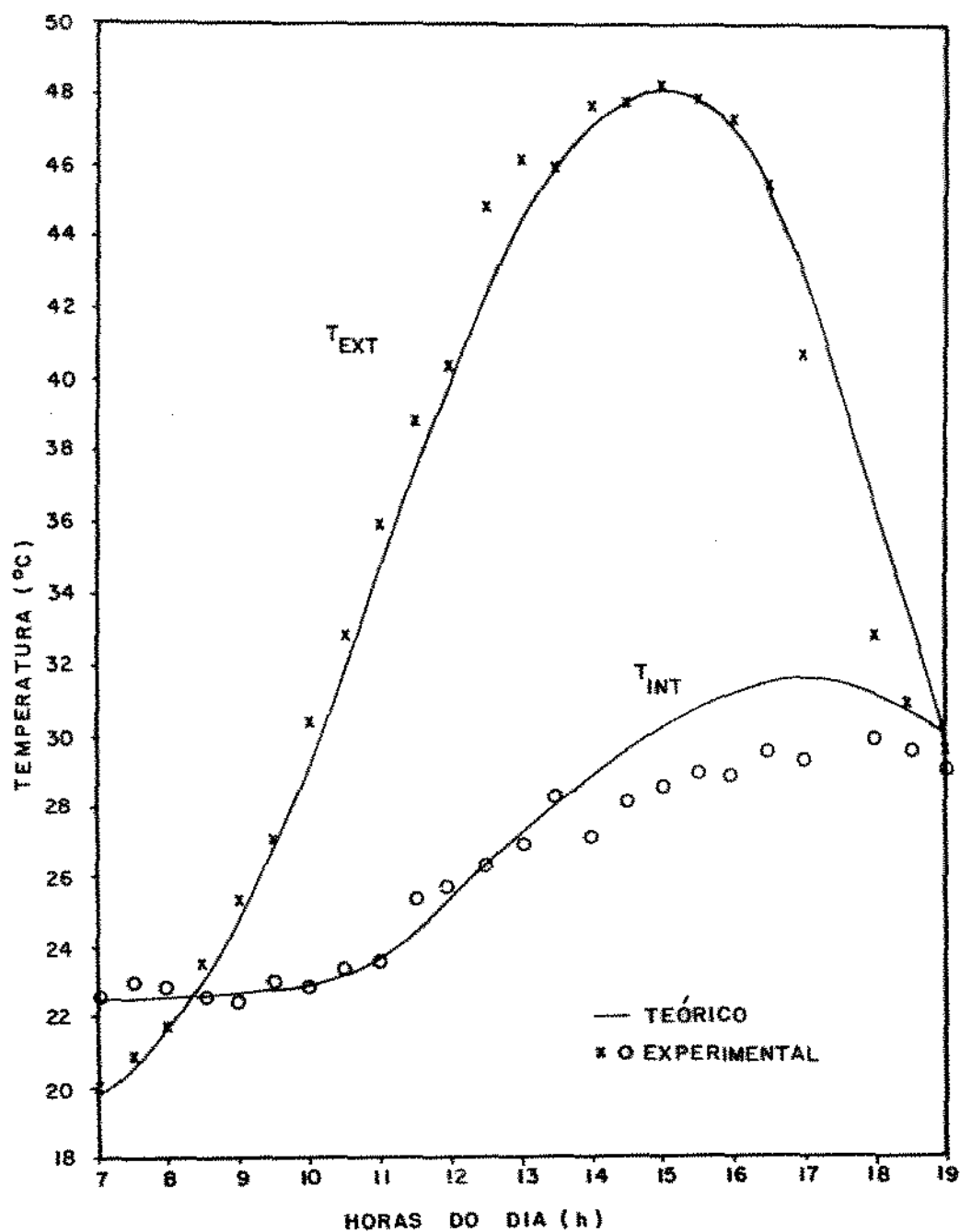


Figura 4.50 - Curvas teórica e experimentais da variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (Experiência 7) ( $T_{EXT}$  - Face Externa,  $T_{INT}$  Face Interna)

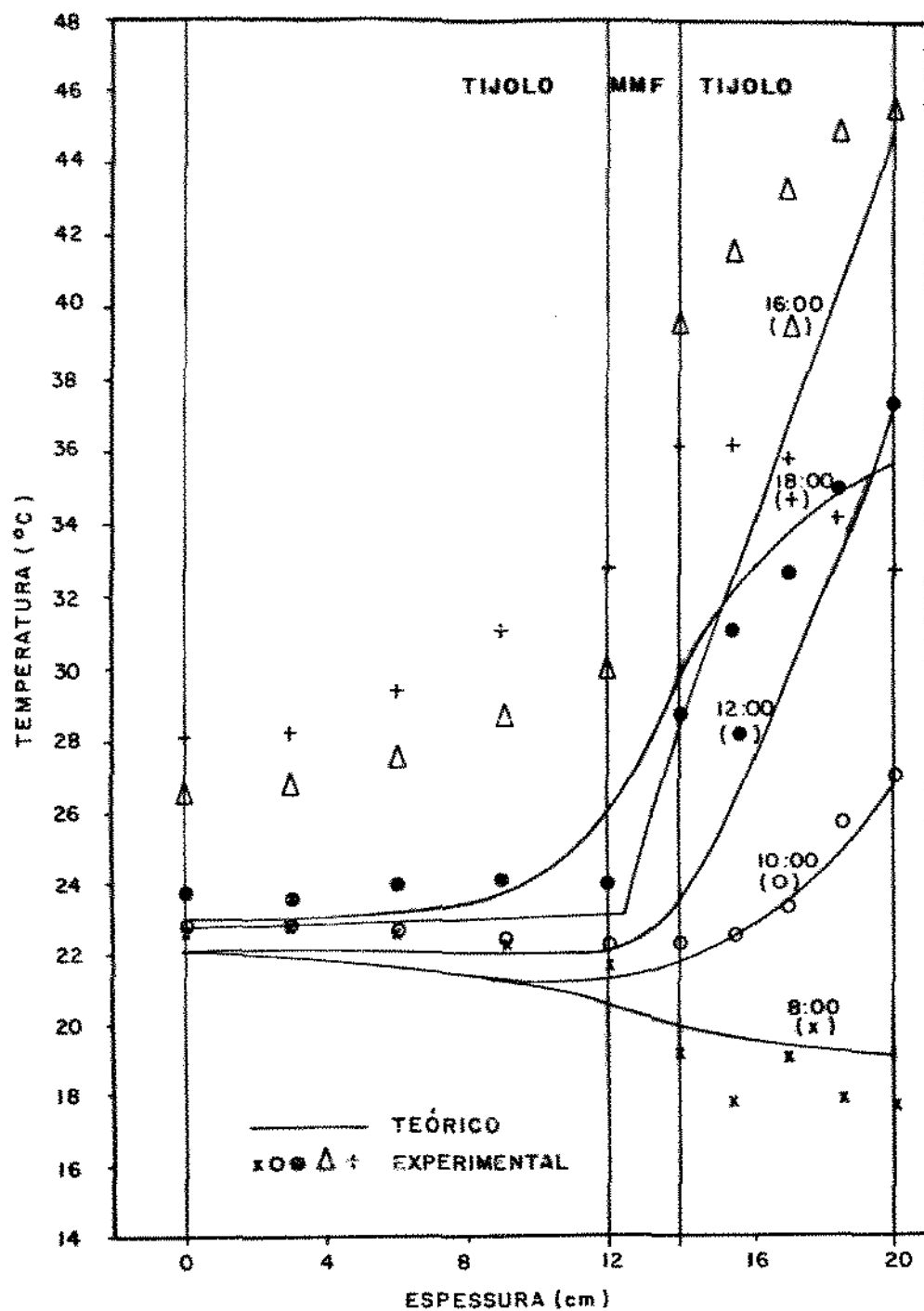


Figura 4.51 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica (Experiência 14).

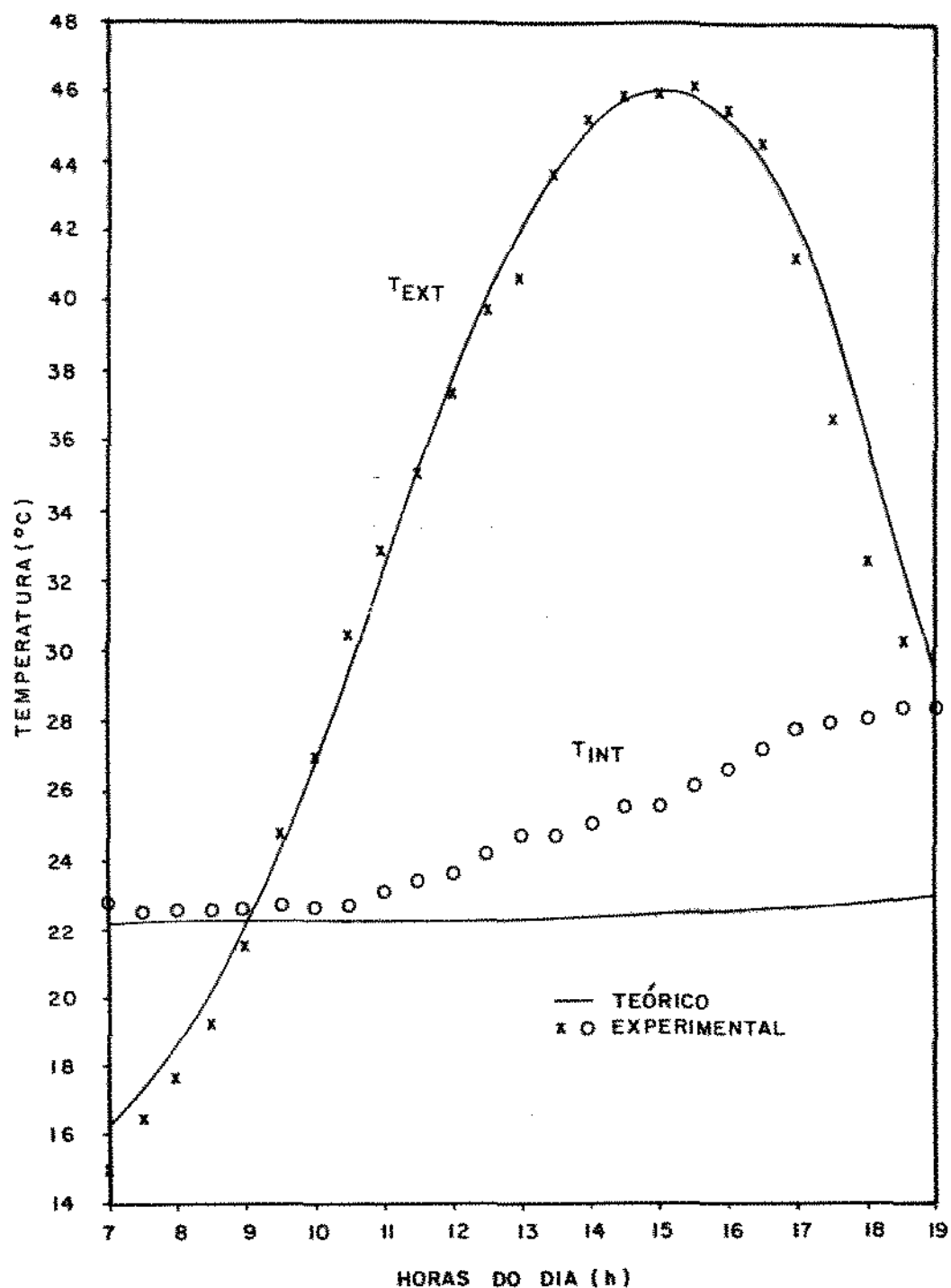


Figura 4.52 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (Experiência 14) ( $T_{EXT}$  - Face Externa,  $T_{INT}$  Face Interna)

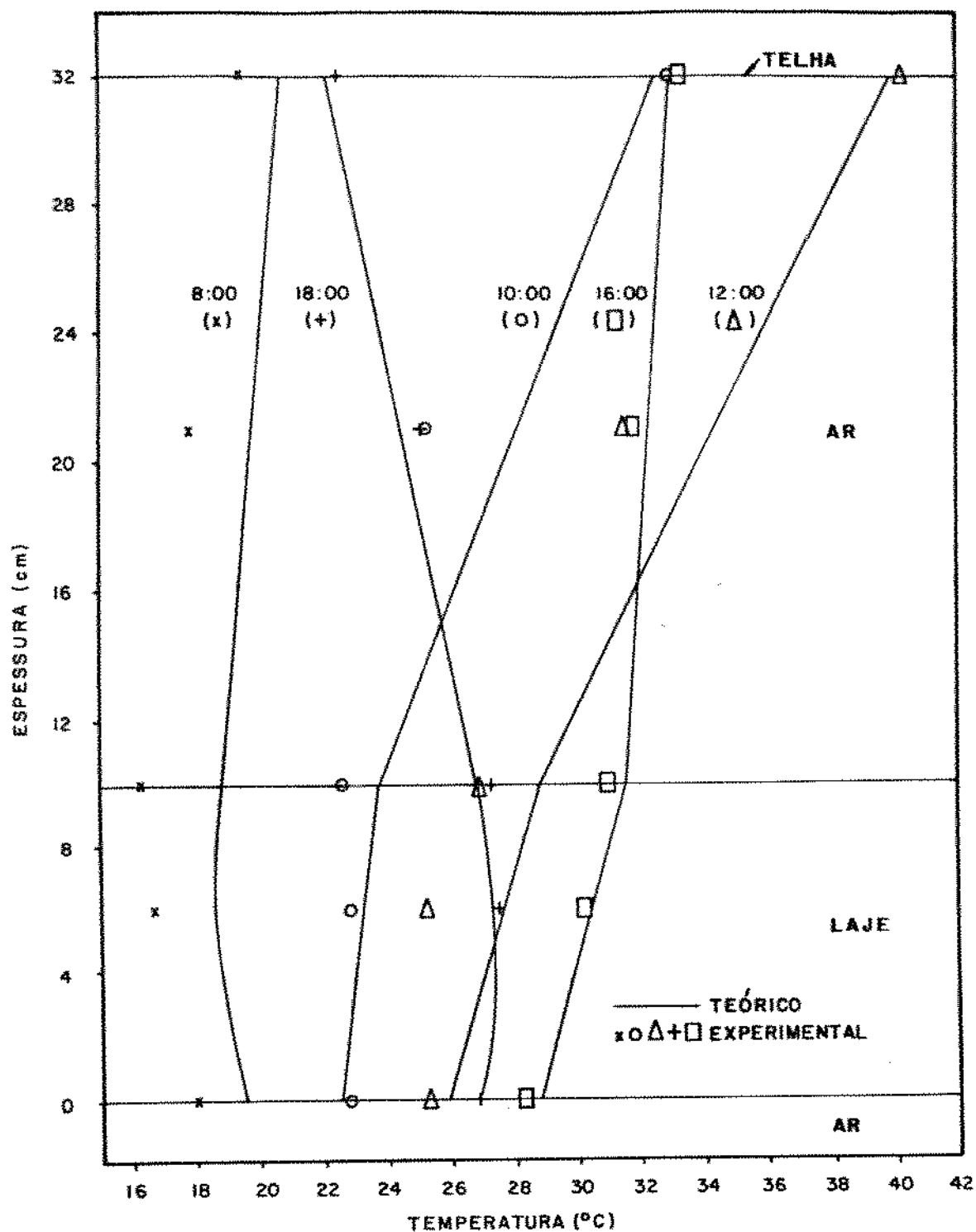


Figura 4.53 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional (Experiência 6)

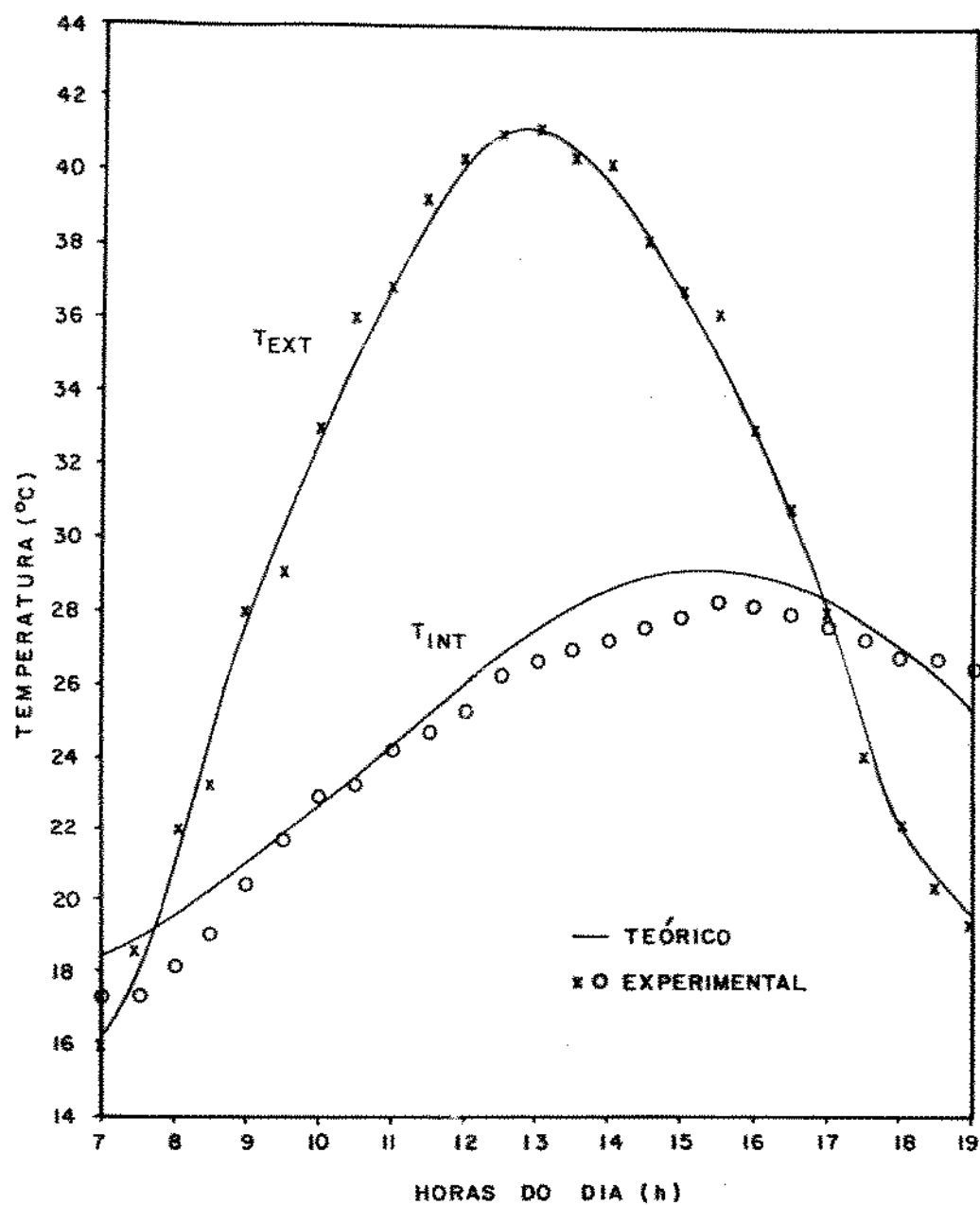


Figura 4.54 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura convencional ao longo do dia  
Experiência 6) ( $T_{EXT}$  - Face Externa,  $T_{INT}$  Face Interna)

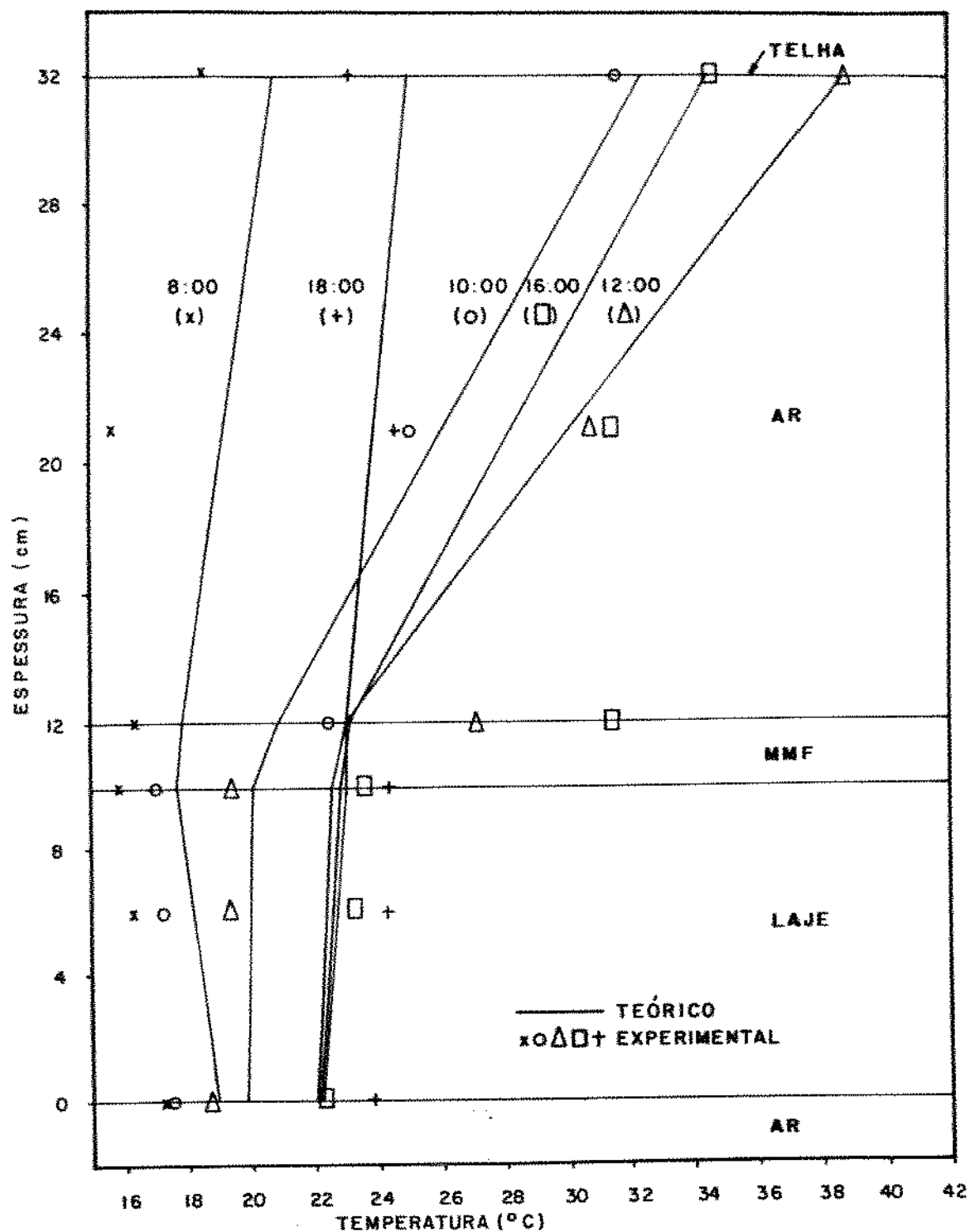


Figura 4.55 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura com a espessura da cobertura térmica (Experiência 9)

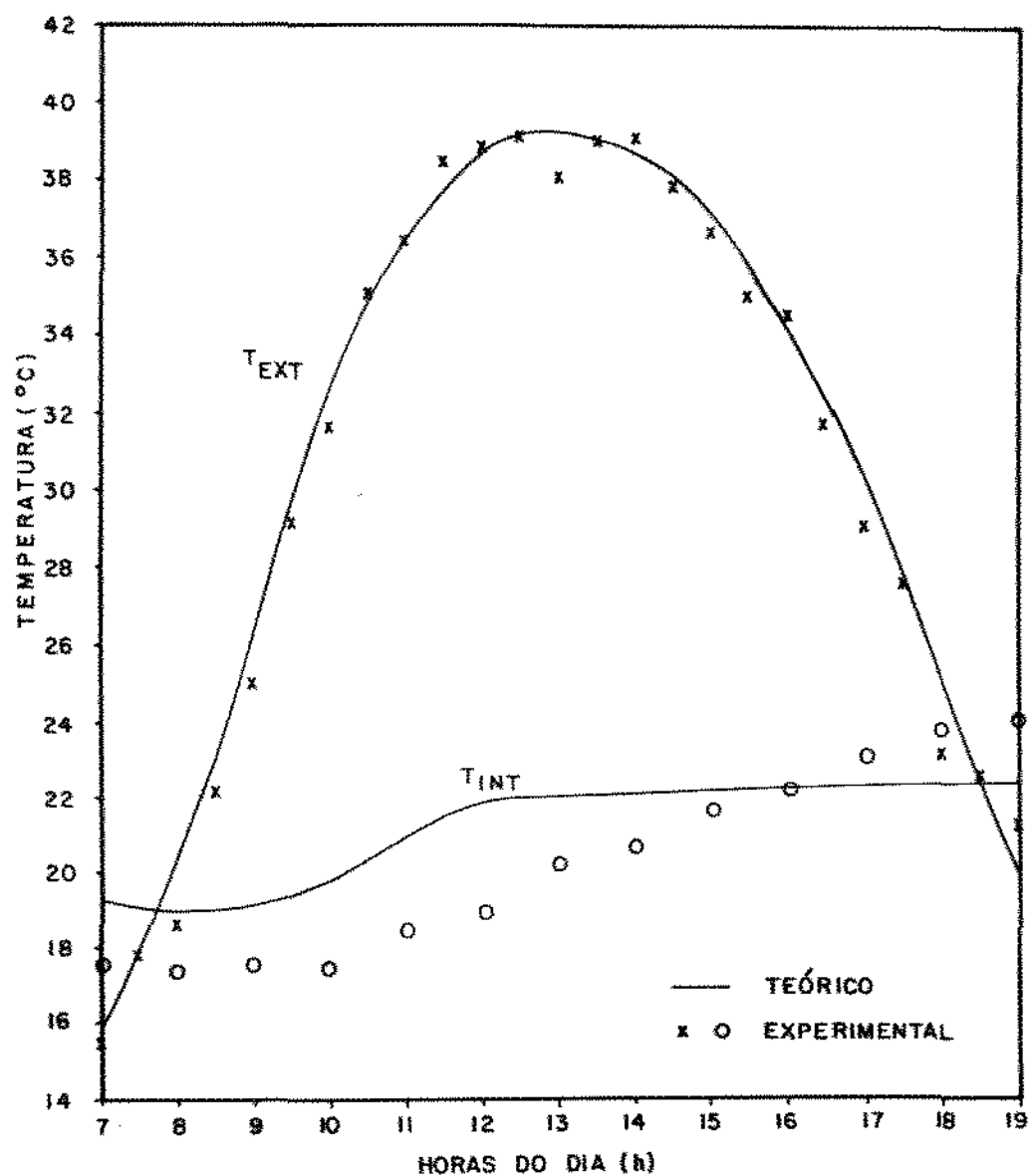


Figura 4.56 - Curvas teóricas e experimentais da variação da temperatura para a cobertura térmica ao longo do dia (Experiência 9) ( $T_{EXT}$  - Face Externa,  $T_{INT}$  - Face Interna)

## CAPÍTULO 5

PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO DE AR CONDICIONADO PARA O CASO DE  
PAREDES E TETO CONVENCIONAIS E PAREDES E TETO TÉRMICOS

## 5.1 - LEVANTAMENTO DA CARGA TÉRMICA DE VERÃO DO CASO CONVENCIONAL E DO CASO TÉRMICO

Utiliza-se como dia característico o dia 240, médio entre o dia da experiência 7 (parede convencional), experiência 14 (parede térmica) e experiência 13 (cobertura térmica). Isto possibilitou uma avaliação entre os valores recomendados por Carrier [40] e os valores obtidos experimentalmente.

O ambiente estudado é o visto na Figura 5.1 construído com os mesmos materiais utilizados nos ensaios. Paredes de tijolos comuns, para acabamento de tipo a vista. Assentados com argamassa mista. Cobertura - telhas de cimento amianto sem beiral (platibanda). Forro laje pré-moldada (vigas de cimento armado e tabelas cerâmicas). Espessura 10 cm.

Tabela e demais condições de referências utilizadas são as recomendadas por CARRIER [40].

Condições de conforto térmico adotados:

Temperatura de bulbo seco  $23^{\circ}\text{C}$   
Temperatura de bulbo úmido  $16^{\circ}\text{C}$   
Umidade relativa 50 %  
Condições externas do ar (referência 23)  
Temperatura de bulbo seco  
Média Máxima =  $28,4^{\circ}\text{C}$   
Média Mínima =  $14,9^{\circ}\text{C}$

Umidade relativa média 64%

Local: Campinas Latitude  $22^{\circ} 53'$  Sul  
Altitude 614 m

Horário solar crítico levantado 15:00 horas

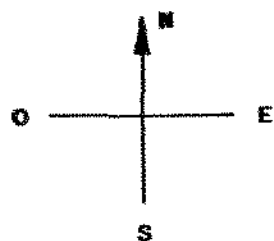
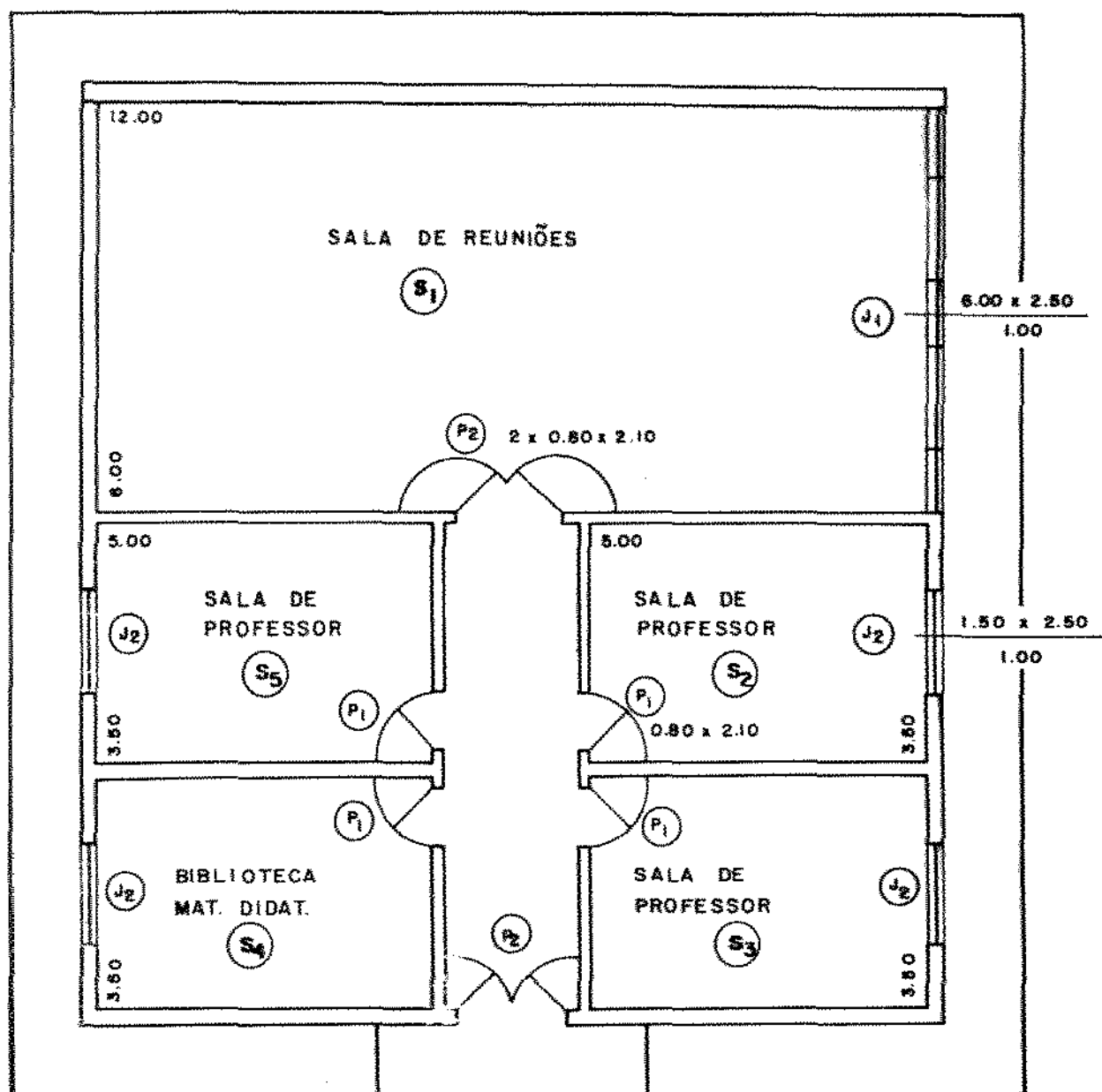


Figura 5.1 - Planta baixa para o levantamento da carga térmica.  
(pé direito = 3,50 m)

5.1.1. Roteiro de cálculos para o levantamento da carga térmica para o caso de paredes e teto convencionais

a) Vidros

a.1) Insolação

$$\text{Janelas este} \quad q = 35 \text{ kcal/h m}^2$$

$$\text{Janelas Oeste} \quad q = 404 \text{ kcal/h m}^2$$

Tipo de vidro: vidro simples 3mm cor clara com persianas interiores ( $f = 0,65$ )

Áreas da janela ( $A_{ji}$ )

$$A_{j_1} = 6 \times 2,5 = 15 \text{ m}^2$$

$$A_{j_2} = 1,5 \times 2,5 = 3,75 \text{ m}^2$$

Calor que penetra na sala  $i$  ( $QS_i = A_i \times q_i \times f$ )

$$QS_1 = 341,25 \text{ kcal/h}$$

$$QS_2 = 85,31 \text{ kcal/h}$$

$$QS_3 = 85,31 \text{ kcal/h}$$

$$QS_4 = 984,75 \text{ kcal/h}$$

$$QS_5 = 984,75 \text{ kcal/h}$$

a.2) Condução ( $Q = U \times A_{ji} \times \Delta T$ )

$$U = 5,5 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_{\text{EXT}} - T_{\text{INT}} = 28,4 - 23 = 5,4^\circ\text{C}$$

$$QS_1 = 445,5 \text{ kcal/h}$$

$$QS_2 = QS_3 = QS_5 = 111,58 \text{ kcal/h}$$

b) Paredes

b.1) Paredes internas ambiente todo condicionado (calor por condução igual a zero)

b.2) Paredes externas (condução)

$$QS_i = f \times AS_i \times \Delta T \text{ eq.}$$

13:00 Horas  $f = 1,0$

para parede de 1/2 tijolo + 1/4 tijolo sem revestimento:

Peso por unidade de área =  $288 \text{ kg/m}^2$

Coeficiente global de troca de calor  $U = 1,95 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Diferença equivalente de temperatura

Parede Norte =  $13,9 \text{ } ^\circ\text{C}$

Parede Sul =  $4,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Parede Este =  $7,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Parede Oeste =  $10,6 \text{ } ^\circ\text{C}$

Área de parede segundo a orientação (APj)

Sala um ( $S_1$ )

APN =  $42 \text{ m}^2 \Rightarrow 1.138,41 \text{ kcal/h}$

APO =  $21 \text{ m}^2 \Rightarrow 180,18 \text{ kcal/h}$

APE =  $6 \text{ m}^2 \Rightarrow 84,24 \text{ kcal/h}$

Total =  $1.402,80 \text{ kcal/h}$

Sala Dois ( $S_2$ )

APE =  $8,8 \text{ m}^2 \Rightarrow 123,55 \text{ kcal/h}$

Sala Tres ( $S_3$ )

APE =  $8,8 \text{ m}^2 \Rightarrow 123,55 \text{ kcal/h}$

APS =  $17,5 \text{ m}^2 \Rightarrow 150,15 \text{ kcal/h}$

Total =  $273,70 \text{ kcal/h}$

Sala Quatro ( $S_4$ )

APS =  $17,5 \text{ m}^2 \Rightarrow 150,15 \text{ kcal/h}$

APO =  $8,8 \text{ m}^2 \Rightarrow 181,90 \text{ kcal/h}$

Total =  $331,05 \text{ kcal/h}$

Sala Cinco ( $S_5$ )

$$APO = 8,8 \text{ m}^2 \Rightarrow 181,90 \text{ kcal/h}$$

c) Teto

Calor que penetra por condução ( $Q = U \times S_i \Delta T$ )

Coeficiente global de troca de calor  $U=0,83 \text{ kcal/h m}^2\text{°C}$

Diferença de temperatura equivalente  $19^\circ\text{C}$

Área do teto por sala ( $S_i$ ) e coeficiente ( $C_i$ )

$$S_1 = 72 \text{ m}^2 \Rightarrow 1.128,87 \text{ kcal/h}$$

$$S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 17,5 \text{ m}^2 \Rightarrow 274,38 \text{ kcal/h}$$

$$C_1 = 14 \text{ m}^2 \Rightarrow 219,50 \text{ kcal/h}$$

d) Calor devido a pessoas

Calor sensível = 63 kcal/h Pessoa

Calor Latente = 35 kcal/h Pessoa

Sala 1 (15 Pessoas)

Calor sensível = 945 kcal/h

Calor Latente = 525 kcal/h

Salas 2, 3, 4, 5 ( 2 pessoas cada )

Calor sensível = 126 kcal/h

Calor Latente = 75 kcal/h

e) Iluminação (Potência mínima  $25 \text{ W/m}^2$ )

|                 |               |          |
|-----------------|---------------|----------|
| Sala 1          | 1.548 kcal/h  |          |
| Sala 2, 3, 4, 5 | 376,25 kcal/h | Por sala |
| Corredor        | 301,0 kcal/h  |          |

f) Ar necessário para a higienização

50 m<sup>3</sup>/ pessoa

Sala 1 750 m<sup>3</sup>/h

Sala 2, 3, 4, 5 100 m<sup>3</sup>/h Por sala

g) Total da carga Térmica para a parede e teto convencional

g.1) Calor Sensível

TABELA 5.1 - Carga térmica sensível total (kcal/h)

| SALA            | S1      | S2      | S3      | S4      | S5      | C1     |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| INSOLAÇÃO VIDRO | 341,25  | 85,31   | 85,31   | 984,75  | 984,75  | —      |
| CONDUÇÃO VIDRO  | 445,50  | 111,38  | 111,38  | 111,38  | 111,38  | —      |
| PAREDE EXTERNA  | 1402,80 | 123,55  | 273,70  | 332,03  | 181,90  | —      |
| TETO            | 1128,87 | 274,38  | 274,38  | 274,38  | 274,38  | 219,50 |
| ILUMINAÇÃO      | 1548,00 | 376,25  | 376,25  | 376,25  | 376,25  | 301,00 |
| PESSOAS         | 945,00  | 126,00  | 126,00  | 126,00  | 126,00  | —      |
| TOTAL           | 5811,42 | 1096,87 | 1247,02 | 2204,81 | 2054,66 | 520,50 |

TOTAL GERAL = 12.935,28 kcal/h

FATOR DE SEGURANÇA = 10%

CARGA TÉRMICA SENSÍVEL  $\cong$  14.229 kcal/h

g.2) Calor latente

TABELA 5.2 - Carga Térmica latente total (kcal/h)

| SALA    | S1  | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|---------|-----|----|----|----|----|----|
| PESSOAS | 525 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |

TOTAL GERAL = 900 kcal/h

FATOR DE SEGURANÇA = 10%

CARGA TÉRMICA LATENTE  $\cong$  990 kcal/h

g.3) Carga térmica total, e fator de calor sensível  
(FCS)

Carga total = Calor sensível + Calor latente =

= 15.219 kcal/h

$$FCS = \frac{Q \text{ sensível}}{Q \text{ total}} = 0,9349$$

5.1.2. Roteiro de cálculo para levantamento da carga térmica para o caso de paredes e teto térmicos

a) Considerações para a simulação computacional

A alteração no roteiro de cálculo só é feito nos itens que se relacionam com as paredes e tetos, permanecendo os demais itens inalterados, para tanto considera-se que:

- É colocada uma camada de 2,0 cm de material de mudança de fase nas paredes externas e teto conforme visto nas figuras 4.2 e 4.3.
- Levanta-se a carga térmica referente a estas paredes e tetos, conforme o modelo proposto no itens 3.4.1 e 3.4.2
- Utiliza-se como material de mudança de fase a mistura de ATPEG conforme visto anexo 9.

- Utiliza-se todas as demais condições iguais as utilizadas no levantamento de carga térmica da parede convencional.

b) Resultados da simulação computacional

Os resultados encontrados para a carga térmica devido as paredes externas e teto são iguais a zero, para todas as horas solares consideradas. Esta afirmação é confirmada pelos valores apresentados pela tabela 5.3, que mostra a espessura já fundida do material de mudança de fase até as 18:00 horas (todas menores que 2,0 cm) retirados dos dados de saída da simulação computacional.

TABELA 5.3 - Valores da espessura da camada de material de mudança de fase, na fase líquida, às 18:00 horas

| PAREDE<br>OU<br>TETO | NORTE | SUL | ESTE | OESTE | TETO |
|----------------------|-------|-----|------|-------|------|
| ESPESSURA<br>(cm)    | 1,7   | 0,4 | 1,7  | 1,9   | 1,3  |

c) Carga térmica total para a parede e teto térmico

c.1) Calor sensível

TABELA 5.4 - Carga térmica sensível total (kcal/h)

| SALA            | S1      | S2      | S3     | S4      | S5      | C1     |
|-----------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| INSOLAÇÃO VIDRO | 341,25  | 85,31   | 85,31  | 984,75  | 984,75  | —      |
| CONDUÇÃO VIDRO  | 445,50  | 111,38  | 111,38 | 111,38  | 111,38  | =      |
| PAREDE EXTERNA  | —       | —       | —      | —       | —       | —      |
| TETO            | —       | —       | —      | —       | —       | —      |
| ILUMINAÇÃO      | 1548,00 | 376,25  | 376,25 | 376,25  | 376,25  | 301,00 |
| PESSOAS         | 945,00  | 126,00  | 126,00 | 126,00  | 126,00  | —      |
| TOTAL           | 3279,75 | 698,947 | 698,94 | 1598,38 | 1598,38 | 301,00 |

TOTAL GERAL = 8175,39 kcal/h

FATOR DE SEGURANÇA = 10%

CARGA TÉRMICA SENSÍVEL  $\cong$  8993 kcal/h

c.2) Calor Latente

TABELA 5.5 - Carga térmica latente total

| SALA    | S1  | S2 | S3 | S4 | S5 | C1 |
|---------|-----|----|----|----|----|----|
| PESSOAS | 525 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |

TOTAL GERAL = 900 kcal/h

FATOR DE SEGURANÇA = 10%

CARGA TÉRMICA SENSÍVEL  $\cong$  990 kcal/h

c.3) Carga térmica total, e fator de calor sensível (FCS) Carga Total = Calor sensível + Calor latente = 9983 kcal/h  
FCS = 0,901

## 5.2. CALCULO DA CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO E DA POTÊNCIA DO SISTEMA DE AR CONDICIONADO

Considera-se um sistema de ar condicionado com retorno de ar de higienização.

Levantou-se a relação entre a capacidade de refrigeração necessária e a potência elétrica total consumida pelos aparelhos de ar condicionado chegando-se ao valor médio de 2,6. As Referências consultadas foram: linha SG STARCO; HITACHI; COLDEXTRANE; GENERAL ELETRIC DO BRASIL; PHILCO, E SPRINGER.

Os sistemas são calculados para atender cada sala com aparelhos individuais ou por um sistema central de ar condicionado.

### a) Sistema de ar condicionado com retorno

#### a.1) Sistema central para paredes e teto convencionais

|                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| MASSA DE AR INSUFLADO       | = 1,502 kg/s             |
| MASSA DE AR DE RETORNO      | = 1,137 kg/s             |
| MASSA DE AR DE RENOVAÇÃO    | = 0,365 kg/s             |
| CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO  | = 25,0 kW (21531 kcal/h) |
| POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA | = 9,7 kW                 |

#### a.2) Sistema com aparelhos individuais para paredes e tetos convencionais

TABELA 5.6 - Massa de ar capacidade de refrigeração e potência dos aparelhos de ar condicionado para paredes e tetos convencionais

| SALA  | MASSA DE AR (kg/s) |         |           | CAPACIDADE DE REFRIGERAMENTO (kW) | POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA (kW) |
|-------|--------------------|---------|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|
|       | INSUFLADO          | RETORNO | RENOVAÇÃO |                                   |                                  |
| S1    | 0,707              | 0,469   | 0,238     | 13,01                             | 5,0                              |
| S2    | 0,134              | 0,102   | 0,032     | 2,15                              | 0,83                             |
| S3    | 0,152              | 0,120   | 0,032     | 2,34                              | 0,90                             |
| S4    | 0,282              | 0,250   | 0,032     | 3,56                              | 1,37                             |
| S5    | 0,262              | 0,230   | 0,032     | 3,37                              | 1,30                             |
| TOTAL | 1,537              | 1,171   | 0,366     | 24,43                             | 9,4                              |

a.3) Sistema central para paredes e tetos térmicos

MASSA DE AR INSUFLADO = 0,958 kg/s  
 MASSA DE AR DE RETORNO = 0,592 kg/s  
 MASSA DE AR DE RENOVACÃO = 0,366 kg/s  
 CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO = 19,0 kW (16.400 kcal/h)  
 POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA = 7,31 kW

- a.4) Sistema com aparelhos individuais para paredes e tetos térmicos.

TABELA 5.7 - Massa de ar, capacidade de refrigeração e potência dos aparelhos de ar condicionado para as paredes e tetos térmicos

| SALA  | MASSA DE AR ( kg/s) |         |           | CAPACIDADE DE REFRIGERAMENTO (kW) | POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA (kW) |
|-------|---------------------|---------|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|
|       | INSUFLADO           | RETORNO | RENOVAÇÃO |                                   |                                  |
| S1    | 0,335               | 0,097   | 0,238     | 9,78                              | 3,76                             |
| S2    | 0,082               | 0,050   | 0,032     | 1,64                              | 0,63                             |
| S3    | 0,082               | 0,050   | 0,032     | 1,64                              | 0,63                             |
| S4    | 0,194               | 0,162   | 0,032     | 2,79                              | 1,07                             |
| S5    | 0,194               | 0,162   | 0,032     | 2,79                              | 1,07                             |
| TOTAL | 0,887               | 0,521   | 0,366     | 18,64                             | 7,16                             |

### 5.3. ESPECIFICAÇÃO DE APARELHO DE AR CONDICIONADO EXISTENTES NO MERCADO PARA A CLIMATIZAÇÃO DO AMBIENTE ESTUDADO

#### a) Condicionado central unitário

##### a.1) Paredes e tetos convencionais

Capacidade de refrigeração requerida = 25 kW =  
21.531 kcal/h.

Vazão de ar insuflado requerido = 4.620 m<sup>3</sup>/h

MARCA: COLDEX TRANE

MODELO: SRVA 075-15H

CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO = 22.500 kcal/h

VAZÃO: 4590 m<sup>3</sup>/h

POTÊNCIA TOTAL CONSUMIDA: 12,03 kW

MARCA: STARCO LINHA SG

MODELO: SG 861

CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO = 25kW

VAZÃO: 6.000 m<sup>3</sup>/h

POTÊNCIA TOTAL CONSUMIDA: 10,1 kW

a.2) Paredes e teto térmicos

Capacidade de refrigeração requerida = 19,0 kW =

16.400 kcal/h.

Vazão de ar insuflado requerido = 2.834 m<sup>3</sup>/h

MARCA: COLDEX TRANE

MODELO: SRVA 050-15H

CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO = 15940 kcal/h

VAZÃO: 3060 m<sup>3</sup>/h

POTÊNCIA TOTAL CONSUMIDA: 8,30 kW

MARCA: STARCO LINHA SG

MODELO: SG 551

CAPACIDADE DE REFRIGERAÇÃO = 19,8 kW

VAZÃO: 4.000 m<sup>3</sup>/h

POTÊNCIA TOTAL CONSUMIDA: 8,5 kW

b) Condicionadores individuais por sala

b.1) Paredes e tetos convencionais

TABELA 5.8 - Especificação de aparelho de ar condicionado para as salas com paredes e tetos convencionais

| SALA  | QUANTIDADE | MARCA    | MODELO   | CAPACIDADE<br>kcal/h | VAZÃO<br>$\frac{m^3}{h}$ | POTÊNCIA<br>kW |
|-------|------------|----------|----------|----------------------|--------------------------|----------------|
| S1    | 2          | SPRINGER | 180R23CR | 4.500                | 650                      | 2,53           |
| S1    | 1          | SPRINGER | 120R23CR | 3.000                | 630                      | 2,07           |
| S2    | 1          | SPRINGER | 100R12CR | 2.500                | 550                      | 1,84           |
| S3    | 1          | SPRINGER | 100R12CR | 2.500                | 550                      | 1,84           |
| S4    | 1          | SPRINGER | 120R23CR | 3.000                | 630                      | 2,07           |
| S5    | 1          | SPRINGER | 120R23CR | 3.000                | 630                      | 2,07           |
| TOTAL | 7          | -        | -        | 23.000               | 4.290                    | 14,95          |

b.2) Paredes e teto térmicos

TABELA 5.9 - Especificação de aparelho de ar condicionado para as salas com paredes e tetos térmicos

| SALA  | QUANTIDADE | MARCA    | MODELO   | CAPACIDADE<br>kcal/h | VAZÃO<br>$\frac{m^3}{h}$ | POTÊNCIA<br>kW |
|-------|------------|----------|----------|----------------------|--------------------------|----------------|
| S1    | 3          | SPRINGER | 120R23CR | 3.000                | 650                      | 1,73           |
| S2    | 1          | SPRINGER | 100R23CR | 2.500                | 630                      | 1,61           |
| S3    | 1          | SPRINGER | 100R23CR | 2.500                | 630                      | 1,61           |
| S4    | 1          | SPRINGER | 100R23CR | 2.500                | 630                      | 1,84           |
| S5    | 1          | SPRINGER | 100R23CR | 2.500                | 630                      | 1,84           |
| TOTAL | 7          | -        | -        | 19.000               | 3.820                    | 12,09          |

#### 5.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO CONDICIONAMENTO DAS SALAS COM PAREDES E TETO CONVENCIONAIS E AS SALAS COM PAREDES E TETO TÉRMICOS

A tabela 5.10 compara a carga térmica, a capacidade de refrigeração necessária e a potência elétrica total instalada, calculada de maneira personalizada, sem a preocupação com os tipos de aparelhos de ar condicionado existente no mercado. Nota-se, que:

(1) O efeito obtido com as paredes e tetos térmicos é uma redução na carga térmica total do ambiente. Esta redução é maior ou menor dependendo do tipo de carga térmica dominante no ambiente que é o caso da sala S3 com 41,45 % de redução e da sala S5 com 21,46 % de redução. No caso desta última a maior parcela da carga térmica é a que penetra pela janela.

(2) A redução da carga térmica total do prédio é de 25%, que proporciona uma redução de 24 % na capacidade de refrigeração necessária ou na potência total do equipamento.

Para uma verificação mais apurada da potência realmente consumida pelos aparelhos de ar condicionado, montou-se a tabela 5.11 que permite a comparação entre a capacidade de refrigeração necessária e a possível de ser instalada e as respectivas potências elétrica total consumida.

Nota-se pela tabela 5.11 que mesmo adotando-se aparelhos com capacidade de refrigeração superior à necessária para o caso das paredes e teto térmicos, a redução da potência total instalada é da ordem de 19 % para o caso de aparelhos individuais por salas e de 16 % para o caso de aparelhos unitários centrais.

TABELA 5.10 - Tabela comparativa da carga térmica, capacidade de refrigeração necessária e potência elétrica total consumida pelo sistema de ar condicionado para paredes e tetos convencionais e paredes e tetos térmicos.

| SALA    | a <sub>1</sub><br>kcal/h | b <sub>1</sub><br>kcal/h | c <sub>1</sub><br>% | a <sub>2</sub><br>kW | b <sub>2</sub><br>kW | c <sub>2</sub><br>% | a <sub>3</sub><br>kW | b <sub>3</sub><br>kW | c <sub>3</sub><br>% |
|---------|--------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| S1      | 6336                     | 3805                     | 39,95               | 13,01                | 9,78                 | 24,83               | 5,0                  | 3,76                 | 24,80               |
| S2      | 1172                     | 774                      | 33,96               | 2,15                 | 1,64                 | 23,72               | 0,83                 | 0,63                 | 24,10               |
| S3      | 1322                     | 774                      | 41,45               | 2,34                 | 1,64                 | 29,91               | 0,90                 | 0,63                 | 30,00               |
| S4      | 2280                     | 1673                     | 26,62               | 3,56                 | 2,79                 | 21,63               | 1,37                 | 1,07                 | 21,90               |
| S5      | 2130                     | 1673                     | 21,46               | 3,37                 | 2,79                 | 17,21               | 1,30                 | 1,07                 | 17,69               |
| TOTAL   | 13240                    | 8699                     | 34,30               | 24,43                | 18,64                | 23,70               | 9,4                  | 7,16                 | 23,83               |
| CENTRAL | 13835                    | 9072                     | 34,40               | 25,0                 | 19,0                 | 24,00               | 9,6                  | 7,31                 | 24,00               |

a<sub>1</sub> Carga térmica para paredes e teto convencionais

b<sub>1</sub> Carga térmica para paredes e teto térmicos

c<sub>1</sub> Diferença percentual entre a<sub>1</sub> e b<sub>1</sub>

a<sub>2</sub> Capacidade de refrigeração necessária (caso convencional)

b<sub>2</sub> Capacidade de refrigeração necessária (caso térmico)

c<sub>2</sub> Diferença percentual entre a<sub>2</sub> e b<sub>2</sub>

a<sub>3</sub> Potência elétrica total do sistema de ar condicionado (caso convencional)

b<sub>3</sub> Potência elétrica total do sistema de ar condicionado (caso térmico).

c<sub>3</sub> Diferença percentual entre a<sub>3</sub> e b<sub>3</sub>

TABELA 5.11 - Tabela comparativa entre a capacidade de refrigeração necessária e a capacidade de refrigeração instalada e a potência total consumida (paredes e tetos convencionais e paredes e tetos térmicos)

| SALA    | a <sub>1</sub><br>kcal/h | a <sub>2</sub><br>kcal/h | b <sub>1</sub><br>kcal/h | b <sub>2</sub><br>kcal/h | a <sub>3</sub><br>kW | b <sub>3</sub><br>kW | c<br>% |
|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------|
| S1      | 11205                    | 12000                    | 8423                     | 9000                     | 7,13                 | 5,19                 | 27,21  |
| S2      | 1852                     | 2500                     | 1412                     | 2500                     | 1,84                 | 1,61                 | 12,50  |
| S3      | 2015                     | 2500                     | 1412                     | 2500                     | 1,84                 | 1,61                 | 12,50  |
| S4      | 3066                     | 3000                     | 2402                     | 2500                     | 2,07                 | 1,84                 | 11,11  |
| S5      | 2902                     | 3000                     | 2402                     | 2500                     | 2,07                 | 1,84                 | 11,11  |
| TOTAL   | 21040                    | 23000                    | 16051                    | 19000                    | 14,95                | 12,09                | 19,13  |
| CENTRAL | 21531                    | 21531                    | 16400                    | 17052                    | 10,1                 | 8,5                  | 15,84  |

a<sub>1</sub> Capacidade de refrigeração necessária (caso convencional)

a<sub>2</sub> Capacidade de refrigeração instalada (caso convencional)

b<sub>1</sub> Capacidade de refrigeração necessária (caso térmico)

b<sub>2</sub> Capacidade de refrigeração instalada (caso térmico)

a<sub>3</sub> Potência elétrica total consumida (caso convencional)

b<sub>3</sub> Potência elétrica total consumida (caso térmico).

c Diferença percentual entre a<sub>3</sub> e b<sub>3</sub>

## CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES

1 - A utilização do material de mudança de fase como isolante térmico, mostrou ser uma técnica muito eficaz no manejo de calor proveniente de insolação. Esta técnica permite além de ambientes termicamente muito mais estáveis, uma redução da potência dos sistemas de ar condicionado, e uma conseqüente redução na demanda de energia elétrica, nas horas de pico mais críticas especialmente nos dias de verão.

2 - A modelagem analítica e numérica escolhida, com as respectivas condições de contorno, foram testadas e avaliadas experimentalmente. Os resultados obtidos mostraram boa concordância e indicam que o modelo é adequado para prever o comportamento da parede e do teto.

3 - Neste estudo foi utilizado vantajosamente um material que tem uma faixa de mudança de fase de uso comercial, por ser barato e atender perfeitamente a aplicação proposta. Outras aplicações podem necessitar de uma faixa mais estreita de fusão, ou então um ponto de fusão, neste caso, pode-se utilizar a mesma metodologia mas com material mais puro.

4 - Como verifica-se a eficácia do conceito e conseqüentemente a redução da potência instalada dos sistemas de ar condicionado, sofre uma maior ou menor redução, dependendo da carga térmica predominante.

5 - Em prédios com grandes áreas envidraçadas, este procedimento teria pouca eficácia. Como conseqüência foram iniciados no Laboratório de Armazenadores Térmicos e Tubos de Calor estudos de janelas equipadas com vidros térmicos, ou seja, vidros convencionais compostos com materiais de mudança de fase.

ANEXOS

## ANEXO 1

### MODELAGEM DA RADIAÇÃO INCIDENTE

Com o objetivo de simular a parede térmica hora a hora, determina-se "o dia típico" de cada mês, isto é, um dia que representa a média do mês, admitido como inteiramente claro. Sendo assim, é estimada a intensidade da radiação total incidente (direta + difusa), hora a hora deste dia típico adotando-se o seguinte procedimento:

1 - Determina-se a intensidade da radiação direta hora a hora, a partir de dados do clima, latitude e visibilidade média mensal, utilizando-se o método Hottel [9];

2 - Utiliza-se o modelo de LIU e JORDAN [10] determina-se a média mensal da energia difusa diária, conforme sugerido por Macedo [11] e daí a média horária de energia difusa;

3 - Considera-se a distribuição uniforme da radiação difusa no intervalo de hora. Determina-se a intensidade média da radiação difusa e, conseqüentemente a intensidade média da radiação total hora a hora.

### MODELAGEM PARA O CÁLCULO DA RADIAÇÃO TOTAL INSTANTANEA EM DIA CLARO

Este item permite que se estime a intensidade de radiação total (direta mais a difusa) incidente, durante um dia claro em cada mês do ano. É evidente que não se pode prever se um determinado dia do ano será ou não claro (isto é sem cobertura de nuvens) mas se o dia for claro, é possível fazer-se uma estimativa da intensidade da radiação ao longo deste dia.

Um método razoavelmente simples é o proposto por Hottel [9] para se determinar a intensidade da radiação direta ( $I_D$ ) incidente na superfície da terra para qualquer instante de um dia claro de um determinado mês.

$$I_D = I_o \times T_D \quad (A1.1)$$

onde:  $I_o$  é a constante solar ( $1353 \text{ W/M}^2$ ), e  $T_D$  é a transmitância da atmosfera da Terra para a radiação solar, onde segundo Hottel [9].

$$T_D = a_o + a_1 e^{-K \sec(90-\beta)} \quad (A1.2)$$

onde:  $a_o$ ,  $a_1$ , e  $K$  são constantes determinadas a partir de parâmetros meteorológico simples, que são: a visibilidade média do mês; a altitude e o tipo de clima do local.

Para Campinas - SP [23] [24]

Latitude:  $22,39^\circ$  Sul

Altitude: 600 metros

Clima: tropical

Dia: 21 de julho

Hora: 12:00

Se nesse instante não houver cobertura do sol por nuvens tem-se os seguintes valores para  $a_o$ ,  $a_1$  e  $K$ .

a) para visibilidade de 23 km

$$a_o = 0,4025 - 0,007799 (6 - A)^2$$

$$a_1 = 0,4953 + 0,00583 (6,5 - A)^2$$

$$K = 0,2765 + 0,01895 (2,5 - A)^2$$

b) para visibilidade de 5 km

$$a_0 = 0,2234 - 0,00580 (5 - A)^2$$

$$a_1 = 0,7524 + 0,00098 (8,5 - A)^2$$

$$K = 0,2540 + 0,08200 (2,5 - A)^2$$

c) para visibilidade intermediária entre 5 km e 23 km deve-se fazer a interpolação linear; sendo (A) a altitude do local em (km). Para a cidade de Campinas adotaram-se os valores vistos nas Tab. A1.1).

TAB. A1.1 VISIBILIDADE MÉDIA PARA A CIDADE DE CAMPINAS REF. (23)

| MÊS | VISIBILIDADE<br>km | MÊS | VISIBILIDADE<br>km |
|-----|--------------------|-----|--------------------|
| JAN | 17,0               | JUL | 15,0               |
| FEV | 17,0               | AGO | 12,0               |
| MAR | 15,0               | SET | 12,0               |
| ABR | 15,0               | OUT | 14,0               |
| MAI | 15,0               | NOV | 17,0               |
| JUN | 14,0               | DEZ | 17,0               |

Determinadas estas constantes resta agora a determinação do ângulo  $\beta$  ou seja a "altitude solar" que é função da declinação ( $\sigma$ ) e da hora solar ( $\omega$ ) que evidencia que a transmitância é uma função também do dia do mês e da hora do dia, onde a altitude solar é dada por Duffie [24].

$$\beta = \arcsin (\sin \sigma \sin \phi + \cos \sigma \cos \omega \cos \phi) \quad (A1.3)$$

onde:  $\phi$  = latitude (sul negativa)

$\sigma$  = declinação (posição) angular do sol ao meio dia com relação ao equador)

$\omega$  = ângulo horário. Cada hora corresponde a  $15^\circ$ , contada a partir das 12:00 horas. O período da manhã é positivo e o período da tarde é negativo.  
(Ex. 11:00 h +  $15^\circ$ ; 15:00 h -  $45^\circ$ )

Da eq. de Cooper (1969) Duffie (24) tem-se que:

$$\sigma = 23,45 \times \sin [360(284+N)/365] \quad (A1.4)$$

onde:  $N \Rightarrow$  é o dia do ano

Como a radiação total instantânea ( $I$ ) é igual a direta ( $I_d$ ) mais a difusa ( $I_d$ )

$$I = I_d + I_d \quad (A1.5)$$

basta agora o cálculo da intensidade de radiação difusa instantânea. Para tanto utiliza-se o método de LIU e JORDAN [10] que se baseia em dados meteorológicos.

Segundo esses pesquisadores, conhecida a intensidade de radiação total diária média em um plano horizontal para diversos meses do ano (valores estes obtidos de publicações meteorológicas (Tab. A1.2).

TABELA A1.2 - Radiação média total na horizontal, número de dias: (C)claro, (N) nublado, (E) encobertos, esperado no mês ref.[23] médias dos anos de 75, 76, 77, 78, 79, 80).

| MÊS | RADIÇÃO TOTAL<br>HORIZONTAL<br>Cal/cm <sup>2</sup> | DIAS |    |    | MÊS | RADIÇÃO TOTAL<br>HORIZONTAL<br>Cal/cm <sup>2</sup> | DIAS |    |    |
|-----|----------------------------------------------------|------|----|----|-----|----------------------------------------------------|------|----|----|
|     |                                                    | C    | N  | E  |     |                                                    | C    | N  | E  |
| JAN | 509,5                                              | 3    | 17 | 11 | JUL | 348,9                                              | 14   | 13 | 4  |
| FEV | 475,6                                              | 2    | 14 | 12 | AGO | 381,0                                              | 14   | 13 | 4  |
| MAR | 475,0                                              | 6    | 17 | 8  | SET | 435,6                                              | 11   | 12 | 7  |
| ABR | 395,6                                              | 10   | 15 | 5  | OUT | 497,8                                              | 6    | 15 | 10 |
| MAI | 344,1                                              | 13   | 13 | 5  | NOV | 549,6                                              | 6    | 15 | 9  |
| JUN | 320,9                                              | 12   | 13 | 5  | DEZ | 550,0                                              | 13   | 16 | 12 |

é possível determinar a intensidade da radiação difusa instantânea para um certo dia do ano e uma certa hora do dia utilizando-se os seguintes passos:

a) com a latitude ( $\phi$ ), com a declinação ( $\delta$ ) e fig. A1.1 determina-se a duração aproximada deste dia;

b) com a latitude ( $\phi$ ), o mês e a fig. A1.2 determina-se a insolação extraterrestre, média diária do mês em uma superfície horizontal ( $\bar{I}_0$ )

c) com a radiação total média diária ( $\bar{I}_{TH}$ ), num determinado mês, (extraído de publicações meteorológicas) tira-se a relação.

$$\bar{I}_{TH} / \bar{I}_0 \quad (A1.6)$$

com esta relação e a Figura (A3) tira-se a relação entre a radiação diária difusa e a radiação total  $\bar{I}_d / \bar{I}_{TH} \Rightarrow \bar{I}_d$

d) Com o valor da duração do dia e a Fig. (A1.4) tira-se a relação entre a radiação horária difusa e a radiação difusa diária  $\bar{I}_{dh} / \bar{I}_d \Rightarrow \bar{I}_{dh}$

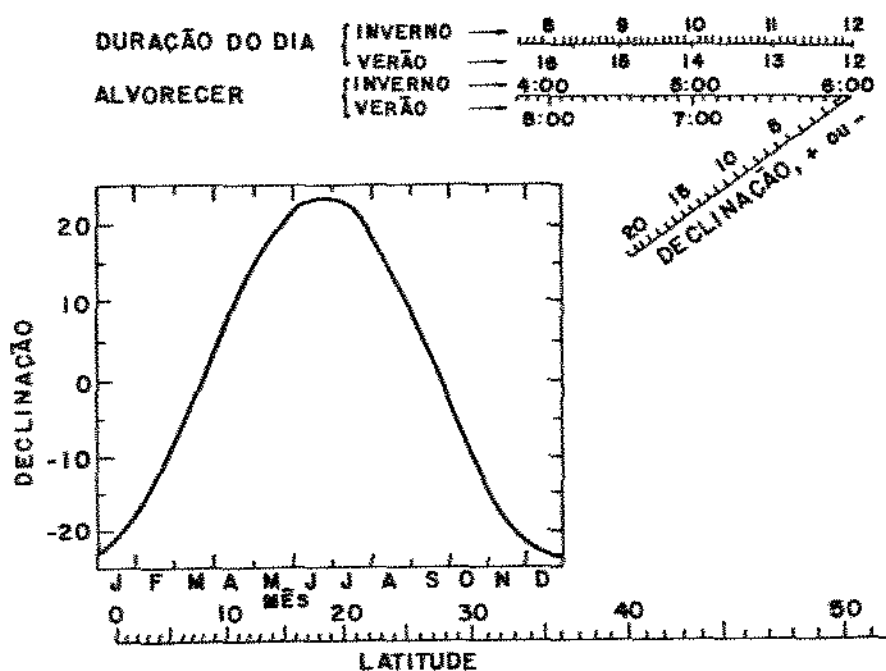


Figura A1.1 - Tempo de duração do dia.

Assim, tem-se a quantidade de energia que chega à superfície da terra como radiação difusa ( $I_{dh}$ ), durante uma hora, logo a intensidade de radiação difusa é:

$$I_d = \bar{I}_{dh} / 3600 \quad (A1.7)$$

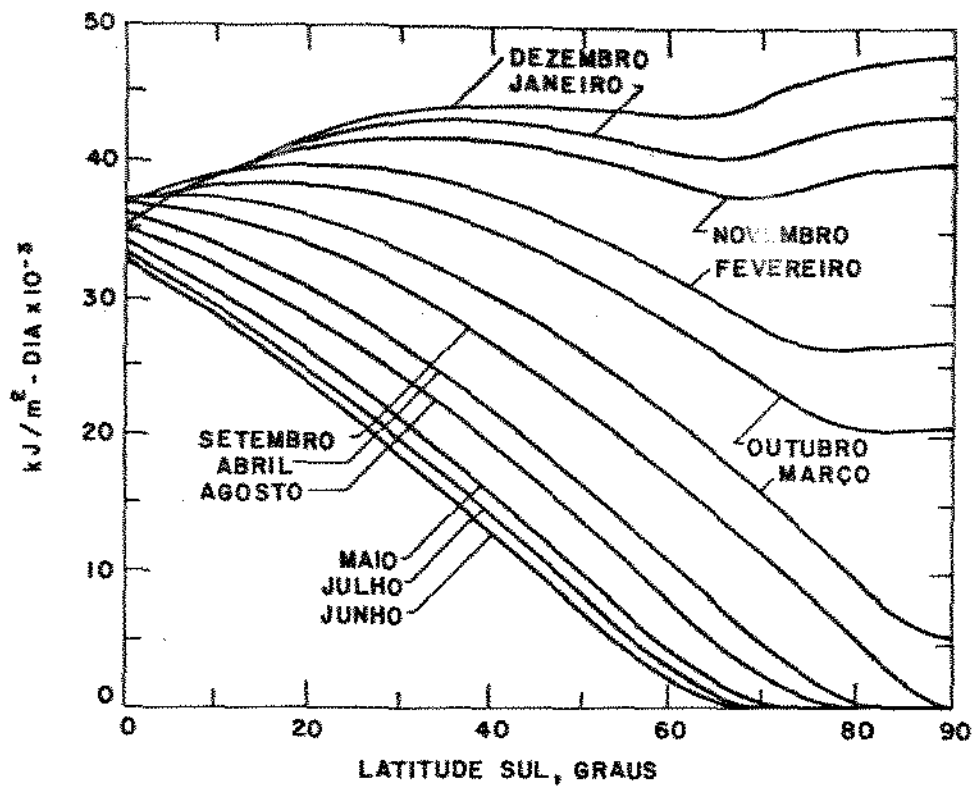


Figura A1.2 - Insolação extraterrestre diária na horizontal.

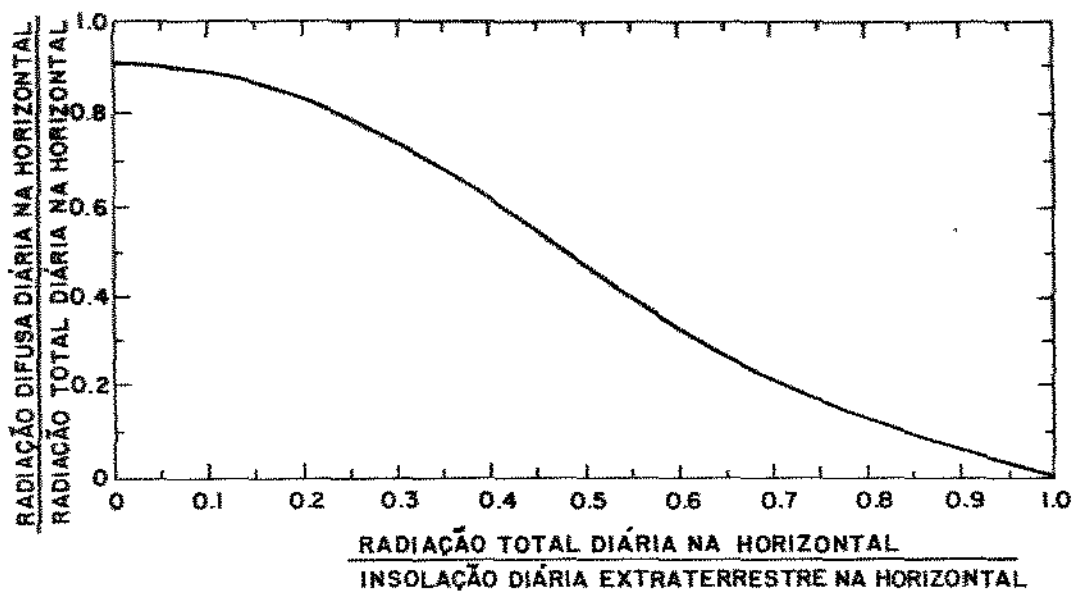


Figura A1.3 - Radiação difusa total diária.

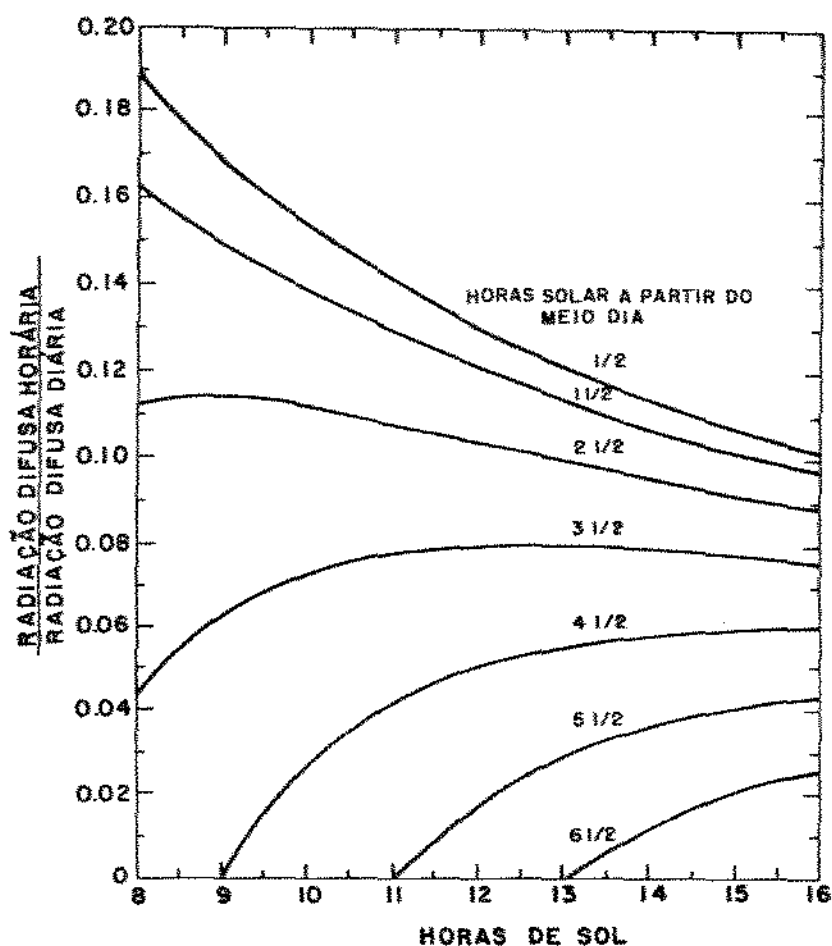


Figura A1.4 - Radiação difusa horária.

Com este valor determina-se a intensidade de radiação total instantânea incidente no plano horizontal do dia  $x$ , no mês  $y$ , na hora  $h$ , do local em questão, se neste instante não houver cobertura do sol por nuvens.

Para se encontrar a parcela desta irradiação que atinge perpendicularmente uma superfície que tem um ângulo ( $s$ ) com a

horizontal conforme visto na Figura A1.5 utiliza-se a eq. A1.8.

$$I_N = I \times \cos \theta \quad (A1.8)$$

onde:  $I$  é a radiação global incidente e  $(\theta)$  é o ângulo de incidência em uma superfície qualquer e é dado por Duffie e Beckman [24]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \theta \cos s - \sin \delta \cos \theta \cos \mu + \\ & + \cos \delta \cos \theta \cos w + \cos \sigma \sin \delta \sin \mu \sin w + \\ & + \cos \delta \sin \theta \sin s \cos \mu \cos w \end{aligned} \quad (A1.9)$$

sendo:

- $\alpha$  - a declinação dada pela eq. A1.5;
- $\theta$  - a latitude
- $s$  - o ângulo de inclinação entre a superfície de teste e a horizontal (Figura A.5); que deve ser positivo quando a superfície está voltada para o sul e negativa, quando voltada para o norte.
- $\mu$  - o azimuth da superfície; e
- $w$  - o ângulo horário.

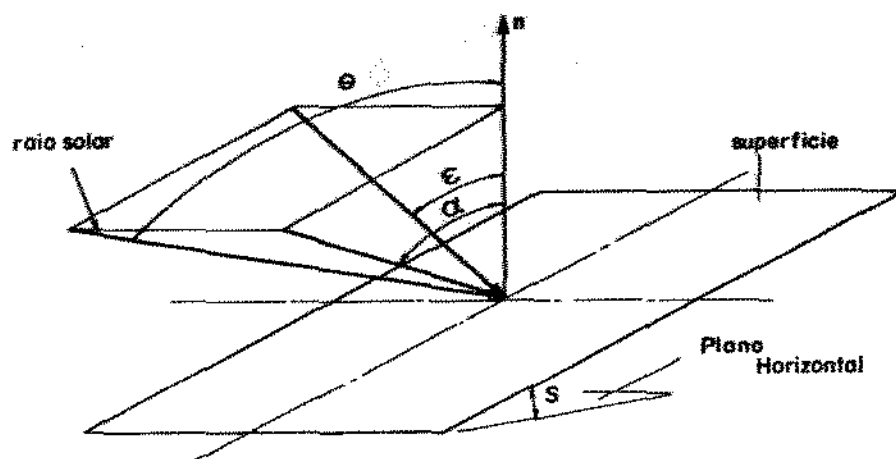


Figura A1.5 - Ângulo de incidência em uma superfície qualquer.

## ANEXO 2

### TEMPERATURA NA FACE EXTERNA DA PAREDE AQUECIDA PELO SOL

A temperatura na face externa da parede aquecida pelo Sol é calculada mediante o balanço de energia assumindo-se que:

(1) O problema é unidimensional e a temperatura  $T(x,t)$  é função da profundidade  $(x)$  desta parede, e do tempo  $(t)$ .

(2) A equação de Fourier é válida para descrever a condução de calor dentro desta parede.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\delta c p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (A2.1)$$

(3) Para o início da insolação  $(t = 0)$  a temperatura da parede é igual para todo o meio.

(4) Logo, para a face externa considerada o balanço de energia é

$$-K_A \frac{\partial T_A}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_S Q_S(t) + \alpha_\lambda S(t) - \varepsilon_\lambda \bar{S}(t) - h_{EXT} (T_A \Big|_{x=0} - T_{EXT}) \quad (A2.2)$$

onde:

- $K_A$        $\Rightarrow$  condutividade da parede
- $\alpha_S$        $\Rightarrow$  absorvidade para a face externa da parede
- $Q_S(t)$   $\Rightarrow$  intensidade solar incidente sobre a superfície externa da parede  $KJ/m^2h$
- $\alpha_\lambda$        $\Rightarrow$  absorvidade de radiação de comprimento longo de onda
- $\varepsilon_\lambda$        $\Rightarrow$  emissividade em comprimento longo de onda

- $S \Rightarrow$  radiação em comprimento de onda longo dos arredores  
 $\bar{S} \Rightarrow$  radiação em comprimento de onda longo da parede  
 $h_{EXT} \Rightarrow$  coeficiente global de transferência de calor entre a superfície externa da parede e o ar atmosférico  $KJ/m^2h^{\circ}C$ .  
 $T_{EXT} \Rightarrow$  temperatura do ar atmosférico [ $^{\circ}C$ ]

como para comprimentos longo de onda

$$\alpha_{\lambda L} = \epsilon_{\lambda L} = \epsilon \quad (A2.3)$$

e adotando-se que:

$$-S(t) + \bar{S}(t) = \Delta R \quad (A2.4)$$

tem-se que:

$$-K_A \frac{\partial T_A}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha Q_S(t) - \epsilon \Delta R + h_{EXT} T_{EXT} - h_{EXT} T_A \Big|_{x=0} \quad (A2.5)$$

rearranjando, conforme Srivastava [12] tem-se que:

$$-K_A \frac{\partial T_A}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{EXT} \left( T_S - T_A \Big|_{x=0} \right) \quad (A2.6)$$

onde:

$$T_S = \frac{\alpha_S Q_S(t) + h_{EXT} T_{EXT} - \epsilon \Delta R}{h_{EXT}} \quad (A2.7)$$

$T_S$  = temperatura solar ( $^{\circ}C$ )

$\Delta R$  = diferença entre a radiação em comprimentos de ondas longas do céu dos arredores, incidente em uma superfície, e a radiação emitida por um corpo negro na temperatura do ar atmosférico ( $KJ/hm^2$ )

### ANEXO 3

#### SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR ATMOSFÉRICO EXTERNO

O modelo adotado é o sugerido pela ASHRAE [22] conjuntamente com os dados fornecidos pelo instituto agronômico de Campinas [23].

A temperatura do ar em cada hora ( $T_{AR}$ ) é calculada subtraindo-se da média máxima esperada para a região ( $\bar{T}_{MAX}$ ) a média mínima das temperaturas ( $\bar{T}_{MIN}$ ) na região (Tab. A3.2). Multiplica-se esta diferença pelo fator de simulação e subtrai-se o resultado da média máxima ou seja:

$$T_{AR} = \bar{T}_{MAX} - \theta(\bar{T}_{MAX} - \bar{T}_{MIN}) \quad (A3.1)$$

Tabela A3.1 Dados meteorológicos para a cidade de Campinas

| MES | TEMPERATURAS (°C) |              |              |
|-----|-------------------|--------------|--------------|
|     | MÉDIA             | MÉDIA MAXIMA | MÉDIA MINIMA |
| J   | 23,1              | 29,7         | 18,6         |
| F   | 22,8              | 29,5         | 18,7         |
| M   | 22,5              | 29,4         | 18,0         |
| A   | 20,1              | 27,6         | 15,8         |
| M   | 18,2              | 25,3         | 13,5         |
| J   | 17,1              | 24,4         | 11,9         |
| J   | 17,2              | 24,7         | 11,6         |
| A   | 18,8              | 26,8         | 12,8         |
| S   | 20,8              | 28,4         | 14,9         |
| O   | 21,3              | 28,4         | 15,2         |
| N   | 21,8              | 28,7         | 16,7         |
| D   | 22,5              | 29,0         | 17,9         |
| ANO | 20,6              | 27,7         | 15,5         |

TABELA A3.2 - Fator para o cálculo da temperatura média diária  
Ref.22, Cap 25, Tab. 3.

| HORAS | FATOR | HORAS | FATOR | HORAS | FATOR |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 0,87  | 9     | 0,71  | 17    | 0,10  |
| 2     | 0,92  | 10    | 0,56  | 18    | 0,21  |
| 3     | 0,96  | 11    | 0,39  | 19    | 0,34  |
| 4     | 0,99  | 12    | 0,23  | 20    | 0,47  |
| 5     | 1,00  | 13    | 0,11  | 21    | 0,58  |
| 6     | 0,98  | 14    | 0,03  | 22    | 0,68  |
| 7     | 0,93  | 15    | 0,00  | 23    | 0,76  |
| 8     | 0,84  | 16    | 0,03  | 24    | 0,82  |

#### ANEXO 4

### DESENVOLVIMENTO DO EQUACIONAMENTO NUMÉRICO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO NA PAREDE EXTERNA (MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE SÓLIDO)

Substituindo-se as Eq. 3.15 e 3.28 na condição 2.36

$$\left[ \frac{K_A}{K_S} \right] \frac{1}{\Delta X_A} \left[ \frac{\Delta X_A^2 \alpha_L}{2\Delta\tau\alpha_A} \left( \theta_A(i, j+1) - \theta_A(i, j) \right) - \theta_A(i-1, j) + \theta_A(i, j) \right] =$$

$$- \frac{1}{\Delta X_S} \left[ \frac{\Delta X_S^2 \alpha_L}{2\Delta\tau\alpha_S} \left( \theta_S(i, j+1) - \theta_S(i, j) \right) - \theta_S(i+1, j) + \theta_S(i, j) \right] \quad (A4.1)$$

para  $X = A$ ,  $i = NA$ , logo tem-se que:

$$\theta_A(i, j+1) = \theta_S(i, j+1)$$

$$\theta_A(i, j) = \theta_S(i, j)$$

logo

$$\theta_A(i, j+1) \left[ \frac{K_A \Delta X_A \alpha_L}{K_S 2\Delta\tau\alpha_A} + \frac{\Delta X_S \alpha_L}{2\Delta\tau\alpha_S} \right] = \theta_A(i-1, j) \left[ \frac{K_A}{K_S} \frac{1}{\Delta X_A} \right] +$$

$$+ \theta_A(i, j) \left[ \frac{K_A \Delta X_A \alpha_L}{K_S 2\Delta\tau\alpha_A} + \frac{\Delta X_S \alpha_L}{2\Delta\tau\alpha_S} - \frac{K_S}{K_S \Delta X_A} \right] + \theta_S(i+1, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_S} \right] \quad (A4.2)$$

onde

$$\begin{aligned}
 \theta_A(i, j+1) = & \theta_A(i-1, j) \left[ \frac{K_A 2\Delta\tau \alpha_A \alpha_S}{\Delta x_A \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_S + K_S \Delta x_S \alpha_A)} \right] + \\
 & + \theta_A(i, j) \left[ 1 - \frac{K_A K_S 2\Delta\tau \alpha_A \alpha_S}{\Delta x_A \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_S + K_S \Delta x_S \alpha_A)} \right] + \\
 & + \theta_S(i+1, j) \left[ \frac{K_A 2\Delta\tau \alpha_A \alpha_S}{\Delta x_S \alpha_L (K_A \Delta x_A \alpha_S + K_S \Delta x_S \alpha_A)} \right] \quad (A4.3)
 \end{aligned}$$

## ANEXO 5

### DESENVOLVIMENTO DO EQUACIONAMENTO NUMÉRICO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO NA FORMAÇÃO DA PRIMEIRA LAMINA DE LÍQUIDO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE.

Substituindo-se as eq. (15) (16) na eq. (2.38) e ainda lembrando-se que:

$$\frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} = \frac{S(j+1) - S(j)}{\Delta \tau} \quad (A5.1)$$

tem-se:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{K_A}{K_L} \right) \frac{1}{\Delta X_A} \left[ \frac{\Delta X_A^2 \alpha_L}{2 \Delta \tau \alpha_A} \left( \theta_A(i, j+1) - \theta_A(i, j) \right) - \theta_A(i-1, j) + \theta_A(i, j) \right] = \\ & - \frac{1}{\text{STEFAN}} \left[ \frac{S(j+1) - S(j)}{\Delta \tau} \right] + \\ & - \left( \frac{K_S}{K_L} \right) \frac{1}{\Delta X_S} \left[ \frac{\Delta X_S^2 \alpha_S}{2 \Delta \tau \alpha_S} \left( \theta_S(i, j+1) - \theta_S(i, j) \right) - \theta_S(i+1, j) + \theta_S(i, j) \right] \end{aligned} \quad (A5.2)$$

para  $X = A \Rightarrow i = N_A$ , onde

$$\theta_A(i, j) = \theta_S(i, j) = \theta_A(i, j+1) = \theta_S(i, j+1) = \theta_M \quad (A5.3)$$

logo:

$$\begin{aligned}
 S(j+1) = S(j) &+ \frac{k_A}{k_L} \text{STEFAN} \frac{\Delta\tau}{\Delta X_A} \left[ \theta_A(i-1, j) - \theta_M \right] + \\
 &+ \frac{K_S}{K_L} \text{STEFAN} \frac{\Delta\tau}{\Delta X_S} \left[ \theta_S(i+1, j) - \theta_M \right]
 \end{aligned}
 \tag{A5.6}$$

## ANEXO 6

### DESENVOLVIMENTO DO EQUACIONAMENTO NUMÉRICO DA MALHA MÓVEL

Para o caso da existência da frente de fusão tem-se segundo Murray [7] uma malha móvel conforme Figura 3.1, que se distende com a interface de mudança de fase, onde:

a) A região de líquido é subdividida em K partes iguais de tal forma que

$$\Delta X_L = \frac{S(\tau)}{K} \quad (\text{A6.1})$$

que evidentemente cresce com o avanço da frente de fusão. Similarmente a região sólida do material de mudança de fase é subordinada também em K partes iguais de forma que

$$\Delta X_s = \frac{B - S(\tau)}{K} \quad (\text{A6.2})$$

o método concentra a atenção na derivada substancial da temperatura com relação ao tempo em cada ponto onde

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \bigg|_i \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \bigg|_i \quad (\text{A6.3})$$

que mostra que o avanço de cada ponto está diretamente relacionado com a velocidade da frente de fusão, onde

$$X = A \Rightarrow i = N + 1 \quad (\text{A6.4})$$

$$x = S(\tau) \Rightarrow i = N + 1 + K \quad (\text{A6.5})$$

de onde

$$x_i = \frac{(1-N-1)}{K} S(\tau) + A \quad (A6.6)$$

ou ainda

$$\frac{S(\tau)}{(X-A)} = \frac{K}{(1-N-1)} \quad (A6.7)$$

diferenciando a Eq. A6.6 com relação ao tempo tem-se

$$\frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} = \frac{K}{(1-N-1)} \frac{\partial x_i}{\partial \tau} \quad (A6.8)$$

$$\frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} = \frac{S(\tau)}{(X_i - A)} \frac{\partial x_i}{\partial \tau} \quad (A6.9)$$

logo:

$$\frac{1}{(X-A)} \frac{\partial x}{\partial \tau} \Big|_i = \frac{1}{S(\tau)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \quad (A6.10)$$

para um espaçamento regular na fase líquida, ampliando-se com o avanço da frente de fusão.

Combinando-se as equações (A6.3) e a (6.10) com a equação de condução no líquido (2.26) tem-se para a fase líquida que

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial \tau} \Big|_i = \frac{d\theta}{d\tau} \Big|_i - \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \Big|_i \frac{\partial x_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_L}{\partial x^2} \Big|_i \quad (A6.11)$$

$$\frac{d\theta_L}{d\tau} \Big|_i - \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \Big|_i \left[ \frac{(X-A)}{S(\tau)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] = \frac{\partial^2 \theta_L}{\partial x^2} \Big|_i \quad (A6.12)$$

$$\left. \frac{d\theta_L}{d\tau} \right|_i = \frac{(x_i - A)}{S(\tau)} \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} + \left. \frac{\partial^2 \theta_L}{\partial x^2} \right|_i \quad (\text{A6.13})$$

onde  $N + 1 \leq i \leq N + 1 + K$  (na fase líquida).

substituindo-se as eq. (3.8), (3.9) na (eq. A6.13) e lembrando que

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x_L} \left[ \theta(i+1, j) - \theta(i-1, j) \right] \quad (\text{A6.14})$$

tem-se que:

$$\begin{aligned} \theta_L(i, j+1) = & \theta_L(i-1, j) \Delta \tau \left[ \frac{1}{\Delta x_L^2} - \frac{X-A}{S(j)} \frac{1}{2\Delta x_L} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\ & + \theta_L(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta \tau}{\Delta x_L^2} \right] + \\ & + \theta_L(i+1, j) \Delta \tau \left[ \frac{1}{\Delta x_L^2} + \frac{X-A}{S(j)} \frac{1}{2\Delta x_L} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] \end{aligned} \quad (\text{A6.15})$$

lembrando ainda que:

$$\Delta x_L = \frac{S(j)}{K} \text{ e } X-A = \frac{i-N-1}{K} S(\tau) \quad (\text{A6.16})$$

tem-se que:

$$\begin{aligned} \theta_L(i, j+1) = & \theta_L(i-1, j) \Delta \tau \left[ \left( \frac{K}{S(j)} \right)^2 - \frac{(1-N-1)}{2S(j)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\ & + \theta_L(i, j) \left[ 1 - 2\Delta \tau \left( \frac{K}{S(j)} \right)^2 \right] + \\ & + \theta_L(i+1, j) \left[ \left( \frac{K}{S(j)} \right)^2 + \frac{(1-N-1)}{2S(j)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] \end{aligned} \quad (A6.17)$$

De maneira análoga para a fase sólida tem-se que:

para

$$x = A + S(\tau) \Rightarrow i = N+1+K \quad (A6.18)$$

$$x = A+B \Rightarrow i = N+1+2K \quad (A6.19)$$

de maneira

$$x_1 = \frac{[i-(N+K+1)]}{K} [A+B-S(\tau)] \quad (A6.20)$$

logo diferenciando A6.20 com relação ao tempo que:

$$\frac{\partial x_1}{\partial \tau} = \left( \frac{N+K+1-1}{K} \right) \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \quad (A6.21)$$

Lembrando-se que

$$\frac{A+B-S(\tau)}{x_1} = \frac{K}{1-(N+K+1)} \quad (A6.22)$$

tem-se que:

$$\frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} = \frac{S(\tau) - (A+B)}{x_1} \frac{\partial x_1}{\partial \tau} \quad (\text{A6.23})$$

Logo:

$$\frac{1}{x_1} \frac{\partial x}{\partial \tau} = \frac{1}{S(\tau) - (A+B)} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \quad (\text{A6.24})$$

Para um espaçamento regular na fase sólida diminuindo com o avanço da frente de fusão tem-se, combinando-se as equações A6.3 e A6.24 com a equação de condução no sólido (2.26) que para a fase sólida:

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{d\theta_s}{d\tau} - \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \left| \frac{\partial x}{\partial \tau} = \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right] \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} \quad (\text{A6.25})$$

ou seja

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{x}{S(\tau) - (A+B)} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} + \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} \quad (\text{A6.26})$$

onde  $N+1+K \leq i \leq N+1+2K$  (fase sólida)

Substituindo-se as equações (3.8), (3.9) e (A6.14) na equação (A6.26) tem-se que:

$$\begin{aligned}
\theta_s(i, j+1) = & \theta_s(i-1, j) \Delta \tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \frac{1}{\Delta x_s^2} - \frac{X}{S(\tau) - (A+B)} \frac{1}{2\Delta x_s} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\
& + \theta_s(i, j) \left[ 1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \frac{2\Delta \tau}{\Delta x_s^2} \right] + \\
& + \theta_s(i+1, j) \Delta \tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \frac{1}{\Delta x_s^2} + \frac{X}{S(\tau) - (A+B)} \frac{1}{2\Delta x_s} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right]
\end{aligned}
\tag{A6.27}$$

Lembrando-se que:

$$\Delta x_s = \frac{B - S(j)}{K} ; \quad X = \frac{1 - (N+1+K)}{K} [A+B - S(\tau)]$$

tem-se que:

$$\begin{aligned}
\theta_s(i, j+1) = & \theta_s(i-1, j) \Delta \tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \left( \frac{K}{B - S(\tau)} \right)^2 + \frac{1 - (N+1+K)}{2[B - S(j)]} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right] + \\
& + \theta_s(i, j) \left[ 1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_L} 2\Delta \tau \left( \frac{B - S(\tau)}{K} \right)^2 \right] \\
& + \theta_s(i+1, j) \Delta \tau \left[ \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \left( \frac{K}{B - S(\tau)} \right)^2 - \frac{1 - (N+1+K)}{2[B - S(j)]} \frac{\partial S(\tau)}{\partial \tau} \right]
\end{aligned}$$

(A6.28)

# ANEXO 7

## DESENVOLVIMENTO DO EQUACIONAMENTO NUMÉRICO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO NA ÚLTIMA CAMADA SÓLIDA DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE.

Da equação (3.2) para  $x = A + B$  tira-se segundo Karnahan [8] que:

$$\frac{\partial^2 \theta_L}{\partial X_L^2} = \frac{2}{\Delta X_L^2} \left[ \theta_L(i-1, j) + \theta_L(i, j) + \Delta X_L \left( \frac{\partial \theta_L}{\partial X_L} \right) \right] \quad (A7.1)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_c}{\partial X_c^2} = \frac{2}{\Delta X_c^2} \left[ \theta_c(i+1, j) - \theta_c(i, j) - \Delta X_c \left( \frac{\partial \theta_c}{\partial X_c} \right) \right] \quad (A7.2)$$

Substituindo-se as equações (A7.1) e (3.8) na equação (2.26) tira-se:

$$\Delta X_L \left( \frac{\partial \theta_L}{\partial X_L} \right) = \frac{\Delta X_L^2}{2\Delta \tau} \left[ \theta_L(i, j+1) - \theta_L(i, j) \right] - \theta_L(i-1, j) + \theta_L(i, j) \quad (A7.3)$$

Substituindo-se as equações (A7.2) e (3.21) na equação (2.31) tira-se:

$$-\Delta X_c \left( \frac{\partial \theta_c}{\partial X_c} \right) = \frac{\Delta X_c^2}{2\Delta \tau} \frac{\alpha_c}{\alpha_c} \left[ \theta_c(i, j+1) - \theta_c(i, j) \right] - \theta_c(i+1, j) + \theta_c(i, j) \quad (A7.4)$$

Substituindo-se as equações (A7.3), (A7.4) e (A5.1) na equação (2.45) e considerando-se que:

$$\theta_L(i, j) = \theta_c(i, j) = \theta_L(i, j+1) = \theta_s(i, j+1) = \theta_M \quad \text{tira-se que:}$$

$$S(j+1) = S(j) + \text{STEFAN} \frac{\Delta \tau}{\Delta \alpha_L} \left[ \theta_L(i-1, j) - \theta_M \right] +$$

$$\text{STEFAN} \frac{\Delta \tau}{\Delta X_c} \left[ \theta_c(i+1, j) - \theta_M \right] \quad (\text{A7.5})$$

## ANEXO 8

### PRÉ-AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA COLOCAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE NA PAREDE

Para levantar estes dados projetou-se e construiu-se uma pequena caixa revestida internamente com lã de rocha e placas

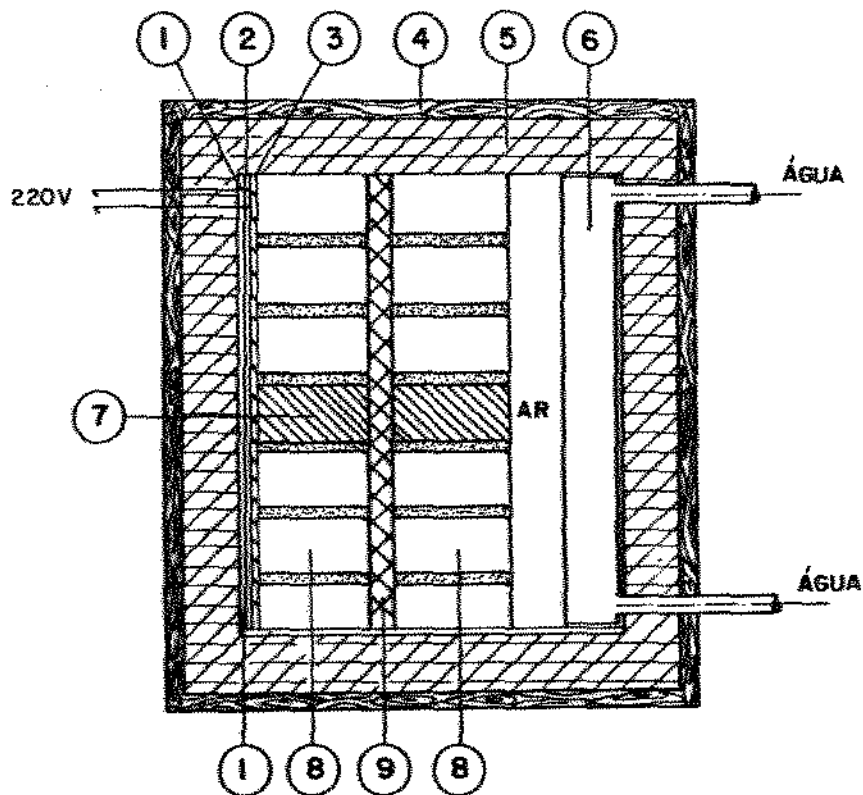


Figura A8.1 - Corte transversal da caixa de pré-avaliação dos efeitos causados pela colocação do material de mudança de fase entre paredes convencionais, 1 Placa de amianto, 2 Resistência elétrica plana, 3 Placa de cobre para homogeneização da temperatura, 4 Caixa estrutural de aglomerado, 5 Lã de rocha, 6 Trocador de calor plano, 7 Região instrumentada 8 Parede de tijolos, 9 Material de mudança de fase.

de contenção de cimento amianto conforme visto na figura A8.1. No interior desta caixa são colocadas as paredes juntamente com o sistema de aquecimento, refrigeração e medição conforme visto nas Figuras A8.1,A8.2.

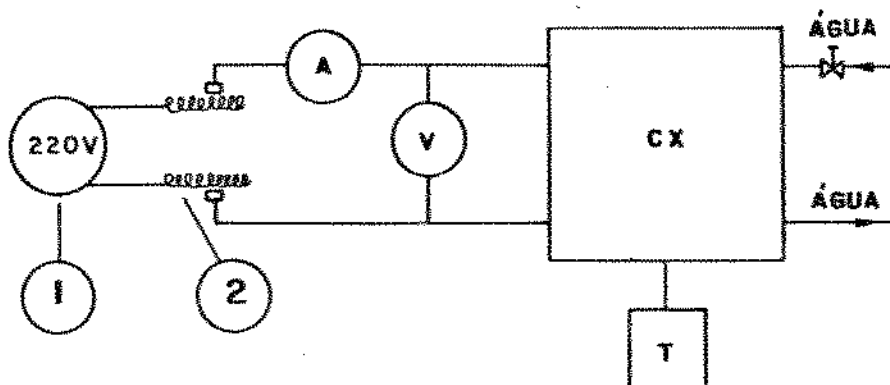


Figura A8.2 - Desenho esquemático do sistema de preavaliação do comportamento da parede térmica. 1 Fonte de energia elétrica, 2 Variador de voltagem, A Amperímetro, V Voltímetro, CX Caixa para testes das paredes, T Seletor e registrador de temperatura.

A composição das paredes feitas de tijolos comuns e testadas foram:

- a)  $1/4$  tijolo +  $1/2$  tijolo;
- b)  $1/4$  tijolo + MMF +  $1/2$  tijolo;
- c)  $1/2$  tijolo +  $1/2$  tijolo;
- d)  $1/2$  tijolo + MMF +  $1/2$  tijolo;

conforme visto na Figura A8.3

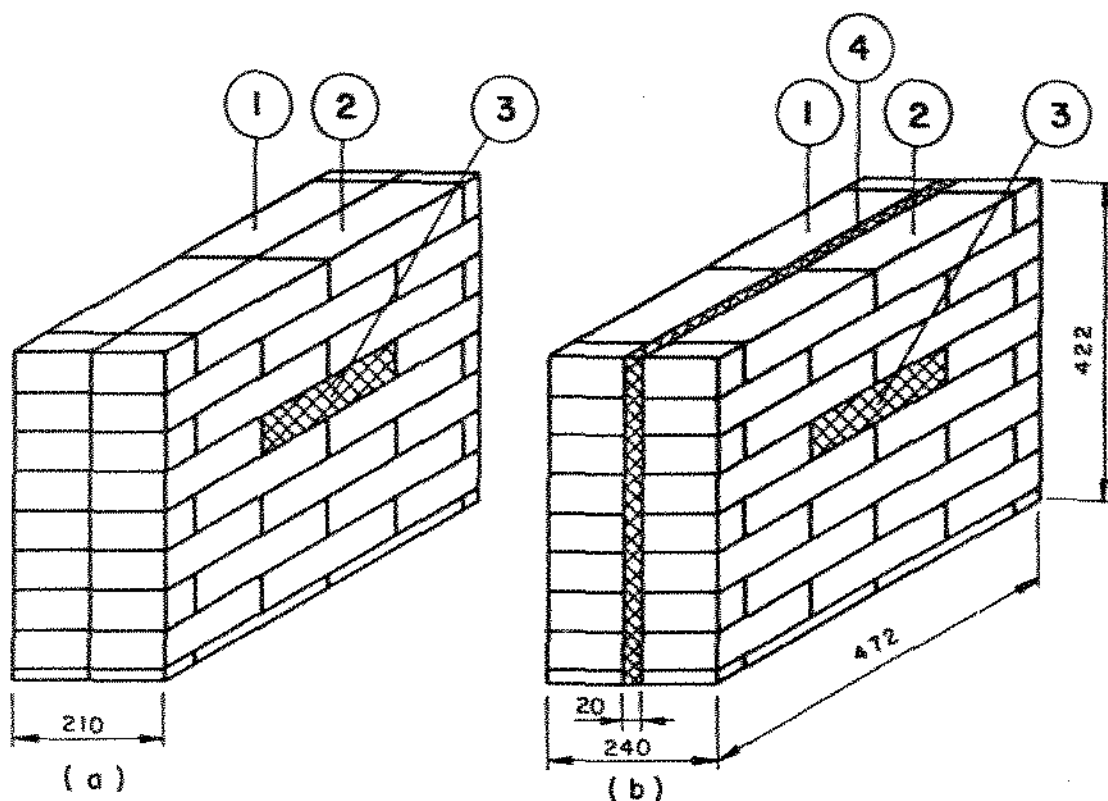


Figura A8.3 - Exemplo de um arranjo possível de parede: (a) Parede convencional, (b) Parede térmica, 1 Parede aquecida, 2 Parede interna, 3 Região instrumentada, 4 material de mudança de fase.

O aquecimento destas paredes foi feito por um sistema de resistências elétricas planas colocadas em uma das faces da parede junto a uma placa de cobre para melhor distribuição do calor. Estas resistências são controladas por um variador de tensão e a potência medida por um conjunto amperímetro/voltímetro conforme visto na figura A8.2.

A outra face da parede é mantida próxima a um trocador de calor plano que recebe uma vazão constante de água, e mantido sempre a uma temperatura constante.

Transversalmente e no eixo central da parede foram colocados termopares assentados com pasta térmica e dispostos

con-forme mostra a figura A8.4. Estes termopares foram conectados aa um sistema de seletor e registrador de temperatura permitindo os resultados vistos nas figuras A8.5, A8.6, A8.7 e A8.8, obtidos para uma potência de aquecimento constante.

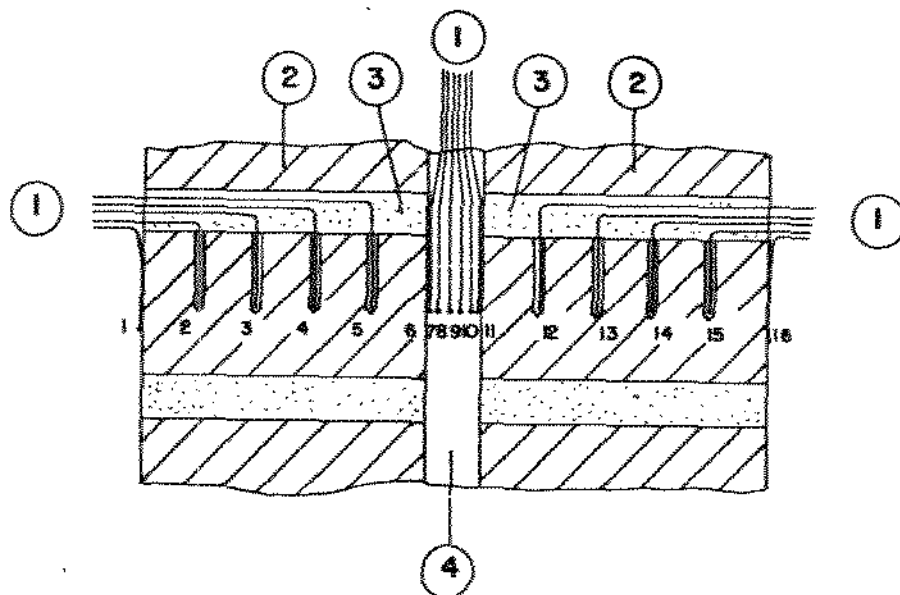


Figura A8.4 - Exemplo da disposição dos termopares. 1 Chicote de termopares, 2 Tijolo, 3 Argamassa, 4 Material de mudança de fase.

O material de mudança de fase utilizado foi o polietileno glicol 1000 no caso o ATPEG - 1000 do Grupo Ultra com temperatura de mudança de fase na faixa de  $36^{\circ}\text{C}$  a  $37^{\circ}\text{C}$  temperatura esta levantada em nossos laboratórios conforme mostrado no anexo 9. Este material foi acondicionado em uma caixa feita de chapas de cobre de 1mm de espessura. Esta caixa permitiu manter a camada de 20mm de material de mudança de fase entre as paredes, conforme visto na figura A8.1 mesmo quando este material estava todo na fase líquida.

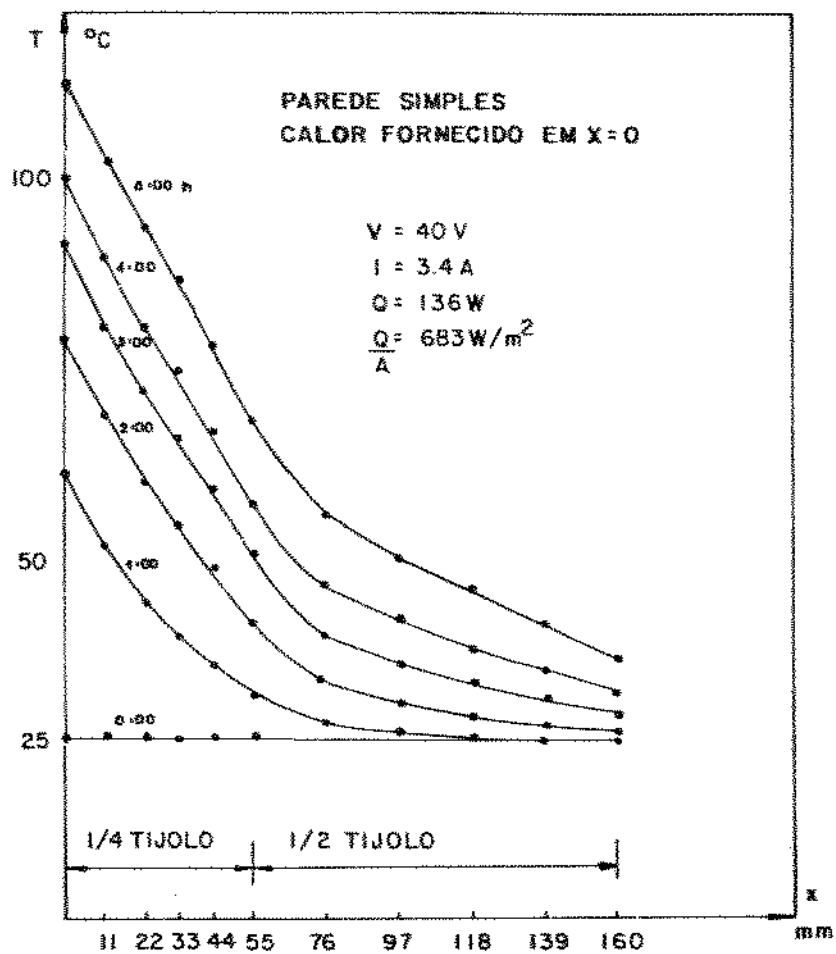


Figura A8.5 - Variação de temperatura com a espessura em uma parede convencional de tijolos (3/4 de tijolo de espessura).

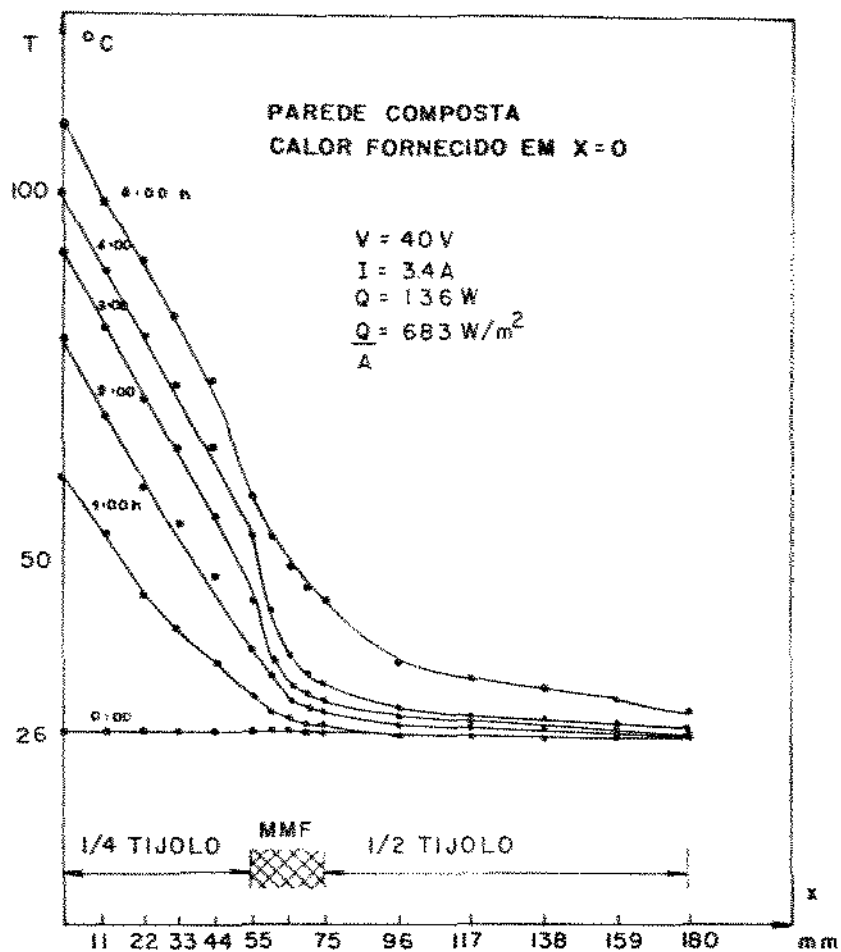


Figura A8.6 - Variação da temperatura com a espessura de uma parede térmica de tijolos (espessura de 3/4 de tijolo mais 20mm de material de mudança de fase).

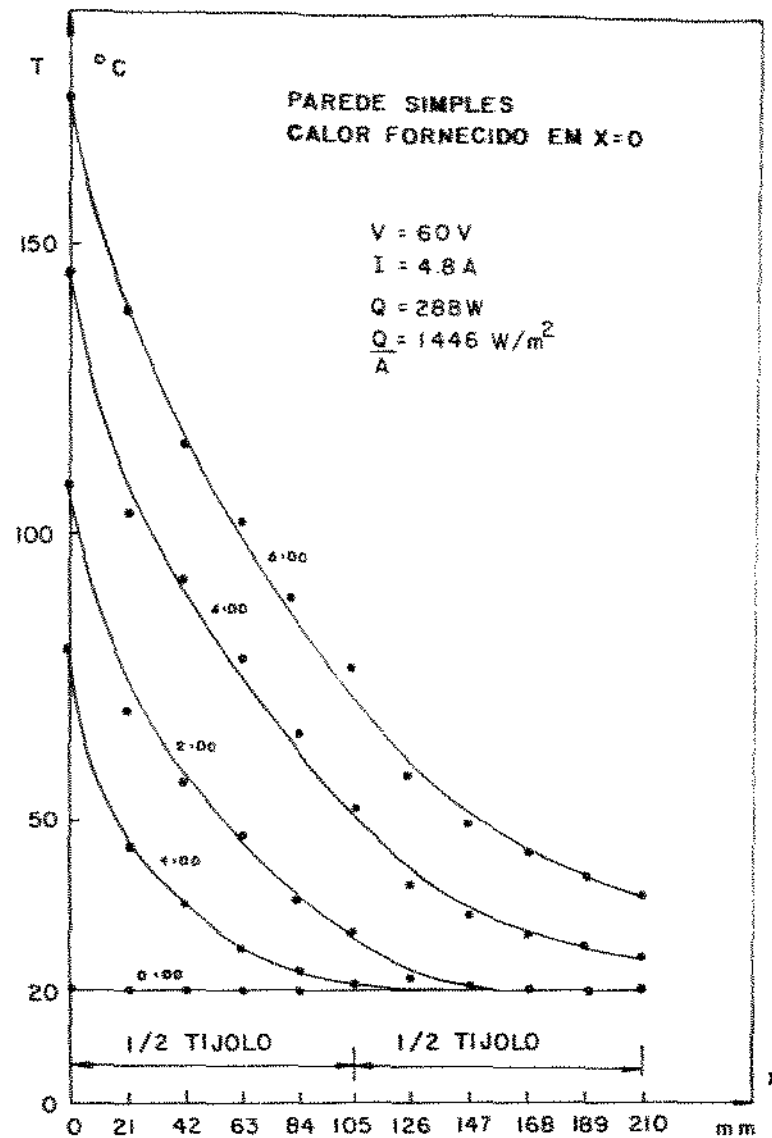


Figura A8.7 - Variação da temperatura com a espessura em uma parede convencional de tijolos (um tijolo de espessura).

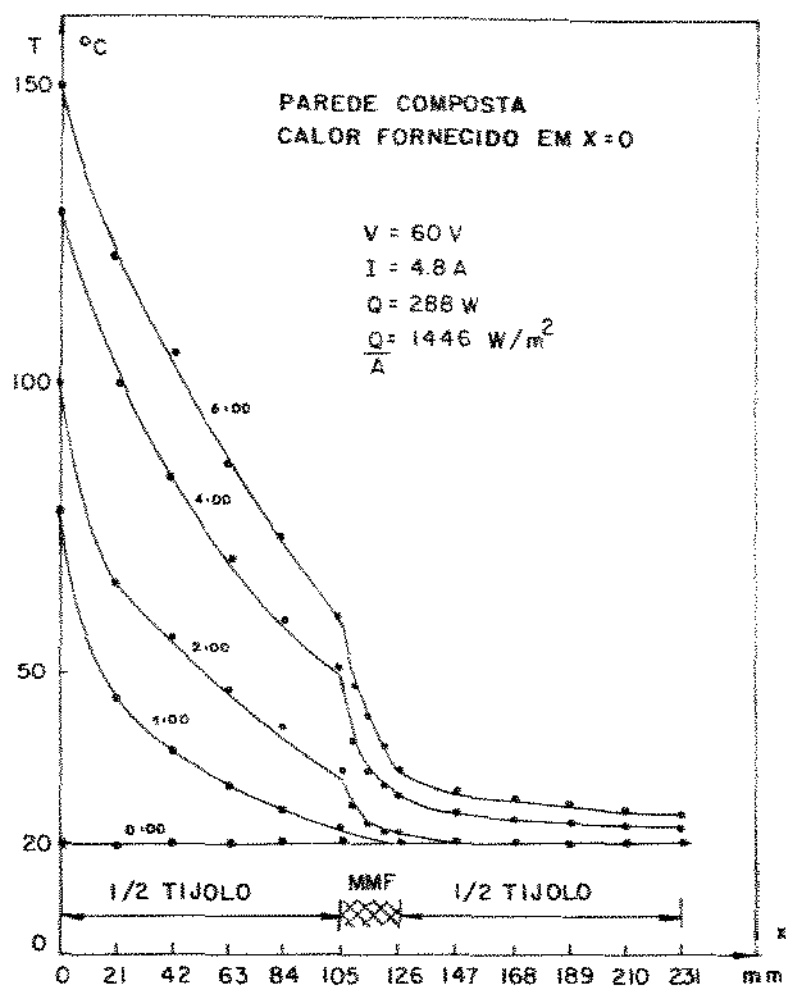


Figura A8.8 - Variação da temperatura com a espessura em uma parede térmica de tijolos (espessura de um tijolo mais 20 mm de material de mudança de fase).

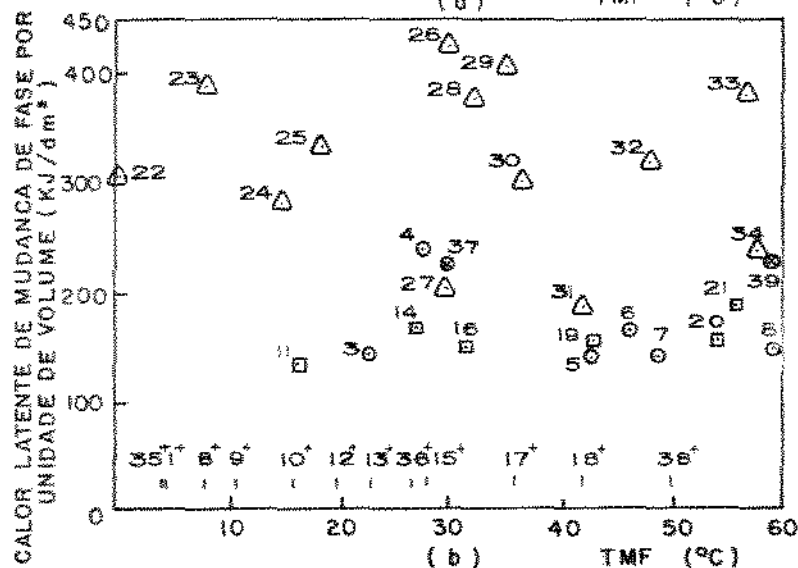
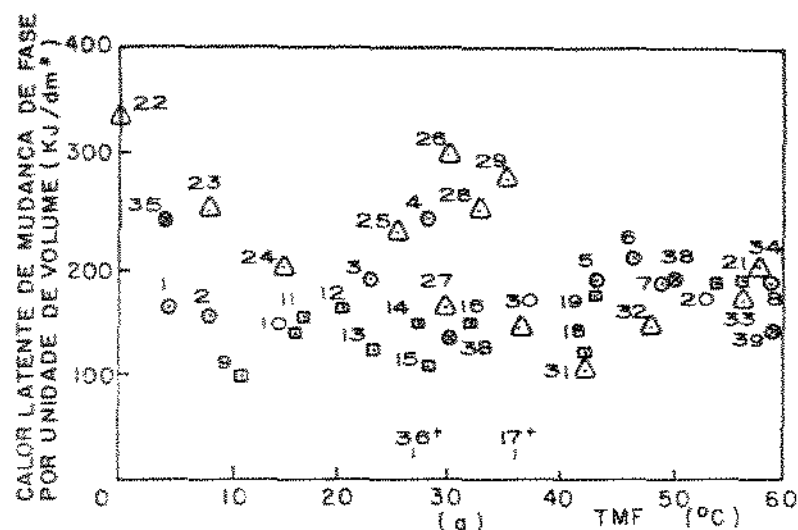
## ANEXO 9

### ESCOLHA DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE E DETERMINAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.

- a) - Escolha do material de mudança de fase e de sua temperatura de mudança de fase.

Nos trabalhos que envolvem o aproveitamento da energia solar, os materiais de mudança de fase (como se verifica nas referências: SOLOMON [01] [35], VISKANTA [02], BUDDHI [28], BENARD [29], [30], ZHANG [31], BISWAS [32], BENARD [33], GÜÇER [34], HUANG [36]), na sua totalidade, são utilizados como armazenadores de energia e não como "isolantes térmicos" como é o caso deste trabalho. Em assim sendo, as temperaturas de mudança de fase dos materiais utilizados, encontram-se na faixa de 28°C à 90°C onde os pesquisadores não se ateem a um único tipo de material mas à aquele que melhor atende as condições de seu experimento. Desta forma tem-se no total um conjunto bastante variado de materiais de mudança de fase mas na faixa de temperatura acima da temperatura de conforto. Este fato, levou a procura de trabalhos e referências que estudassem ou necessitassem da variação da temperatura de mudança de fase, dentro dos valores pouco abaixo da faixa acima citada. Isto possibilitou a montagem da Figura A9.1, levantada junto as referências Abhat (13); Feldman (15); Abhat (16); Perry (17); Lorsch (18) e Yoneda (19), e dentro dos materiais possíveis optou-se pelos polietilenos glicóis. Esta escolha se prendeu mais as facilidades de compra. Este produto é fabricado e comercializado pelo Grupo Ultra sob o nome comercial de ATPEG.

Dentre os ATPEG normalmente comercializados os que adaptavam melhor às condições requeridas foram os ATPEG-600 e o ATPEG-1000 com uma faixa de temperatura de mudança de fase, respectivamente, entre 21-23°C e 35-36°C.



#### PARAFINAS

- 1  $C_{14}$
- 2  $C_{16} - C_{18}$
- 3  $C_{22} - C_{24}$
- 4  $C_{30}$
- 5  $C_{16} - C_{28}$  (6106)
- 6  $P_{118}$
- 7  $C_{20} - C_{22}$  (5838)
- 8  $C_{22} - C_{24}$  (6035)
- 9 COMPOSTOS ORGÂNICOS
- 10 Palmítico de isopropila
- 11 Ácido Caprílico (octanóico)
- 12 Estereato de butila
- 13 Poliglicol 600
- 14 ATPEG 1000 20% ATPEG 600 80% (mistura de poliglicol)
- 15 Estereato de vinila
- 16 Ácido cáprico (decanóico)
- 17 Poliglicol 1000
- 18 12 Hidroxi Estereato de metila
- 19 Ácido láurico
- 20 Ácido mirístico
- 21 Poliglicol 6000

- 22  $H_2O$
- 23  $LiClO_4 \cdot 3H_2O$
- 24  $NaOH \cdot 31/2 H_2O$
- 25  $KF \cdot 4 H_2O$
- 26  $LiNO_3 \cdot 3 H_2O$
- 27  $CaCl_2 \cdot 6 H_2O$
- 28  $Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$
- 29  $Na_2HPO_4 \cdot 12 H_2O$
- 30  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$
- 31  $KF \cdot 2 H_2O$
- 32  $Na_2S_2O_8 \cdot 5 H_2O$
- 33  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$
- 34  $NaCH_3COO \cdot 3 H_2O$

#### COMPOSTOS INORGÂNICOS

- 35  $Na_2SO_4$  (31%) +  $NaCl$  (13%) +  $KCl$  (13%) +  $H_2O$
- 36  $CaCl_2$  (48%) +  $NaCl$  (4,3%) +  $KCl$  (0,4%) +  $H_2O$
- 37  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (67%) +  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (33%)
- 38 Propionamida (25,1%) + Ácido palmítico (74,9%)
- 39  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (53%) +  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (47%)

+ Indica somente a TMF do MMF (calor latente não determinado)

COMPOSTOS INORGÂNICOS EUTÉTICOS  
(porcentagem em massa)

- 35  $Na_2SO_4$  (31%) +  $NaCl$  (13%) +  $KCl$  (13%) +  $H_2O$
- 36  $CaCl_2$  (48%) +  $NaCl$  (4,3%) +  $KCl$  (0,4%) +  $H_2O$
- 37  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (67%) +  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (33%)
- 38 Propionamida (25,1%) + Ácido palmítico (74,9%)
- 39  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (53%) +  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (47%)

Figura A9.1 - Calor de fusão por unidade de massa (a) e por unidade de volume (b) em função da temperatura de mudança de fase na faixa de 0° a 60°C.

Para se chegar na faixa de temperatura almejada fizeram-se misturas de um produto com o outro, levantando-se a correspondente faixa de temperatura de mudança de fase.

Dois processos para a determinação desta temperatura foram utilizados:

- a) investigação microscópica do ponto de fusão; e
- b) investigação do ponto de fusão em banho-Maria de temperatura controlada.

Na preparação das amostras utilizou-se uma balança semi-analítica da Micronal com precisão de 0,01g, preparando-se amostras de peso total em torno de 300g cada uma.

Pequena porção destas amostras foram retiradas e feito o teste de inspeção visual em um conjunto para investigação do ponto de fusão da Mettler composto de:

- unidade de controle
- hot stage for termional microscopy investigacion.
- microscópio comum 10/022 da Carl Zeisswes Germany

Os resultados estão plotados na Figura A9.2.

Como se nota pela Figura A9.2 os resultados para porcentagens mais baixas não foram apresentados e isto se deve ao fato do aparelho de investigação ter a temperatura de partida igual à temperatura ambiente que no caso era de 24°C.

Para superar este problema optou-se pelo levantamento do ponto de fusão em banho-maria. Neste caso as amostras foram colocadas em elenmeyer de 250ml e as mesmas colocadas simultaneamente em banho-maria de temperatura controlada com leitura mínima de 0,5°C.

A temperatura inicial do banho era controlada de forma a manter todas as amostras no estado sólido. Em seguida subia-se a temperatura de grau em grau permanecendo as amostras em cada grau num período não inferior a 40 minutos. Antes da mudança de grau uma inspeção visual era feita em cada amostra. E em caso de ocorrência de algum indicio de começo de fusão o tempo de permanência naquele grau era dobrado. Com este procedimento levantou-se o resultado mostrado na Figura A9.3.

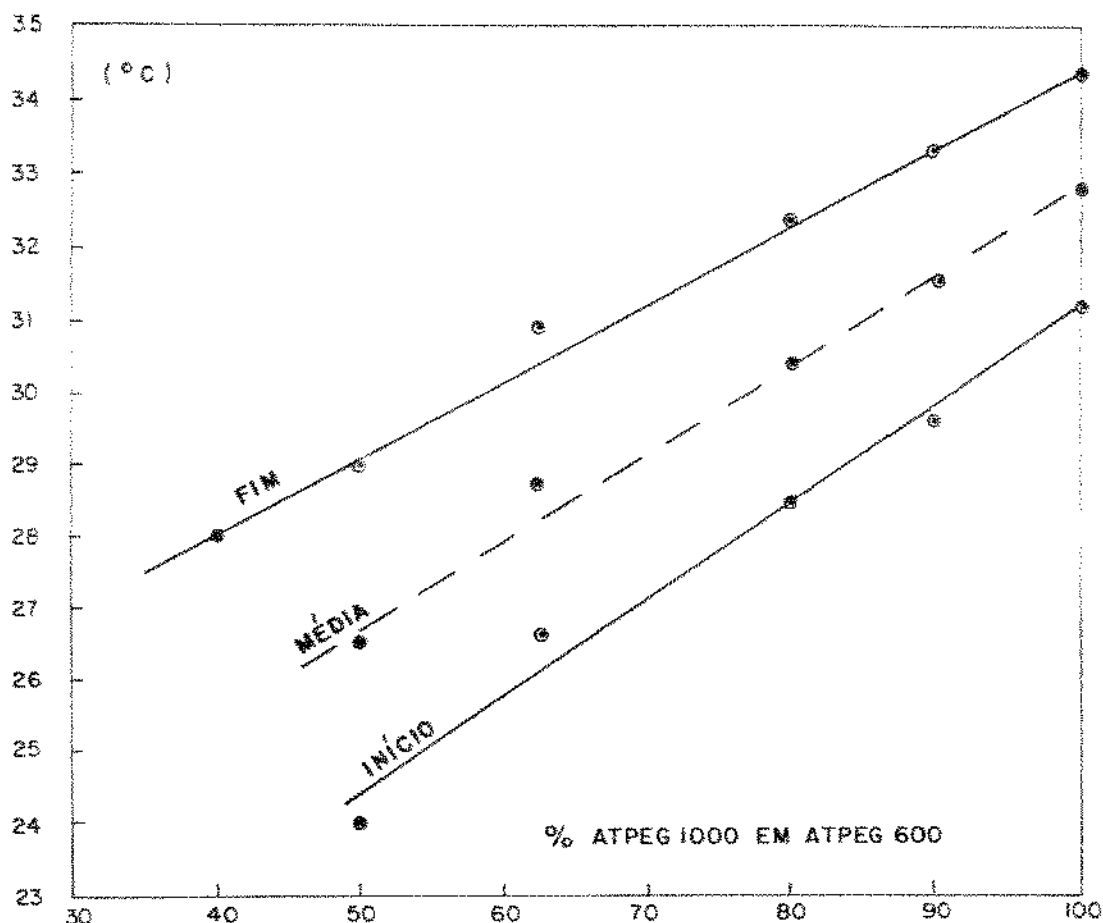


Figura A9.2 - Temperatura de fusão da mistura de ATPEG 1000 em ATPEG 600 pelo método de inspeção microscópica.

Levantado o campo de temperatura de mudança de fase para várias misturas de ATPEG-1000 em ATPEG-600. Escolheu-se a mistura ideal no caso 20% de ATPEG 1000 ou seja uma mistura na proporção de 1:4 de ATPEG 1000 em ATPEG-600.

Uma vez definida a mistura ideal passou-se para a determinação das propriedades termofísicas.

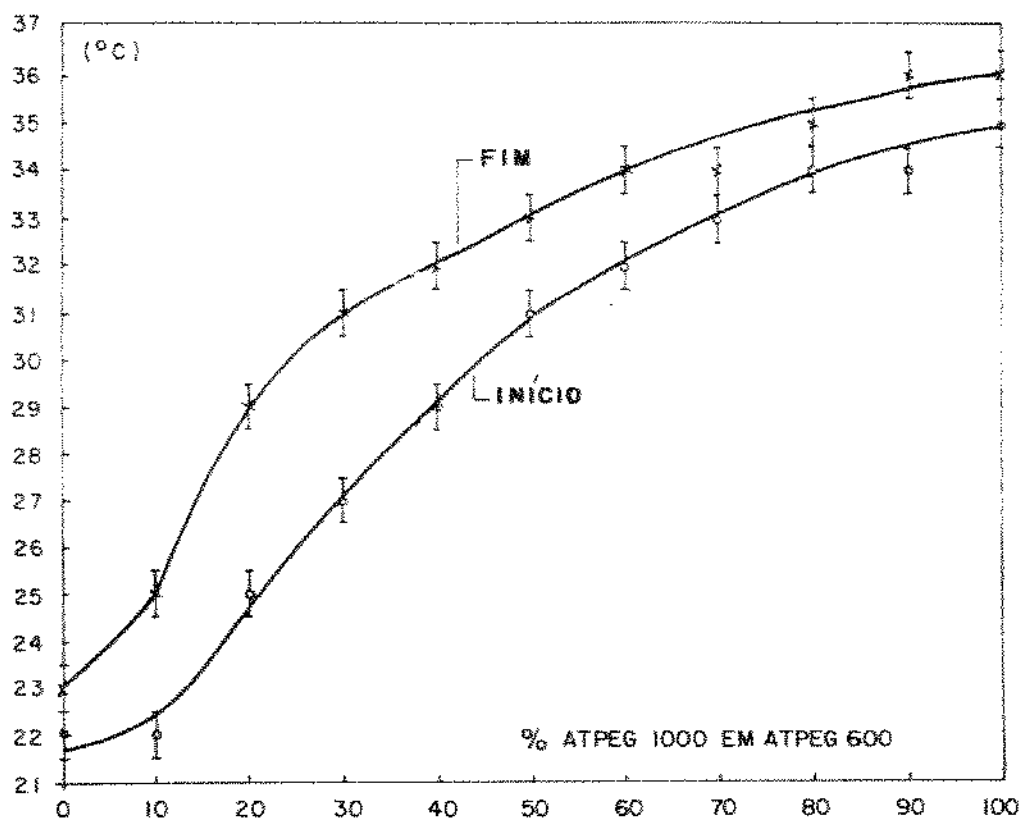


Figura A9.3 - Temperatura de fusão das misturas de ATPEG 1000 em ATPEG-600 pelo método do banho-maria.

## b) Calor latente e calor específico

Neste item utilizou-se um calorímetro do Departamento de Química da UNICAMP no caso o DSC (Dupont 910 Differential Scanning Calorimetry), controlado pela Dupont 1090 Analisador térmico Computadorizado.

Com uma pequena amostra de Índio Metálico traça-se a curva de calibração do calorímetro (Figura A9.4) de onde se obtém o fator de correção para os cálculos efetuados a partir das curvas obtidas das amostras de ATPEG (Figura A9.5) chegando-se ao seguintes resultados para a amostra de 4:1 de ATPEG 500 em ATPEG 1000.

Temperatura de mudança de fase =  $23 \pm 2,5^{\circ}\text{C}$

Calor latente de fusão =  $150,5 \text{ KJ/kg}$

Calor específico do sólido ( $20^{\circ}\text{C}$ ) =  $1,64 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{K}$

Calor específico do líquido ( $40^{\circ}\text{C}$ ) =  $1,87 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{K}$

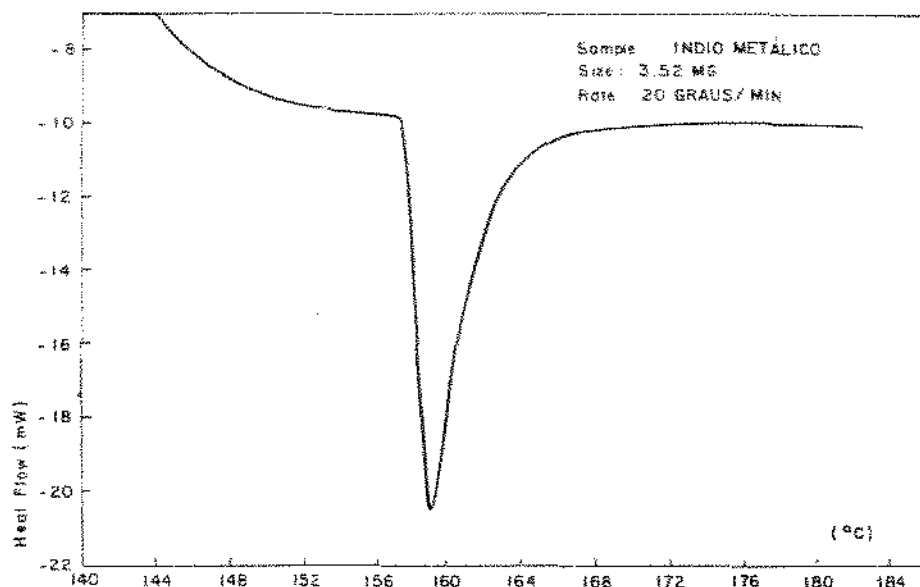


Figura A9.4 - Diagrama de fusão do índio metálico.

### c) Massa Específica

Determinada através do volume e da massa.

Amostra: 4:1 em massa de ATPEG 600 em ATPEG 1000.

Balança: semi analítica, precisão 0,1 g; carga máxima 3000,0 g, marca Helmac HM 300.

Volume: Proveta 1000 ml; divisão mínima 10 ml

Banho maria de temperatura controlada com precisão 0,5°C.

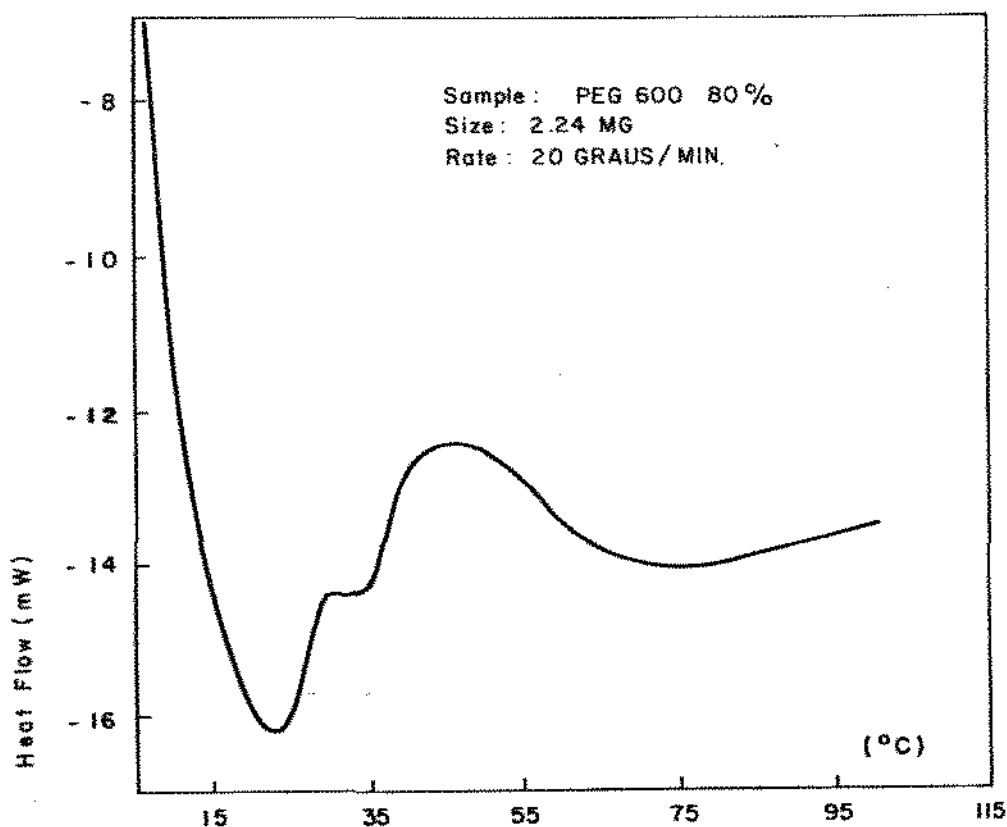


Figura A9.5 - Diagrama de fusão da mistura 4:1 de ATPEG 600 e ATPEG 100.

Os valores da massa específica para o líquido estão mostrados na Figura A9.6.

Para a fase sólida à temperatura de 20 °C tem-se a massa específica com o seguinte valor: 1.135,4 Kg/m<sup>2</sup>.

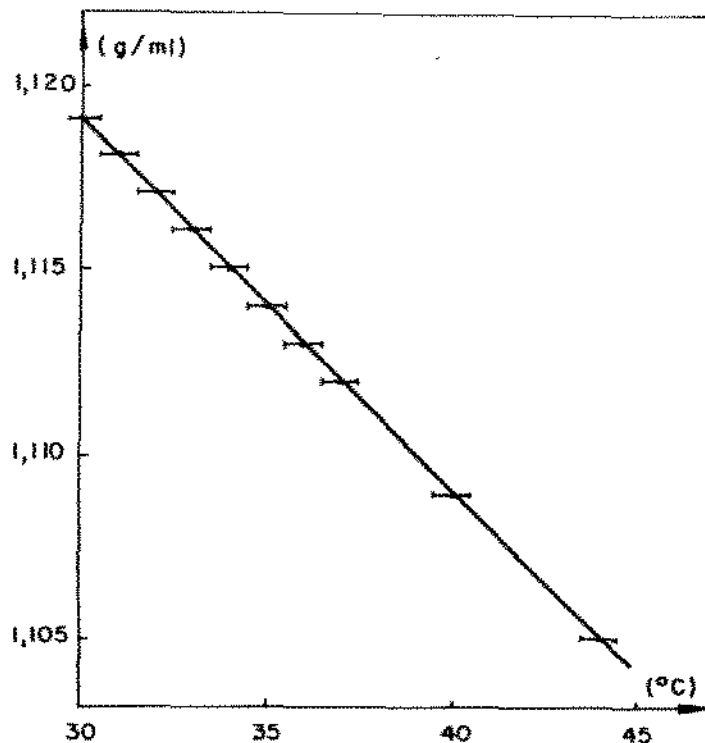


Figura A9.6 - Massa específica da fase líquida da mistura 4:1 de ATPEG 600 em ATPEG 1000.

#### d) Condutividade Térmica

Fez-se uma avaliação deste valor utilizando-se um aparelho para determinação de condutividade térmica por fluxo linear de calor, aparelho este em desenvolvimento nos laboratórios da área térmica. Utilizou-se como parâmetro de referência e de calibração

a água destilada chegando-se ao seguinte valor:

Condutividade térmica a uma temperatura média de 44°C  
para uma mistura 4:1 de ATPEG 600 em ATPEG 1000.

$$0,53 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

ANEXO 10  
RESULTADOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS

a) Paredes

a.1) Parede convencional

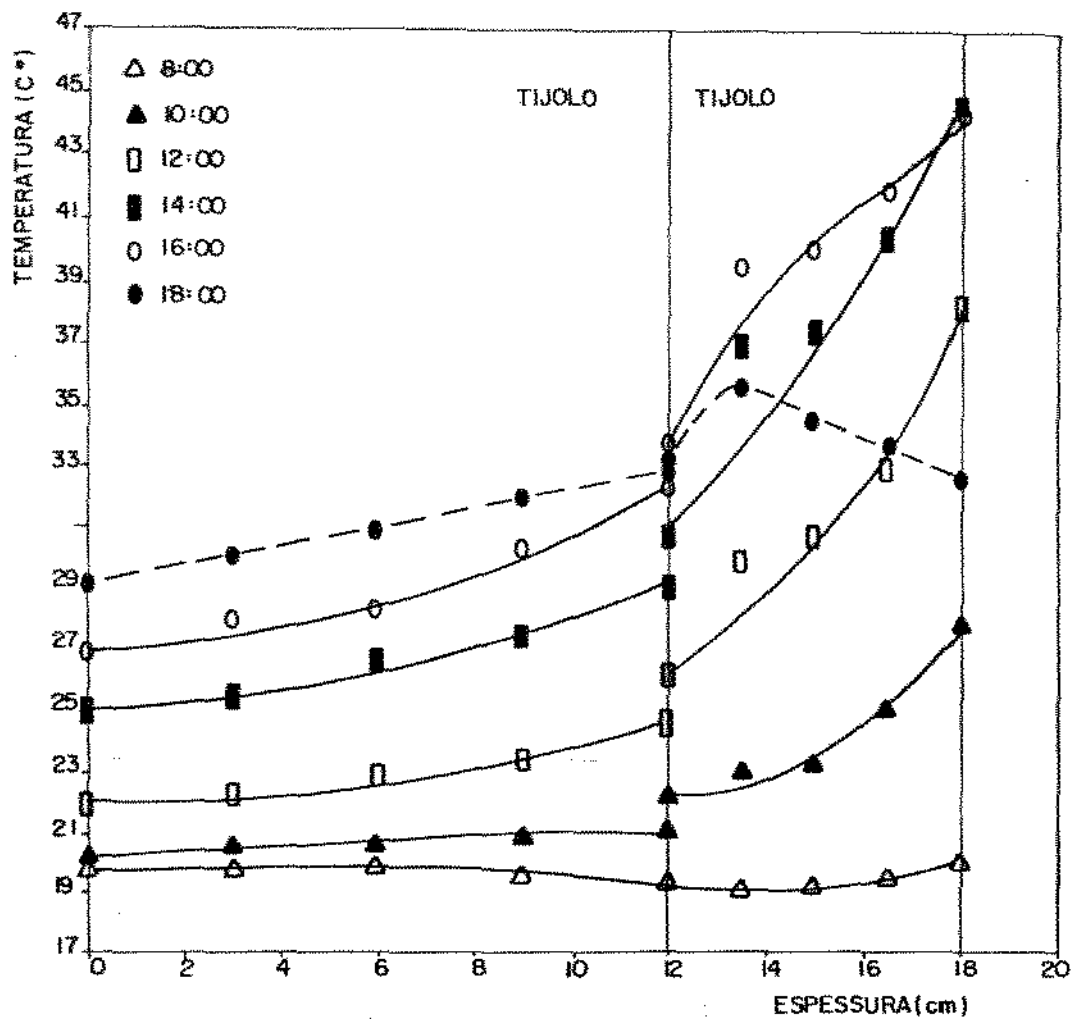


Figura A10.1 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 1).

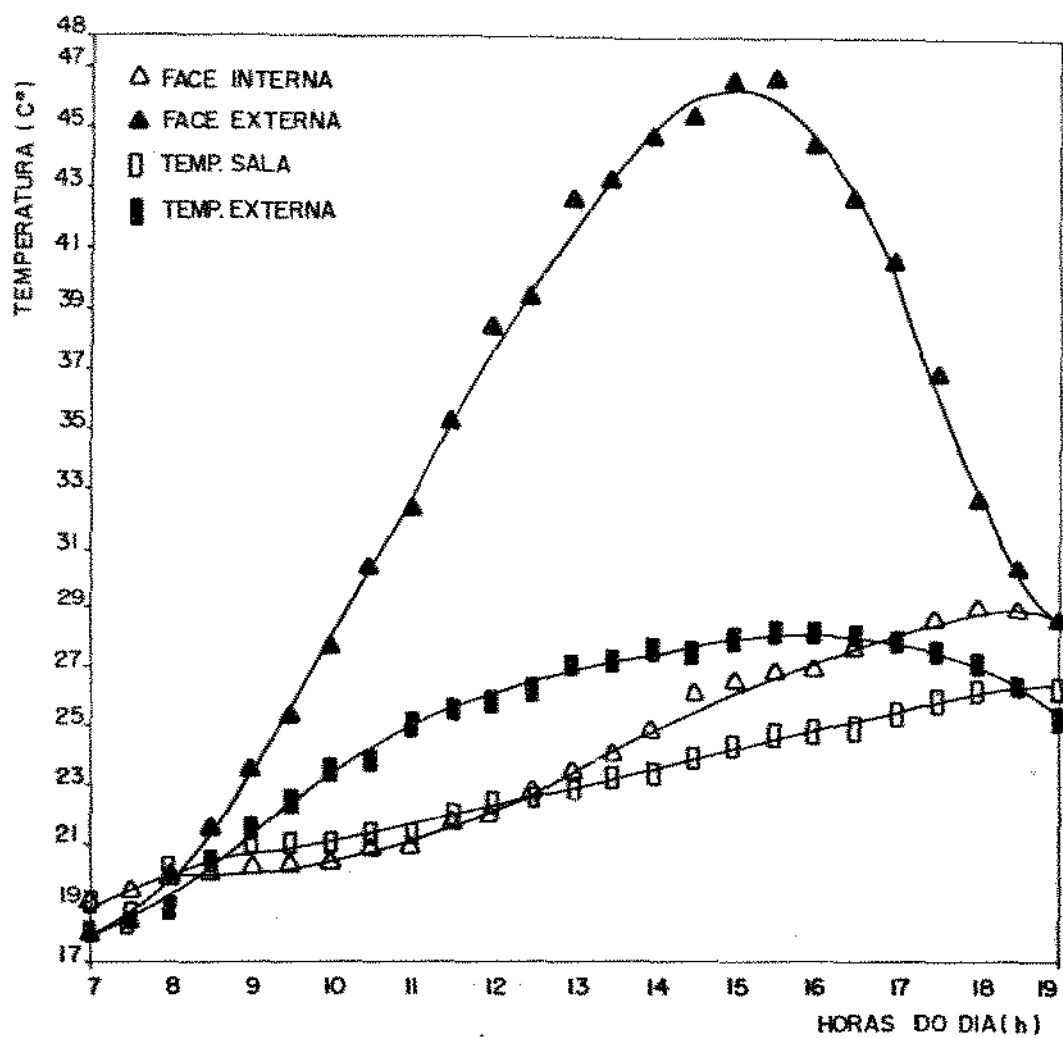


Figura A10.2 - Variação ao longo do tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 1).

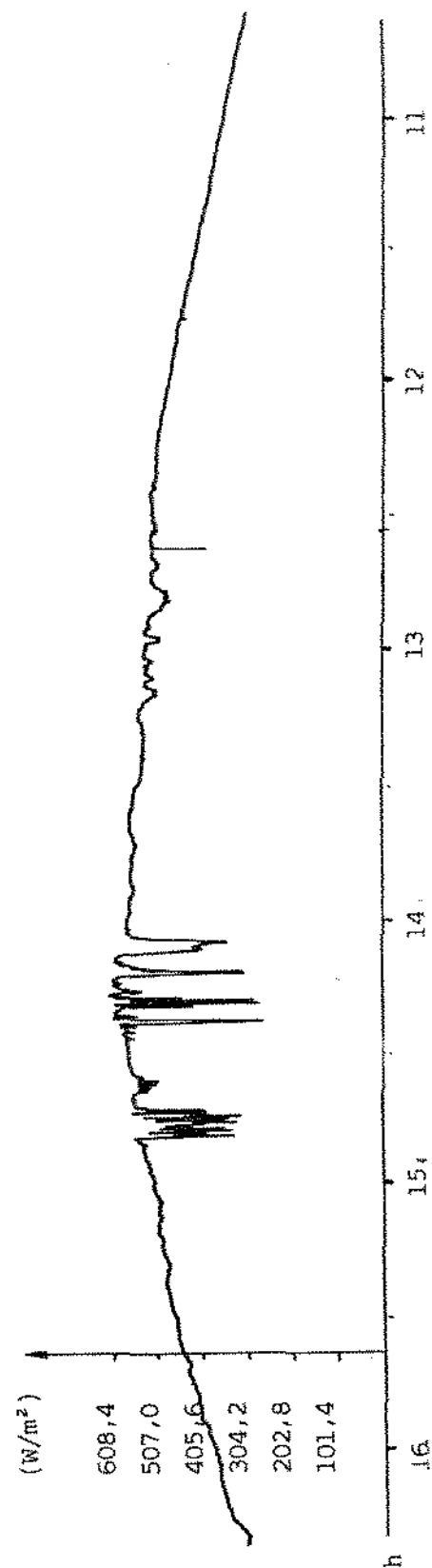


Figura A10.3 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 1 (radiômetro na vertical).

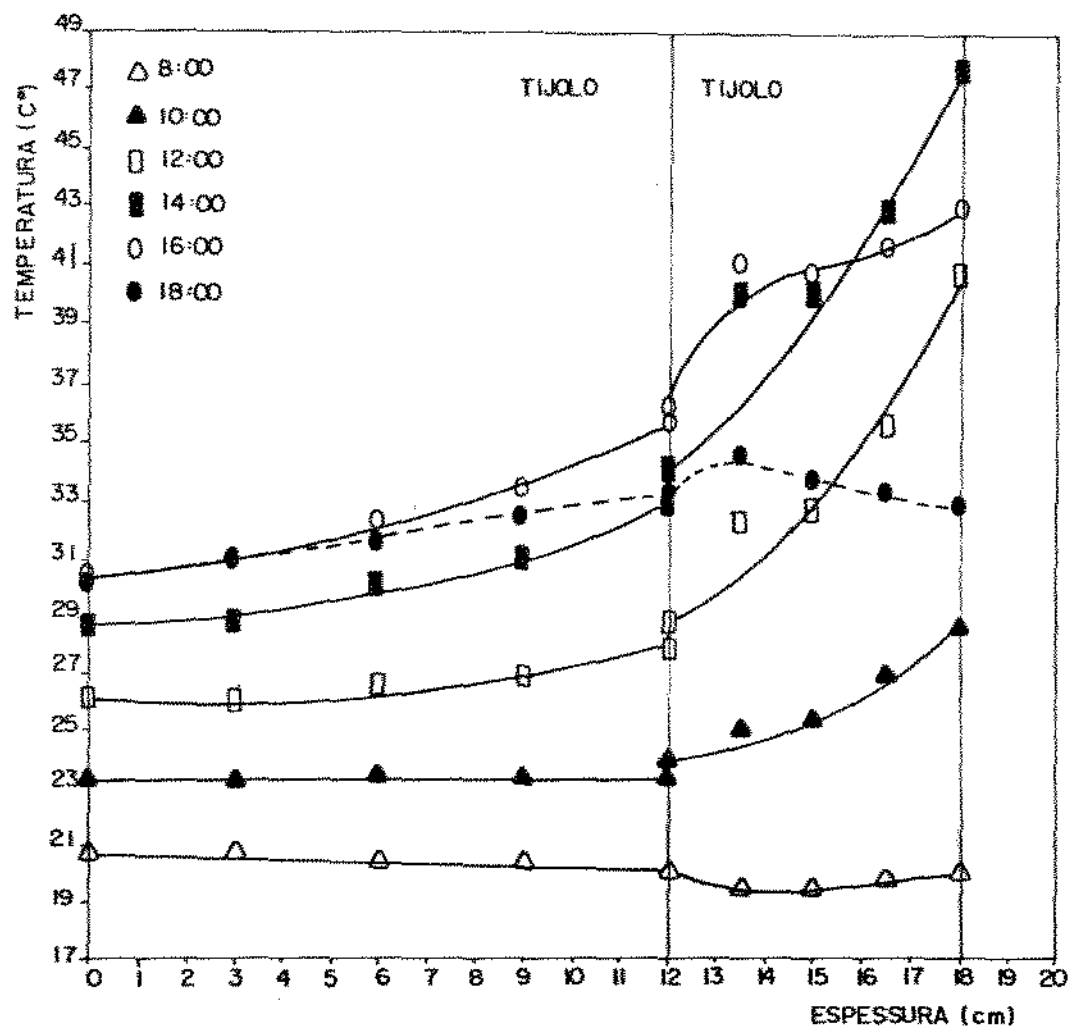


Figura A10.4 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 2).

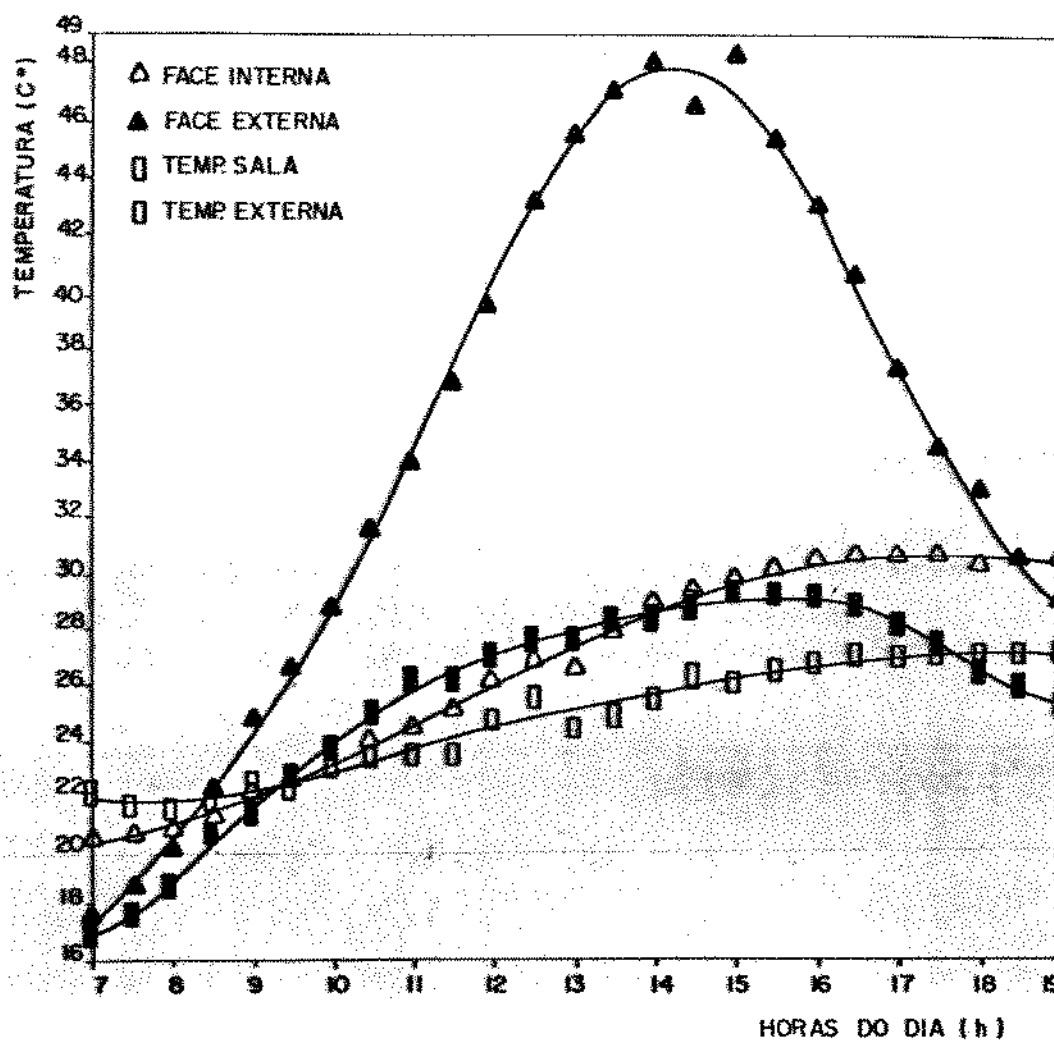


Figura A10.5 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional (experiência 2).

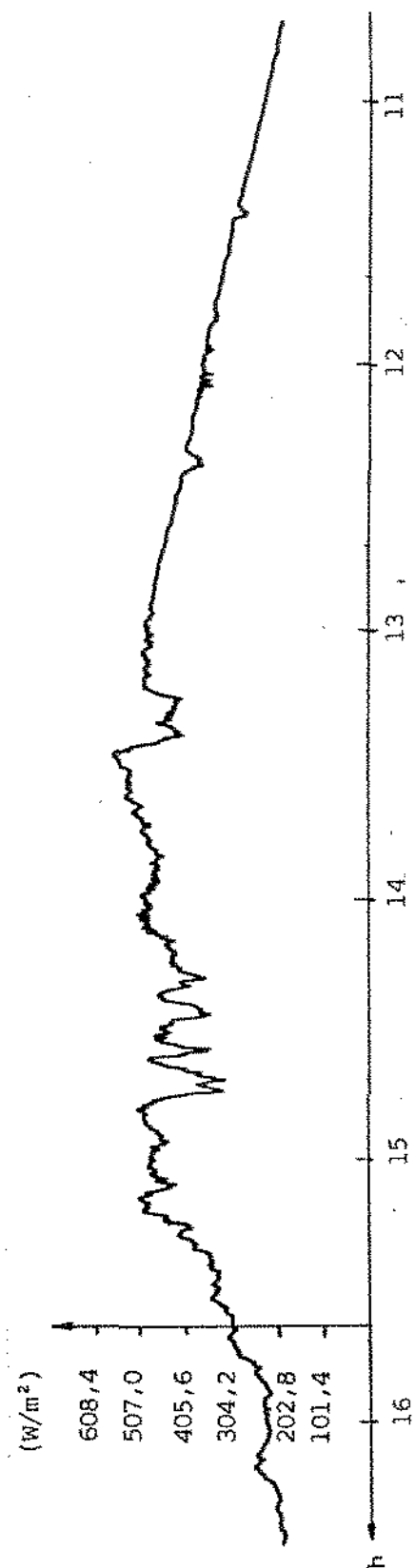


Figura A10.6 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 2 (radiação perpendicular a parede).

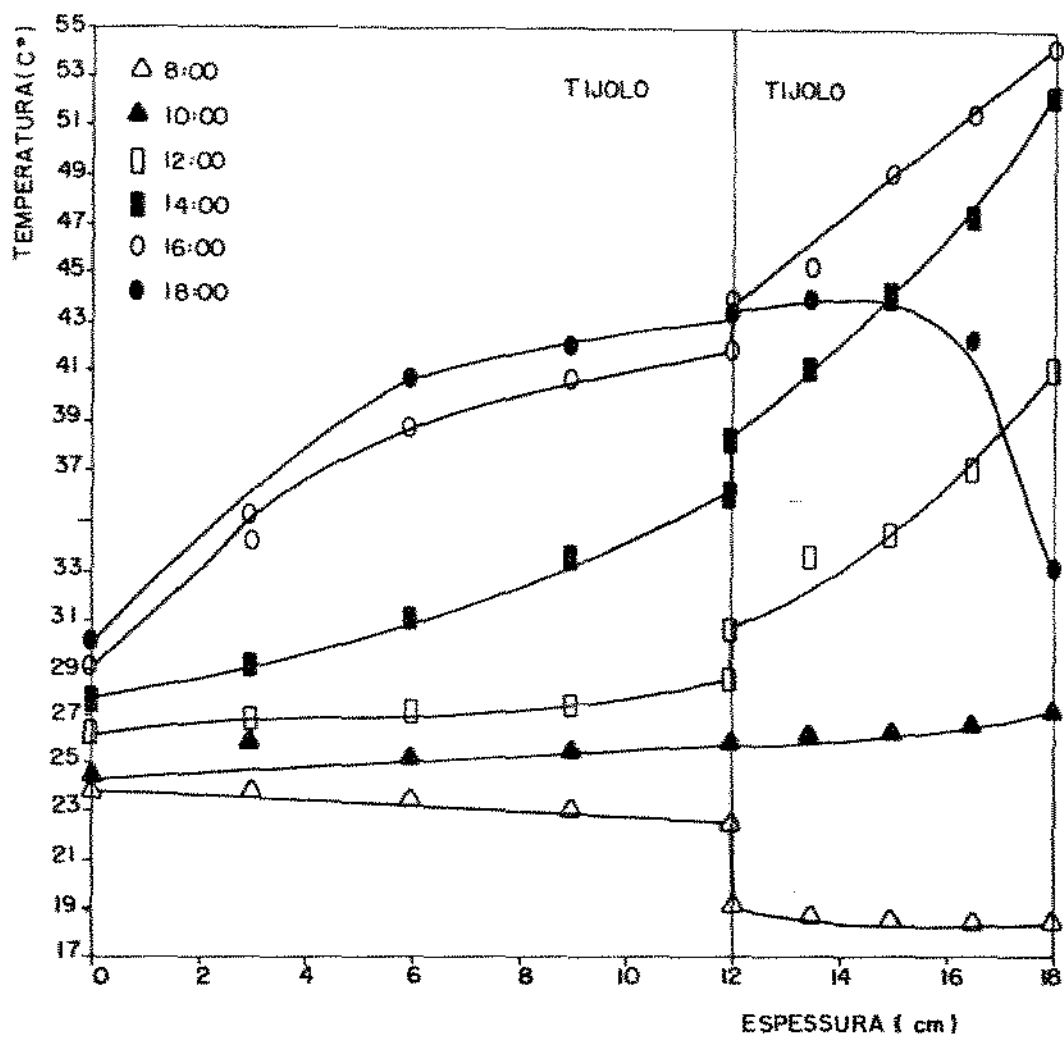


Figura A10.7 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 3).

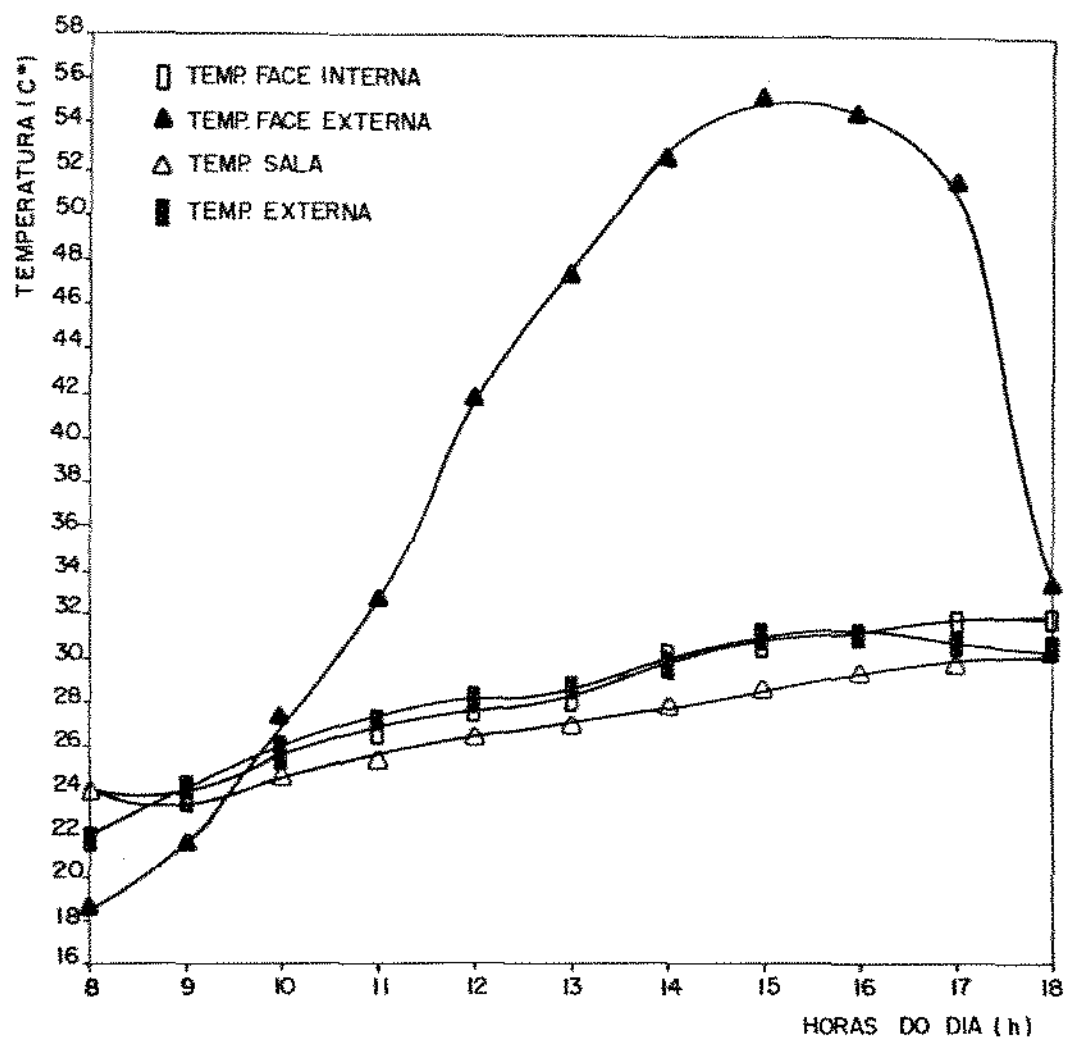


Figura A10.8 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 3).

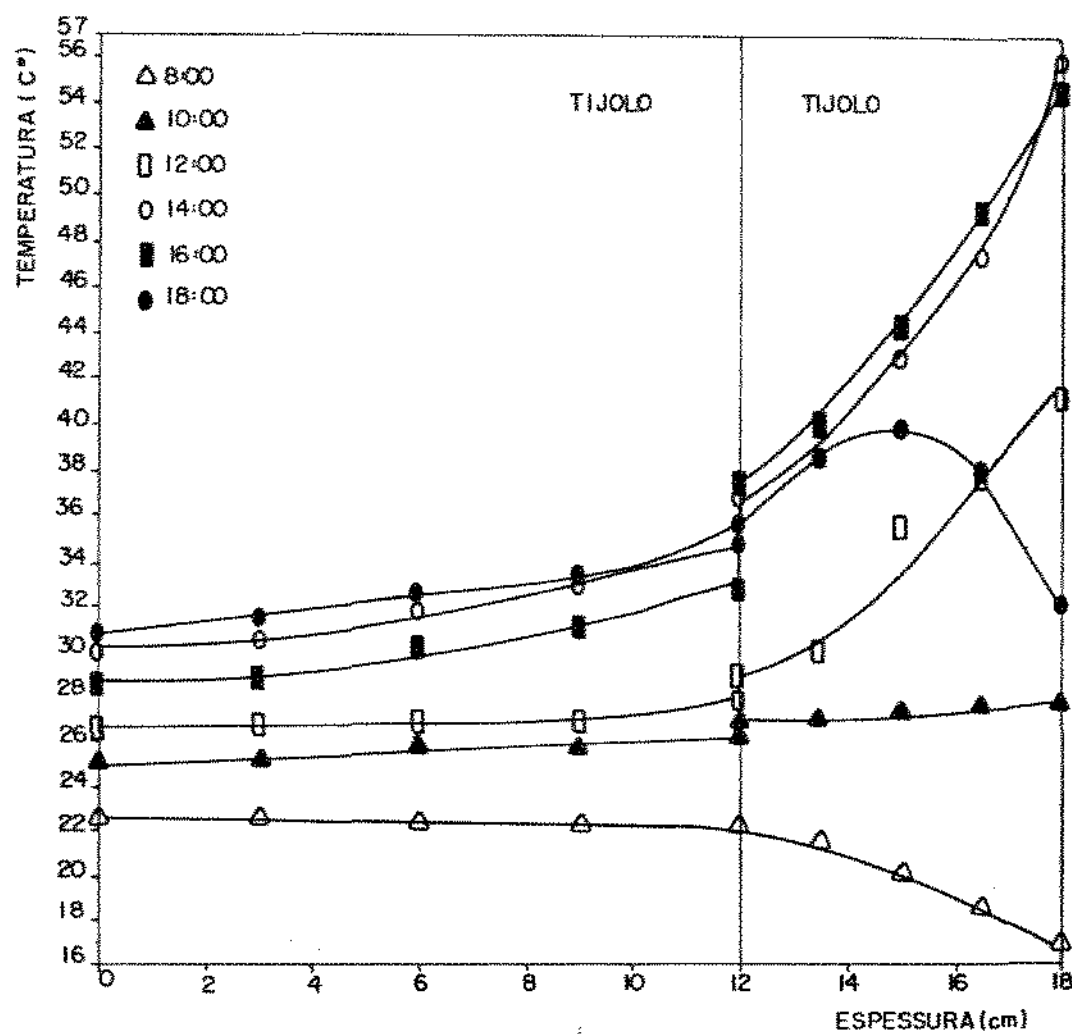


Figura A10.9 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 4).

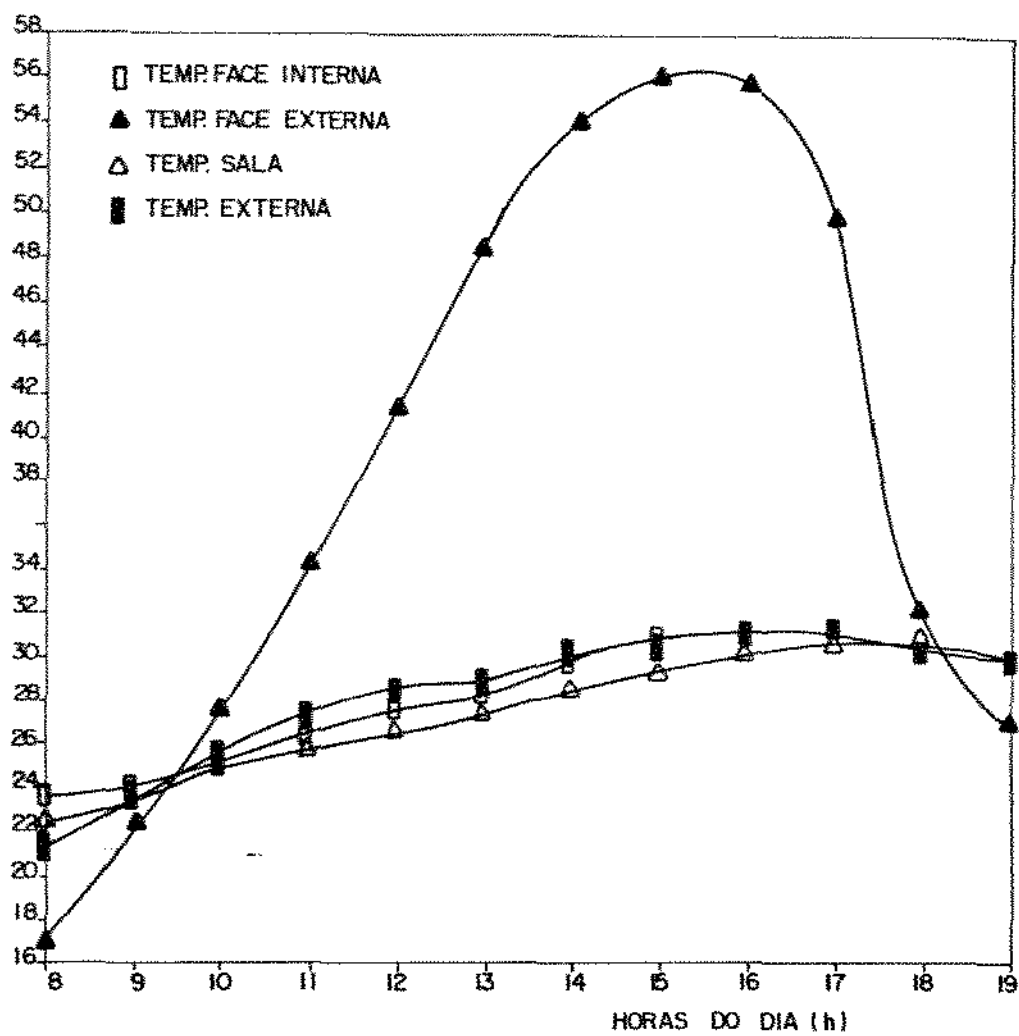


Figura A10.10 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional (experiência 4).

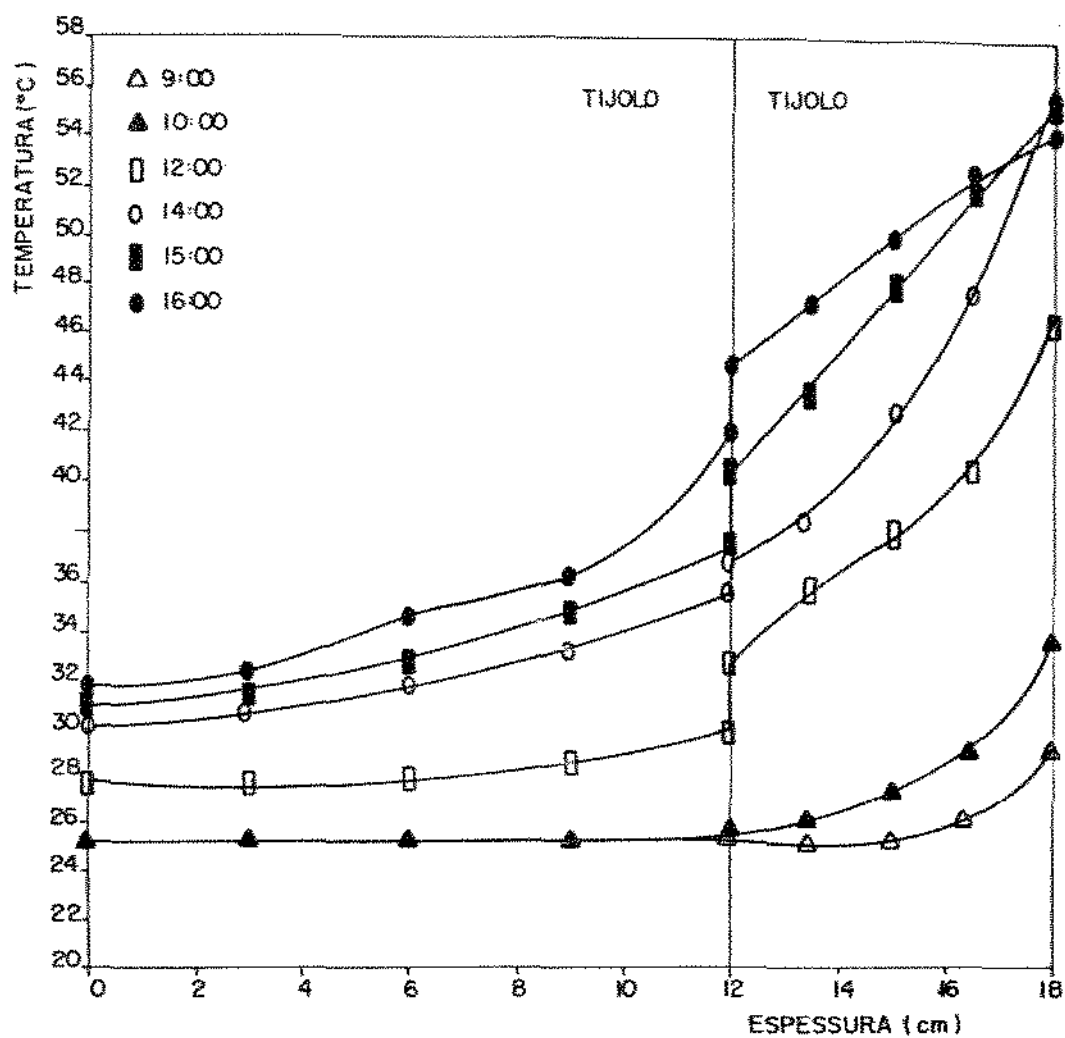


Figura A10.11 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede convencional nas horas do dia (experiência 5).

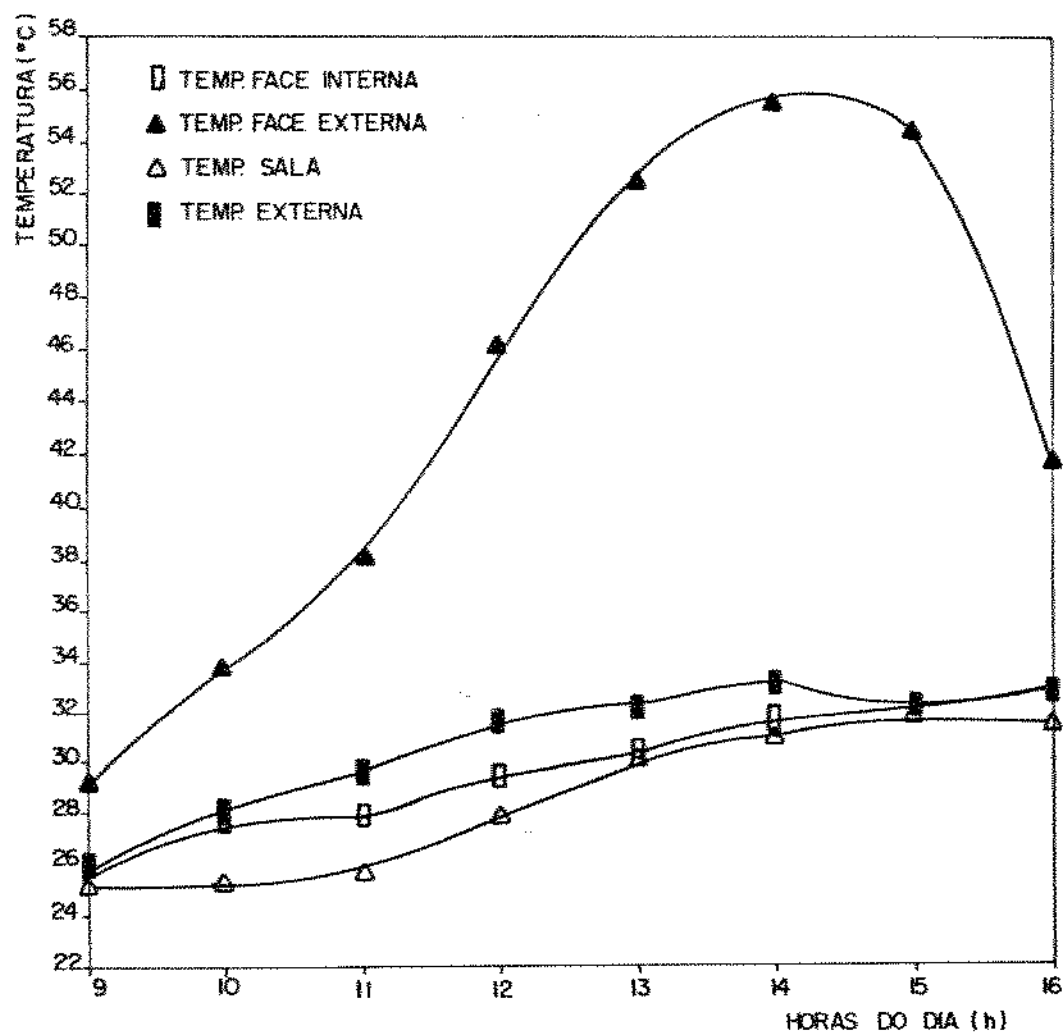


Figura A10.12 - Variação da temperatura com o tempo para a parede convencional ao longo do dia (experiência 5).

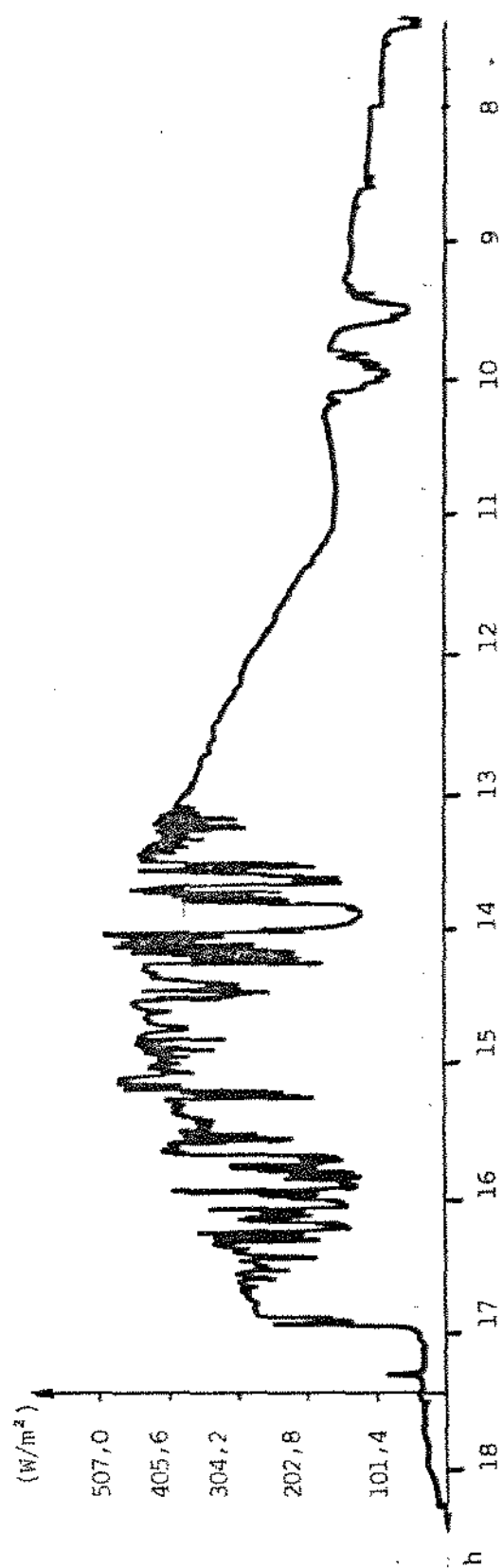


Figura A10.13 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 5 (radiação perpendicular a parede).

a.2) Paredes térmicas

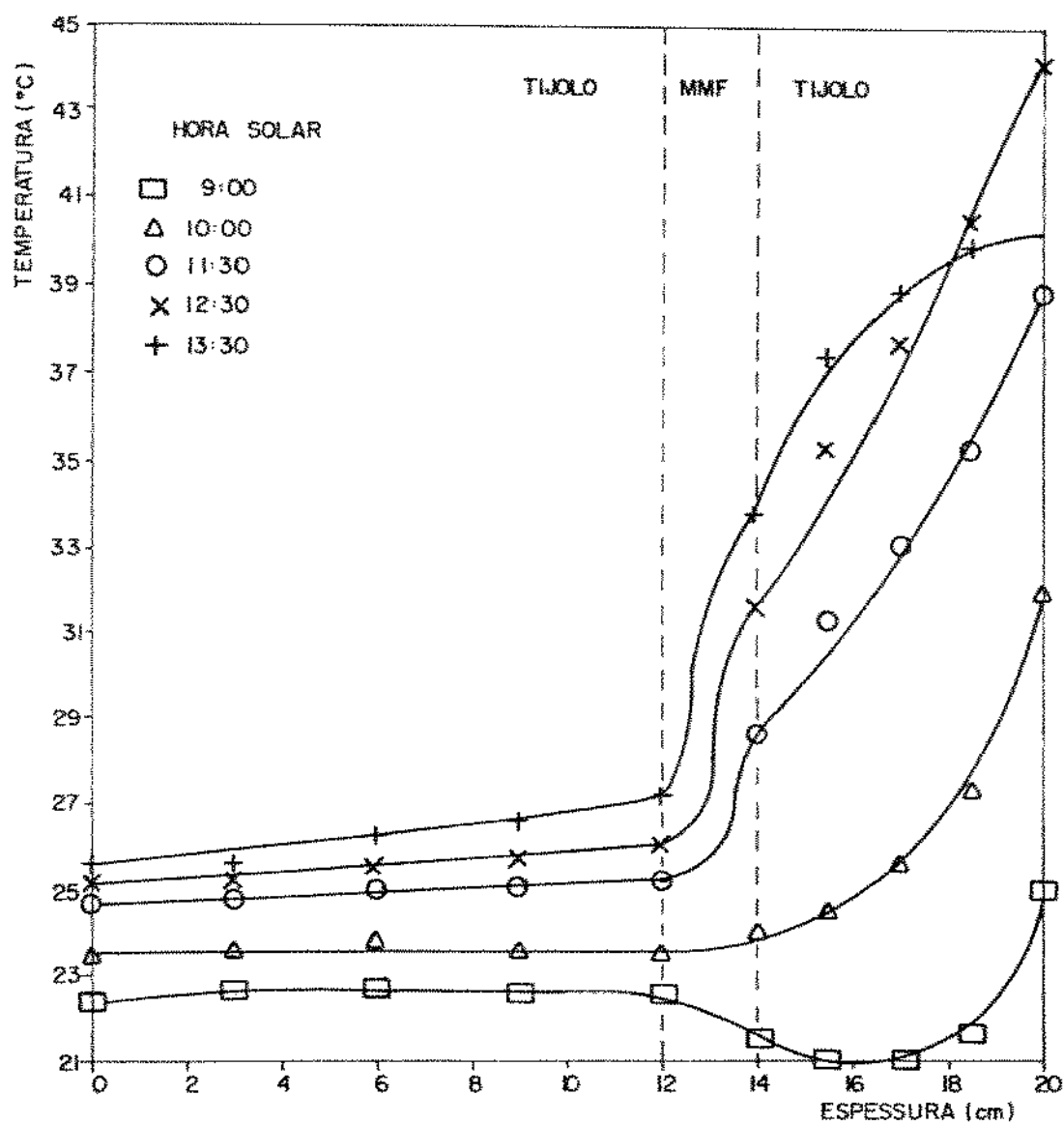


Figura A10.14(a) - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas horas do dia (experiência 8).

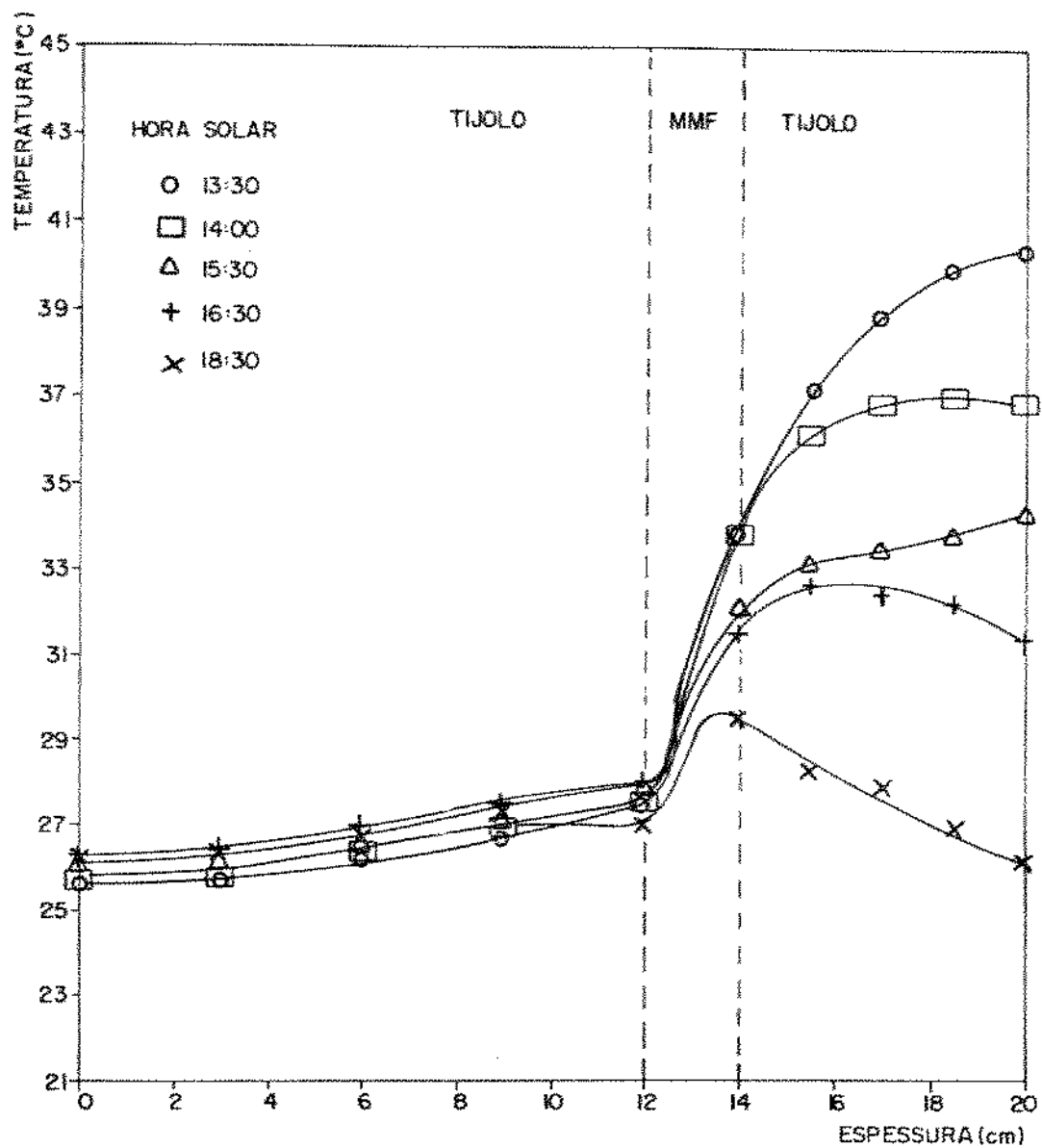


Figura A10.14(b) - Continuação da figura A10.14(a).

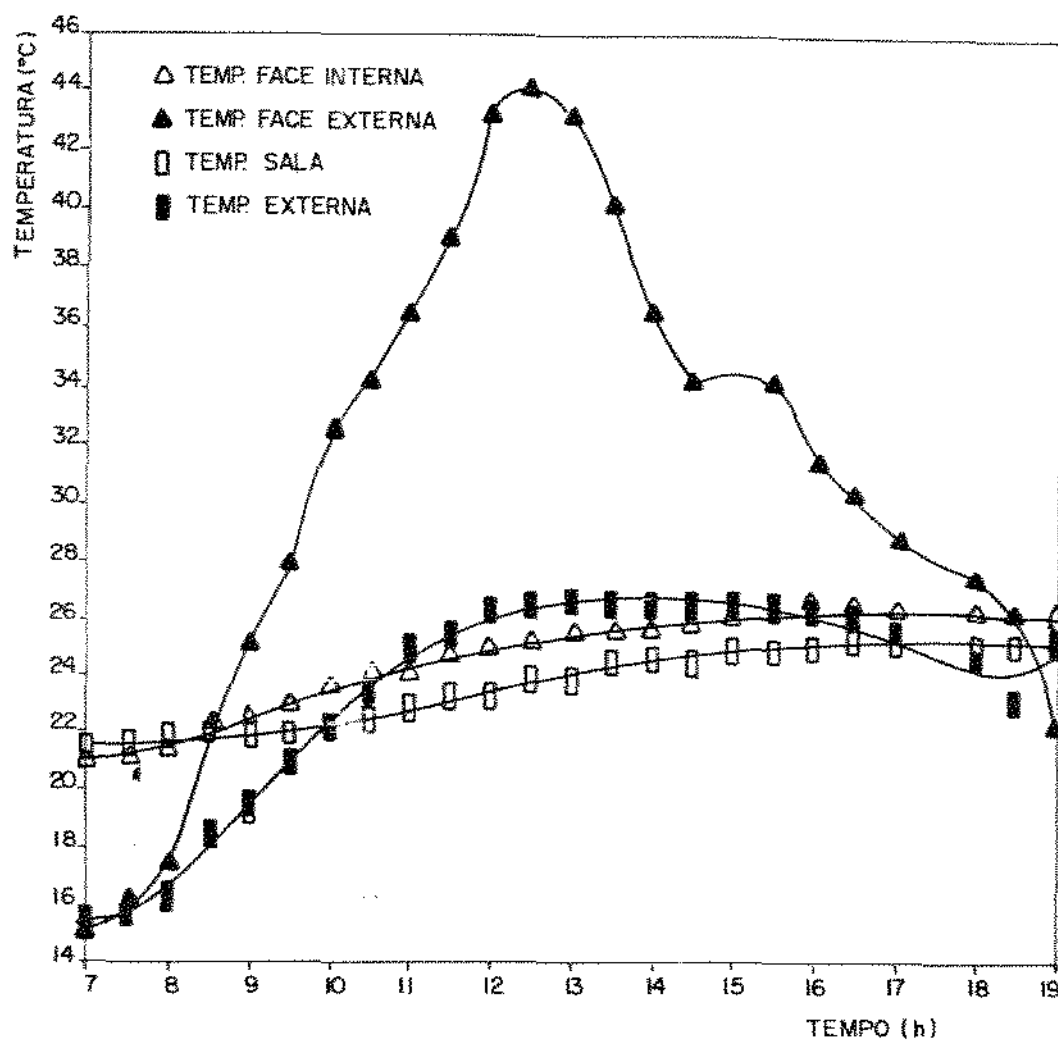


Figura A10.15 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 8).

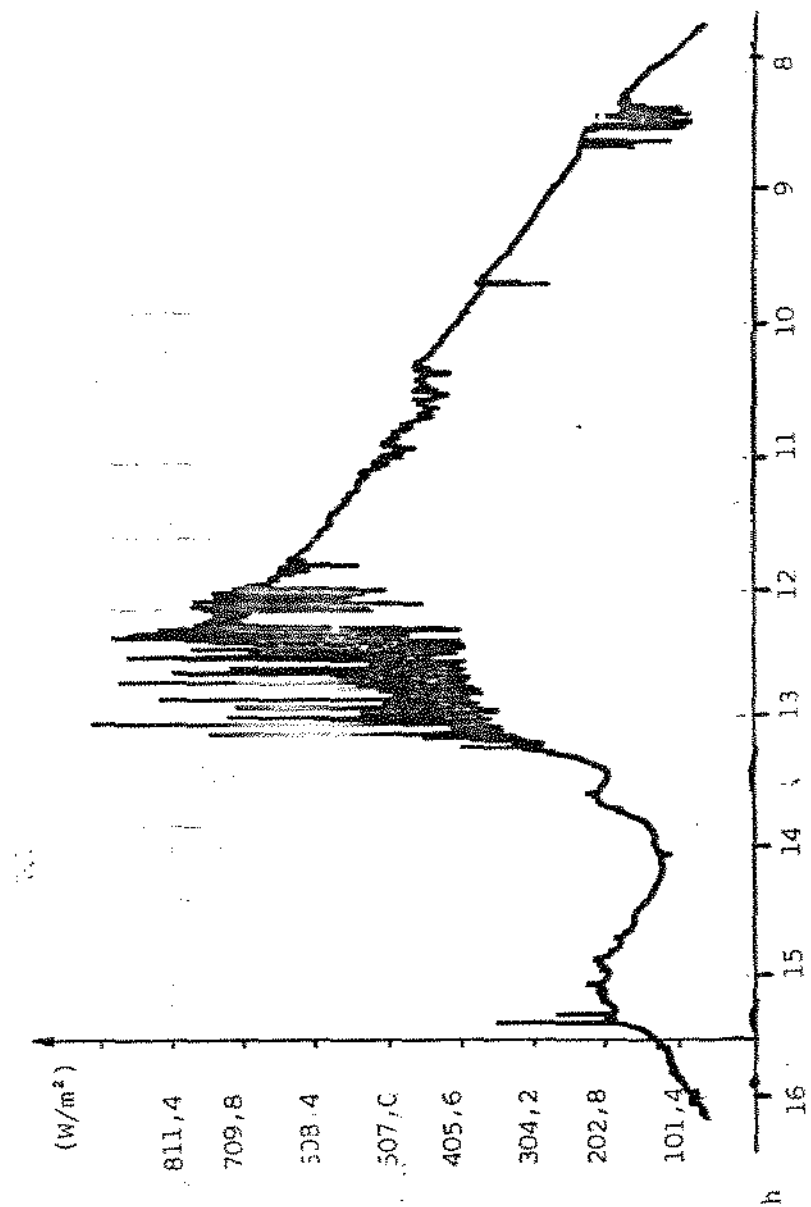


Figura A10.16 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 8 (radiação perpendicular a parede).

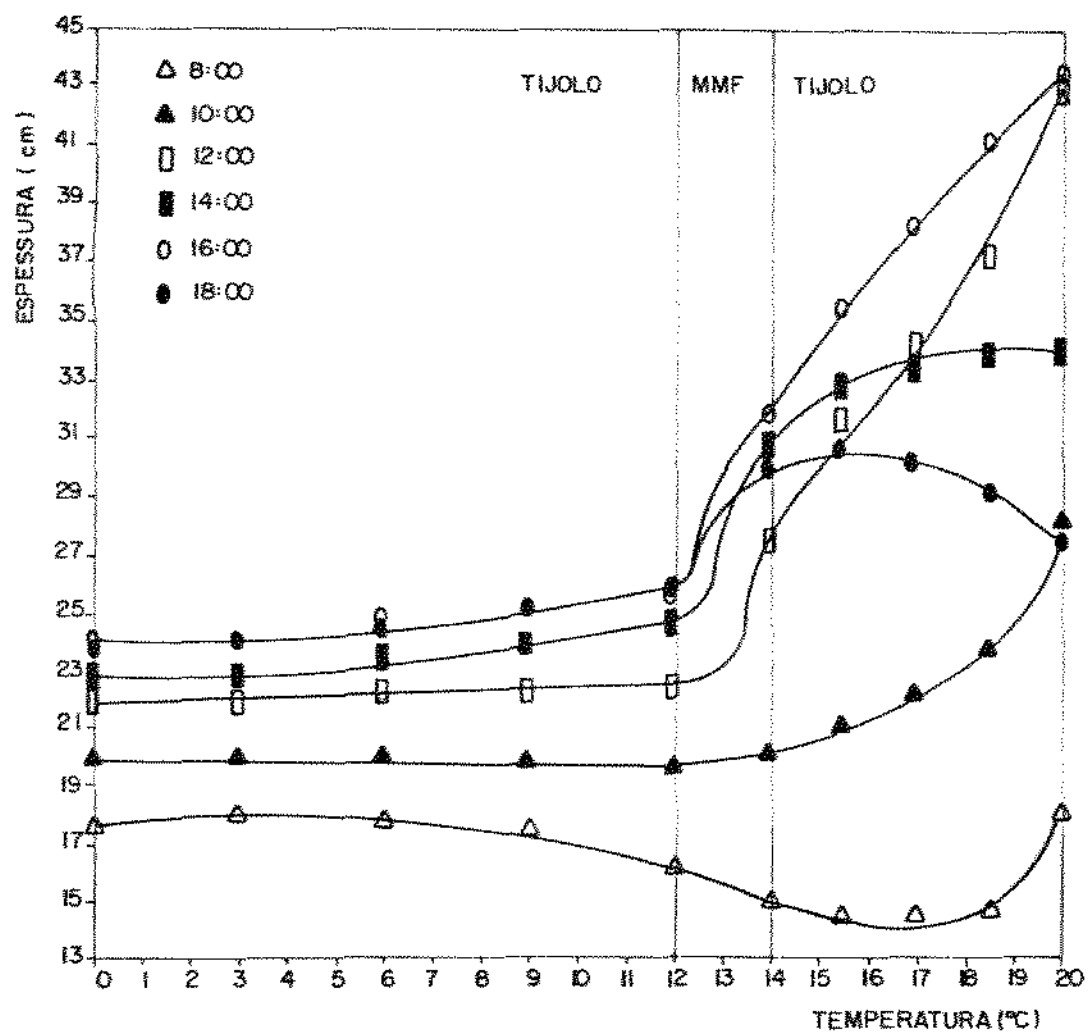


Figura A10.17 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 9).

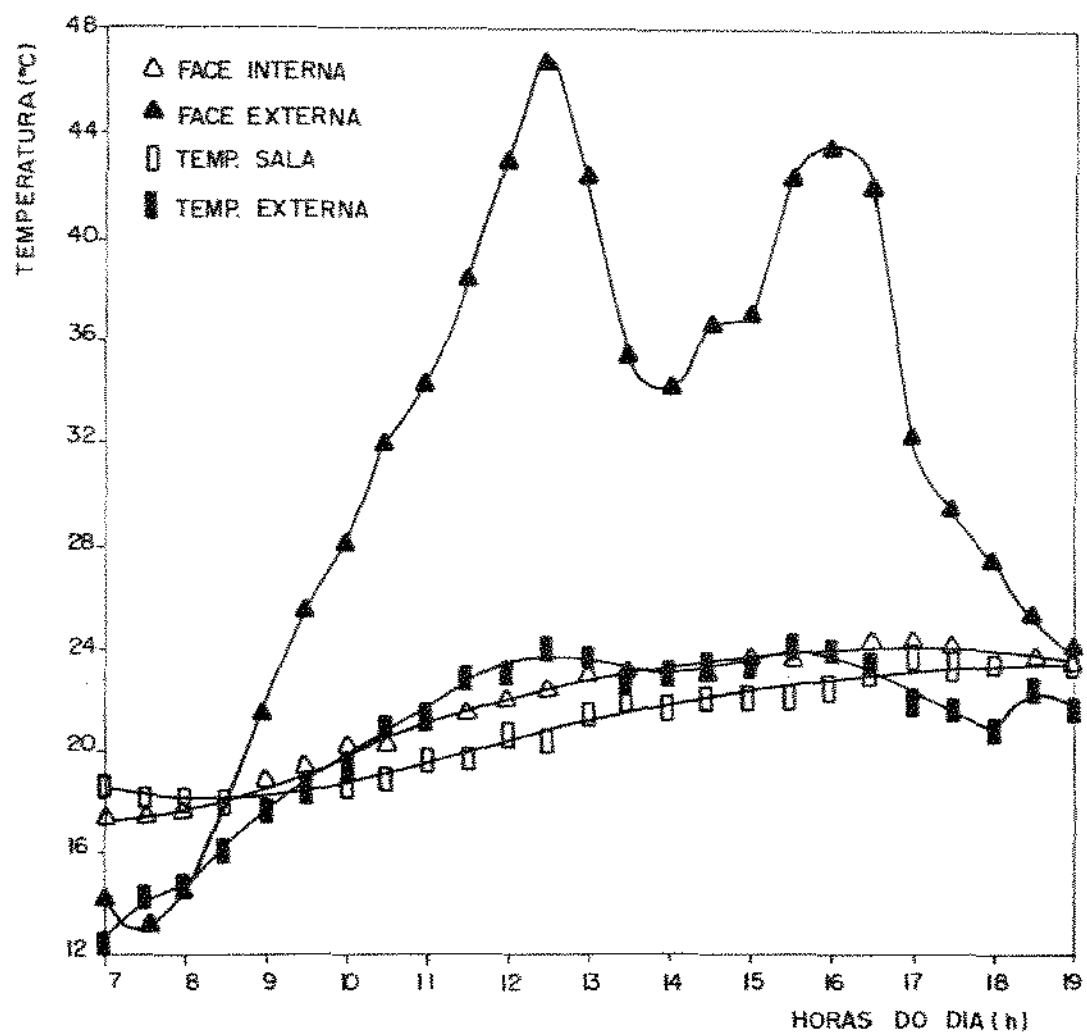


Figura A10.18 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 9).

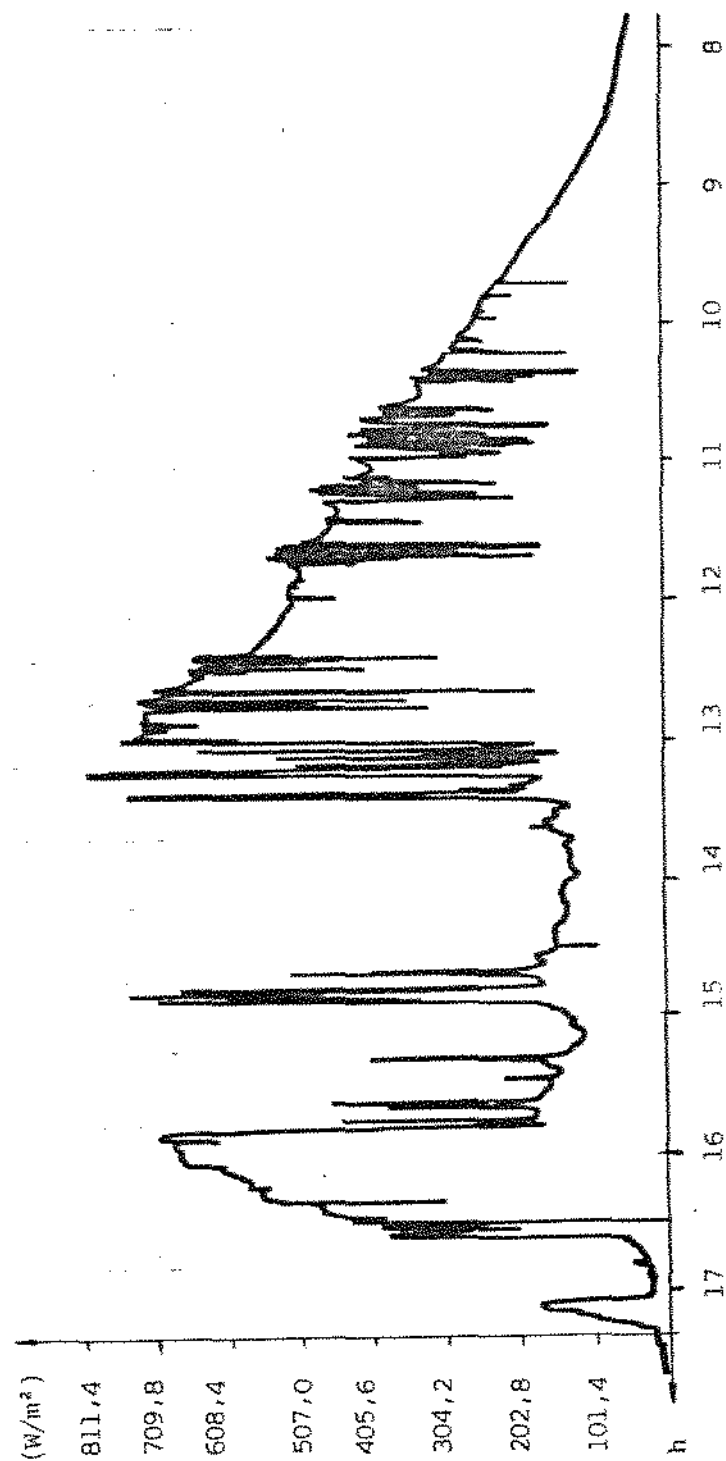


Figura A10.19 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 9 (radiação perpendicular a parede).

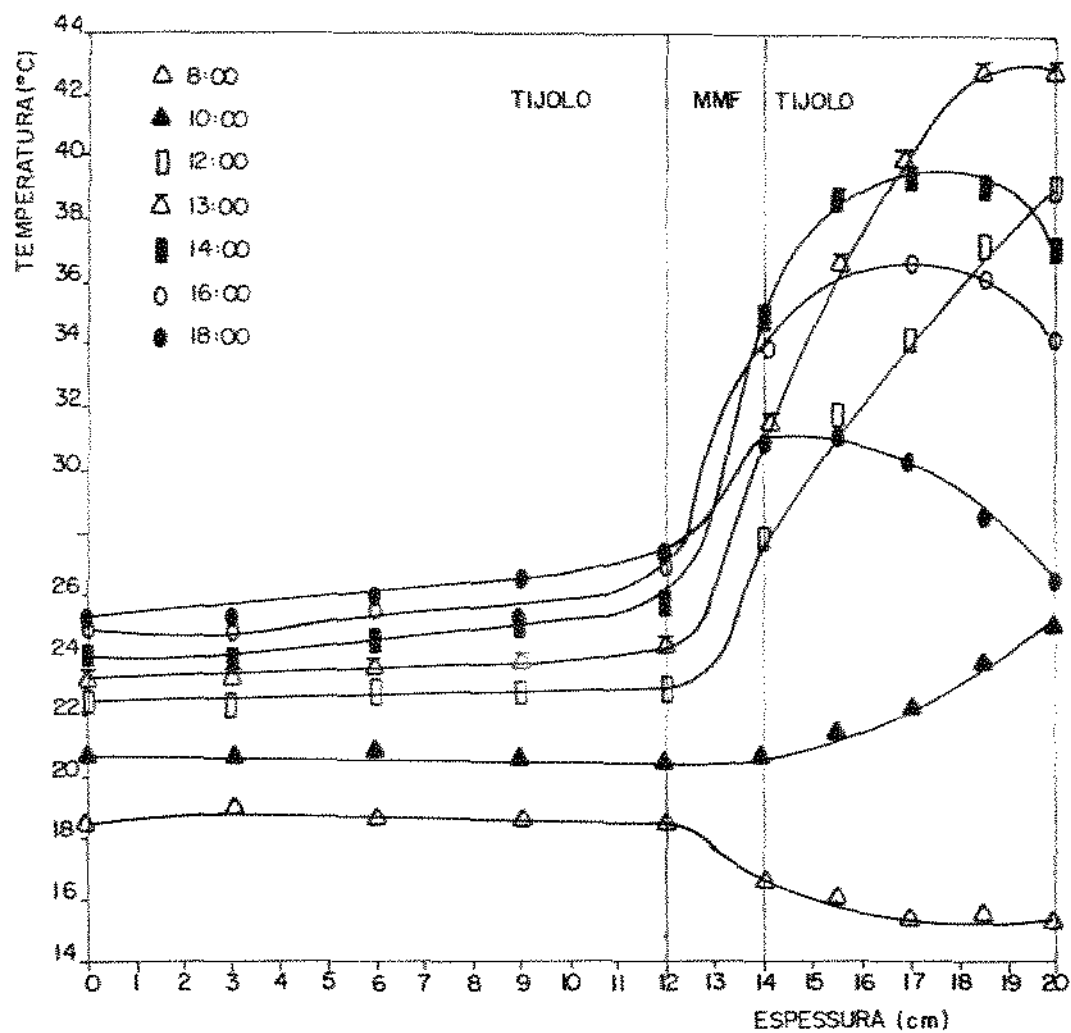


Figura A10.20 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 10).

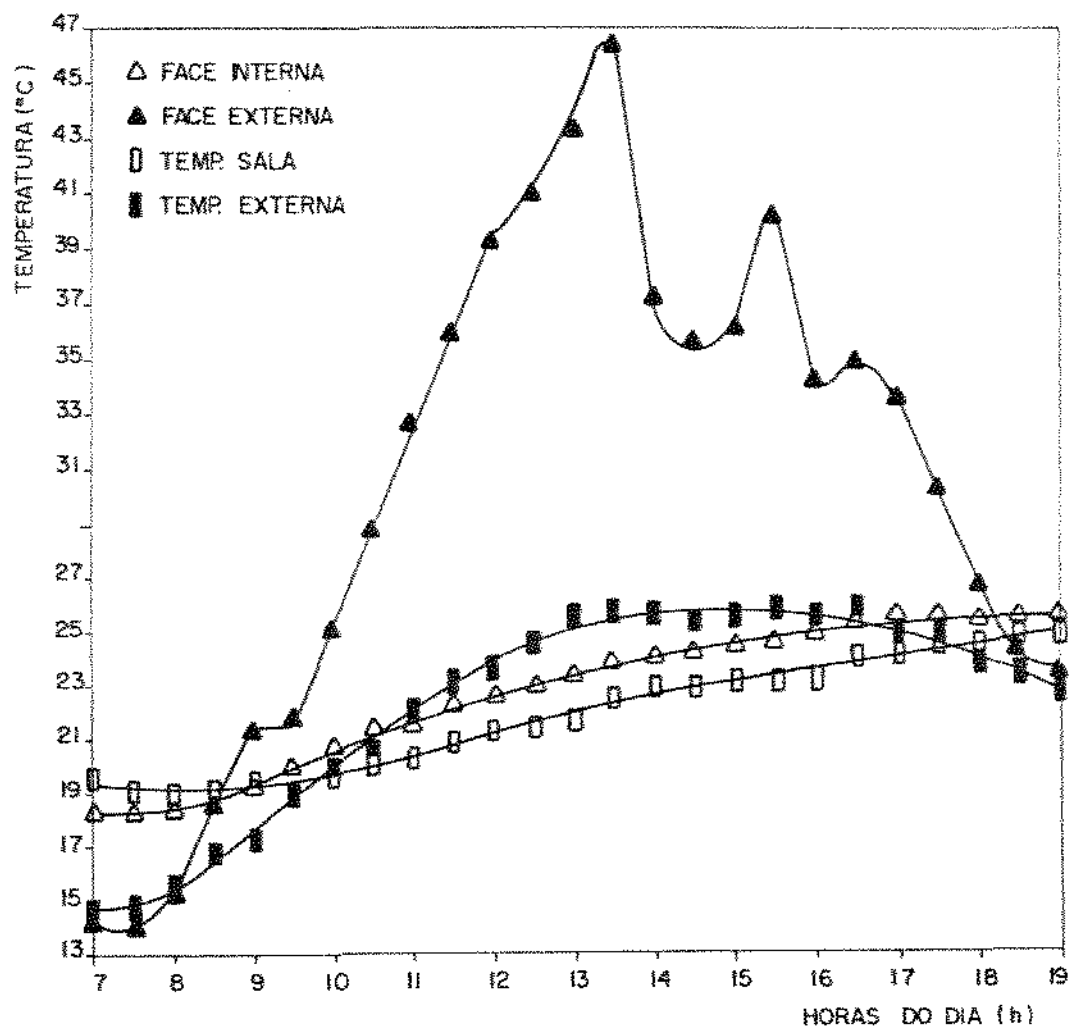


Figura A10.21 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 10).

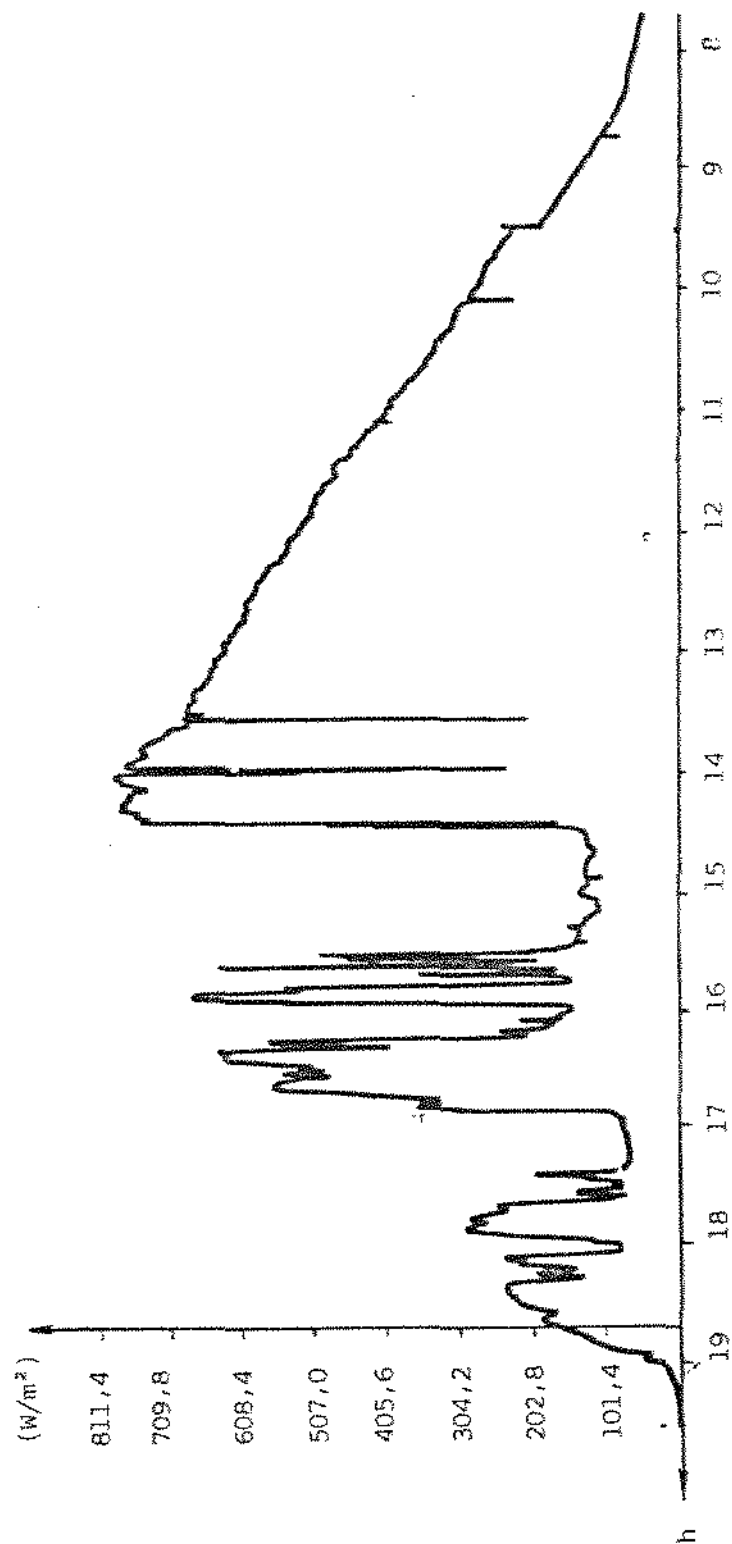


Figura A10.22 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 10 (radiação perpendicular a parede).

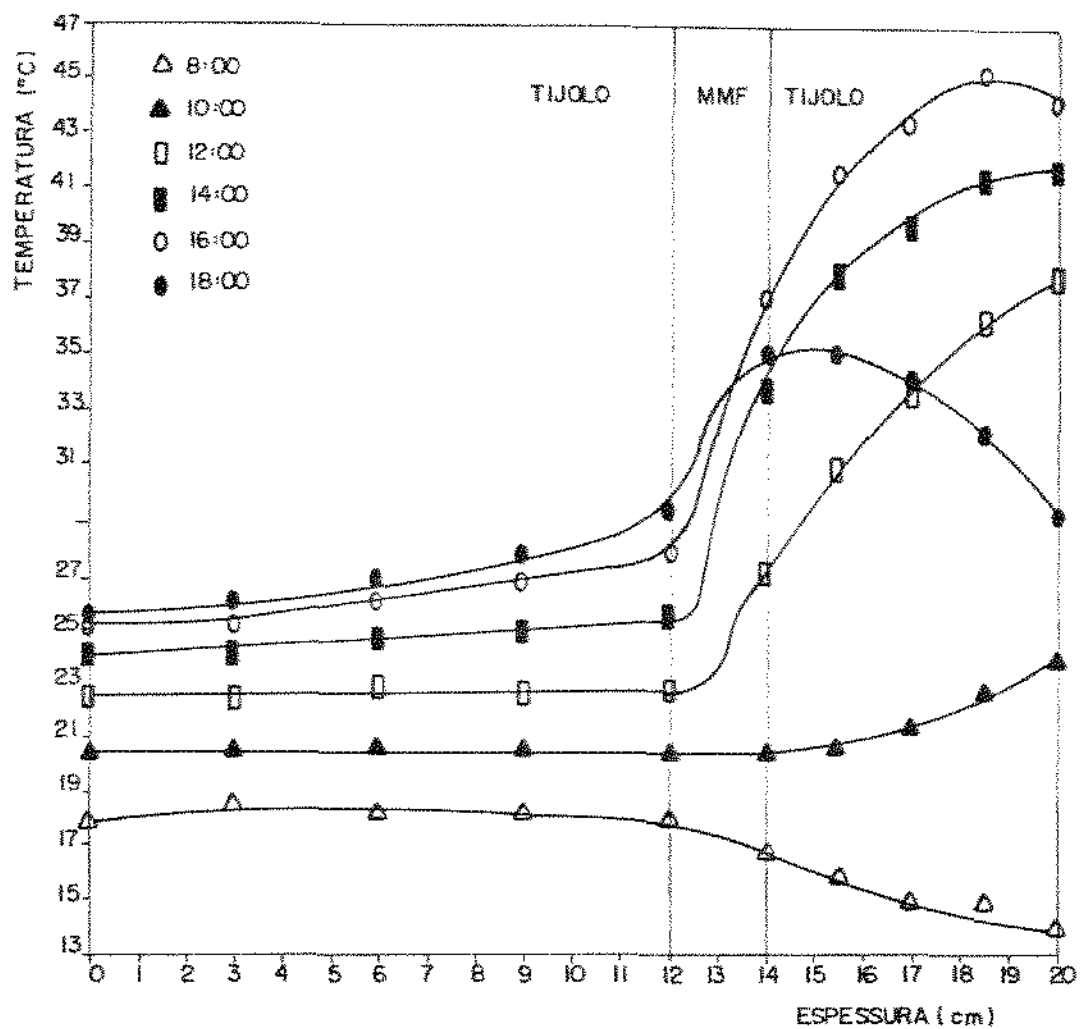


Figura A10.23 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 11).

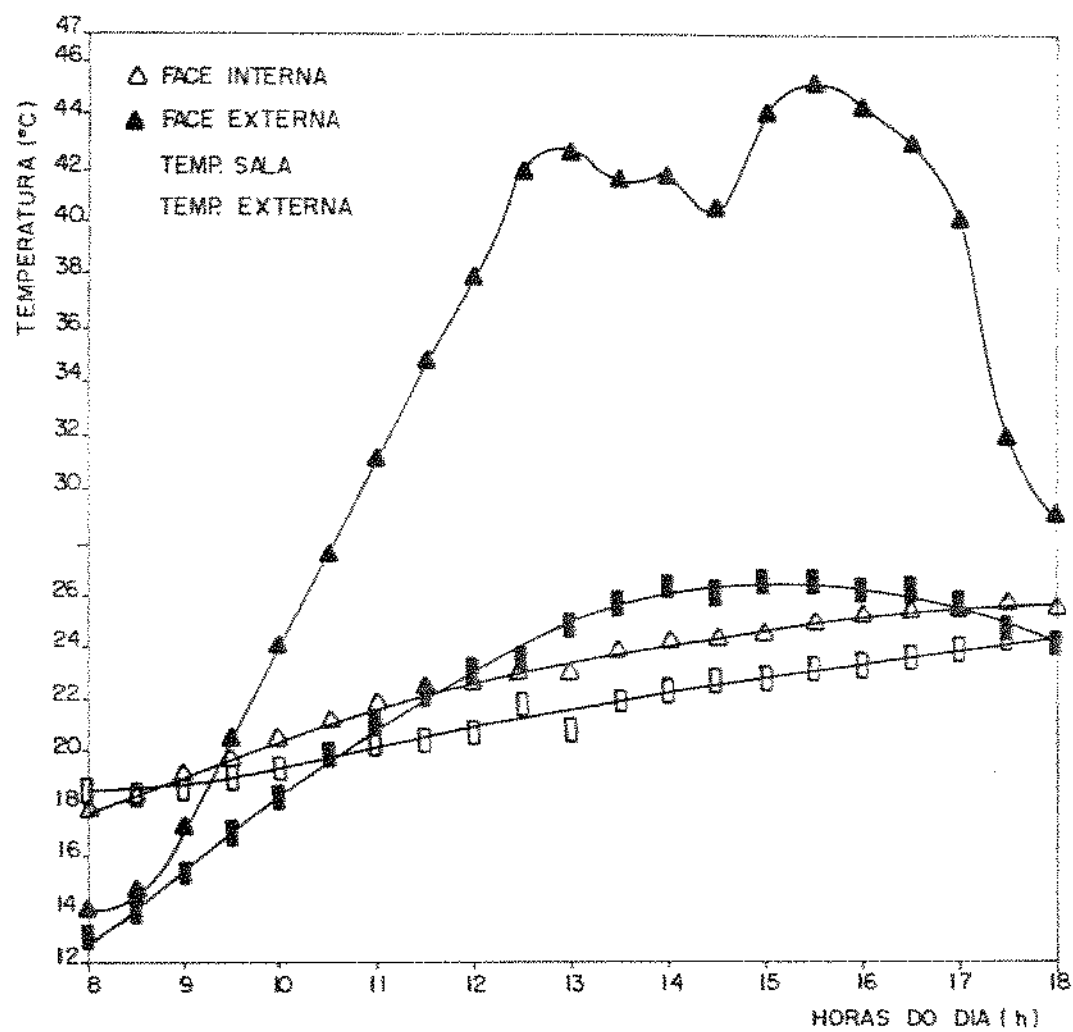


Figura A10.24 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 11).

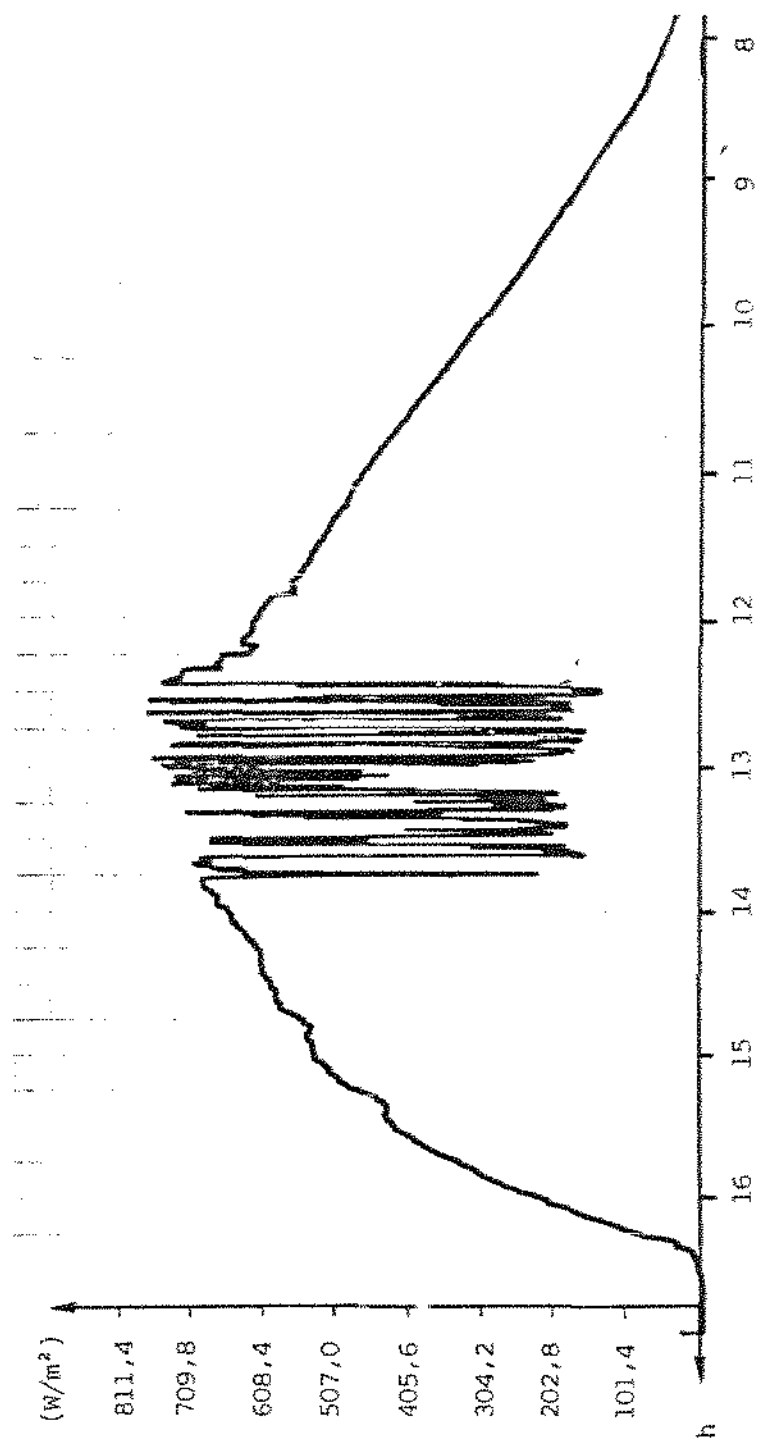


Figura A10.25 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 11 (radiação perpendicular a parede).

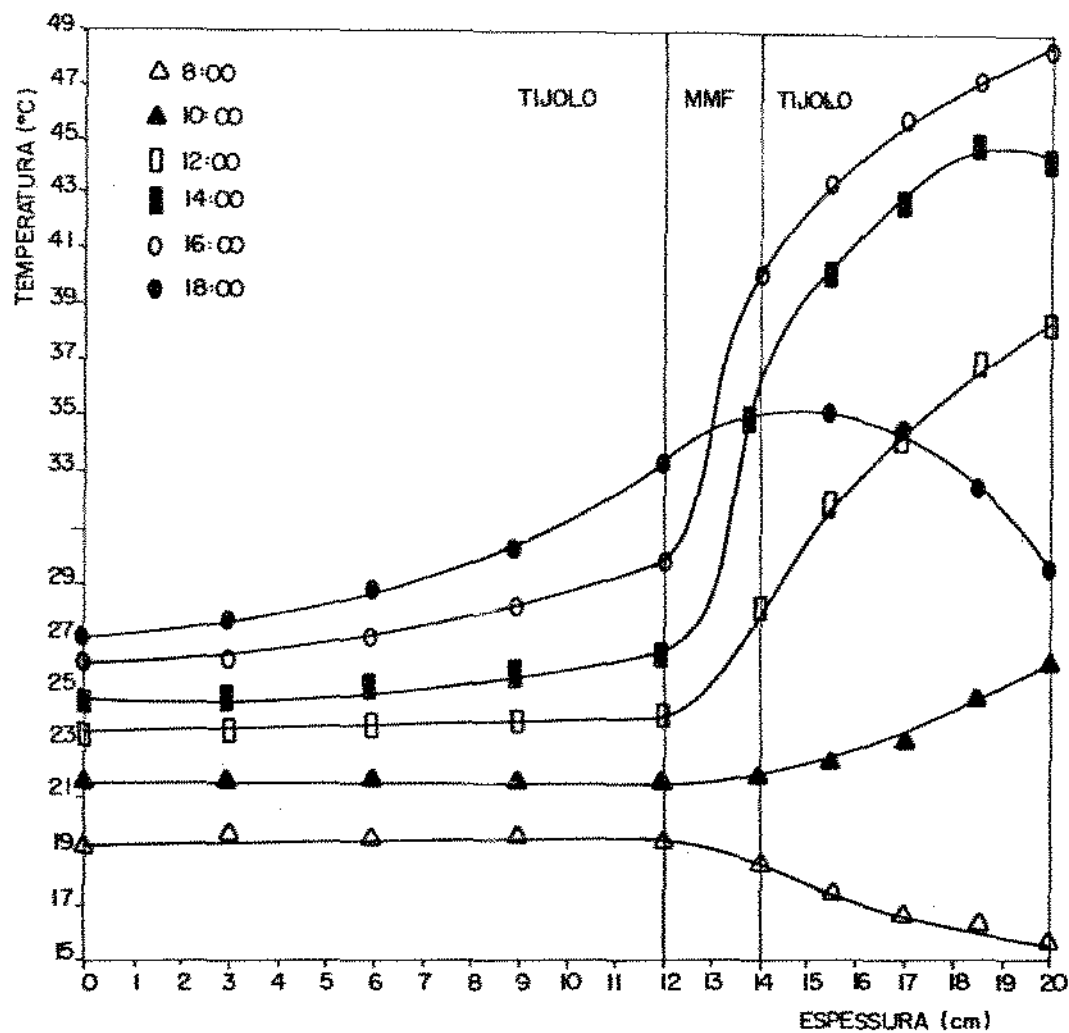


Figura A10-26 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 13).

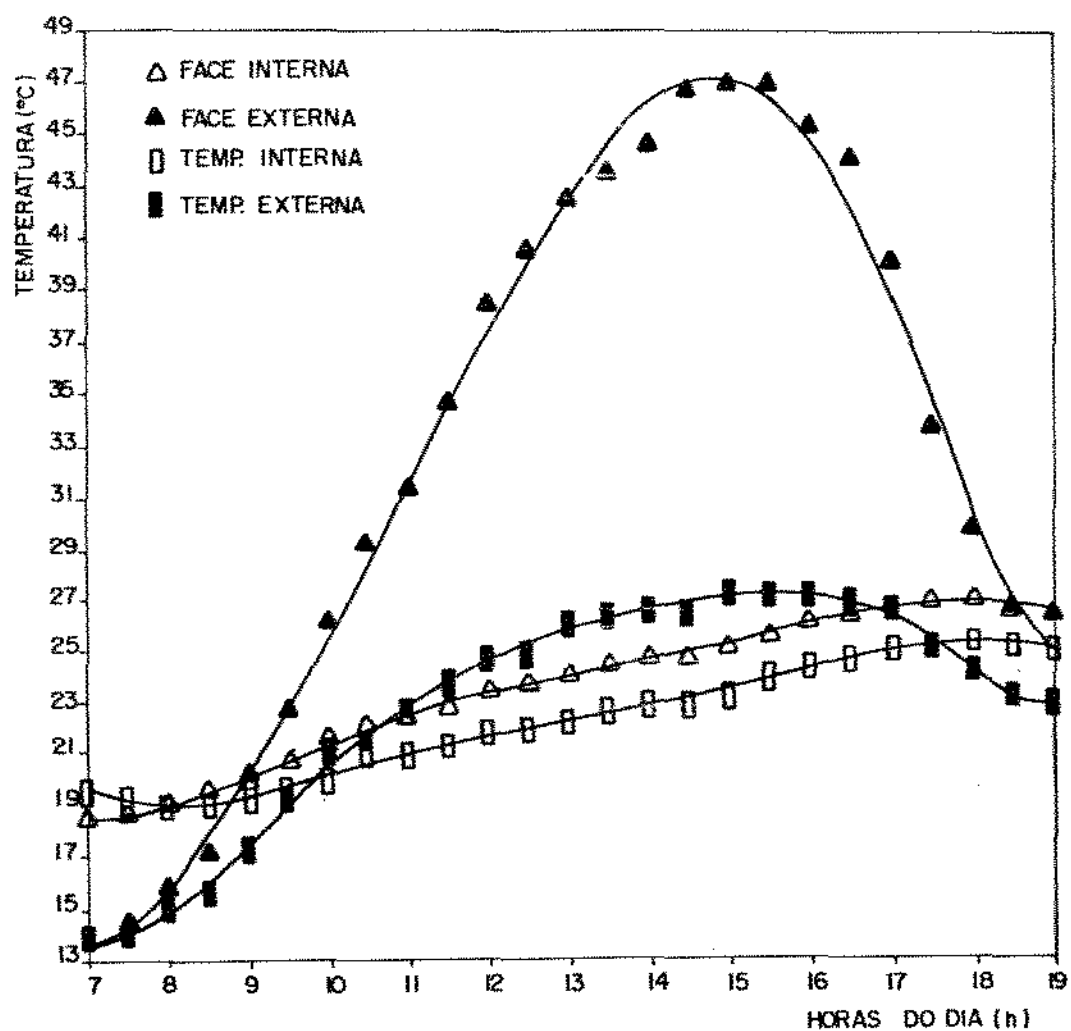


Figura A10.27 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 13).

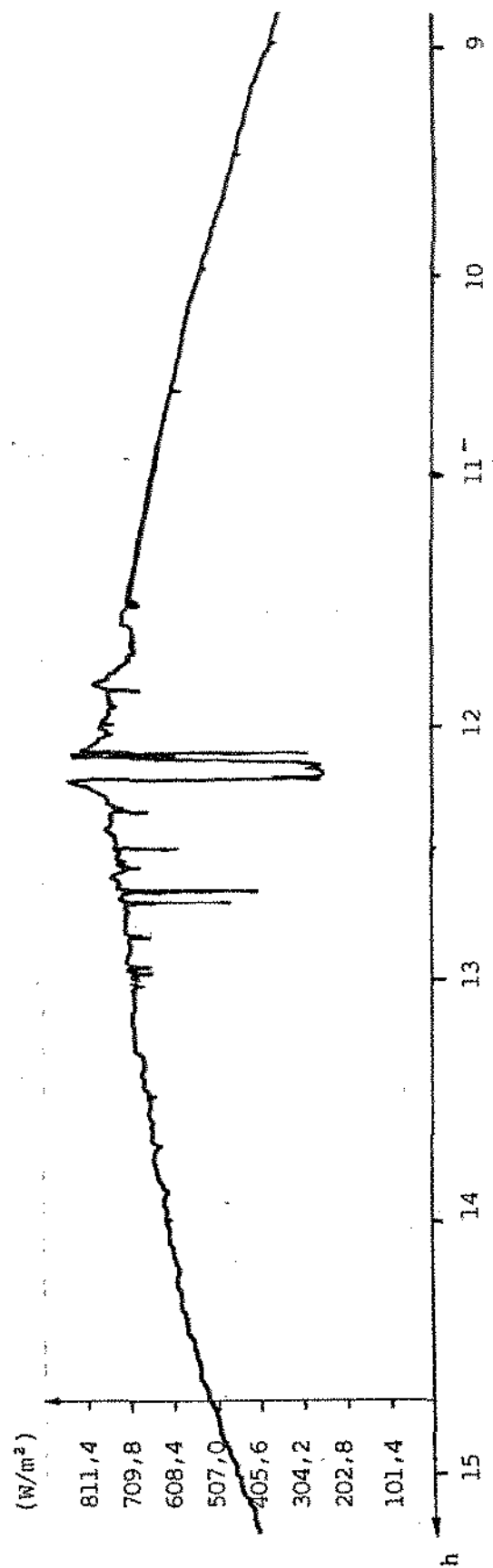


Figura A10.28 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 13 (radiação total no plano horizontal).

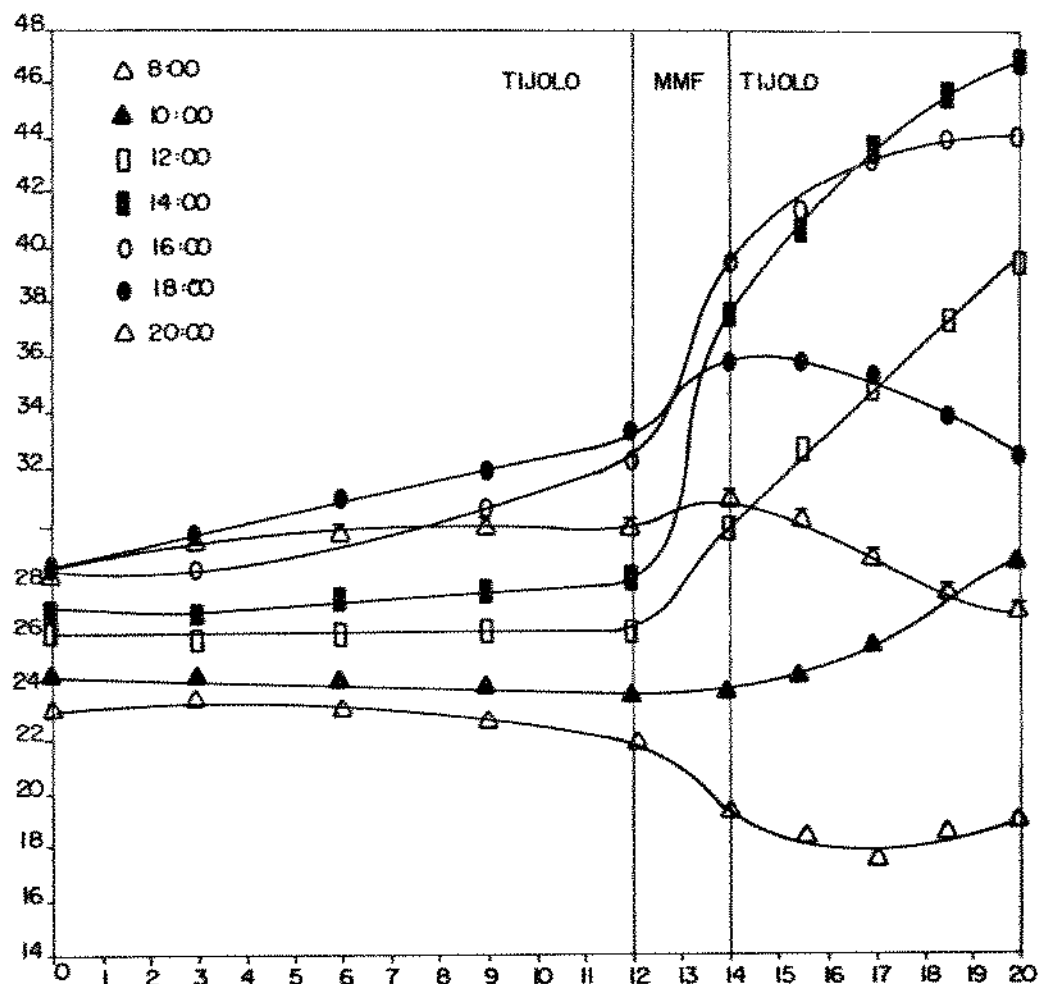


Figura A10.29(a) - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 16).

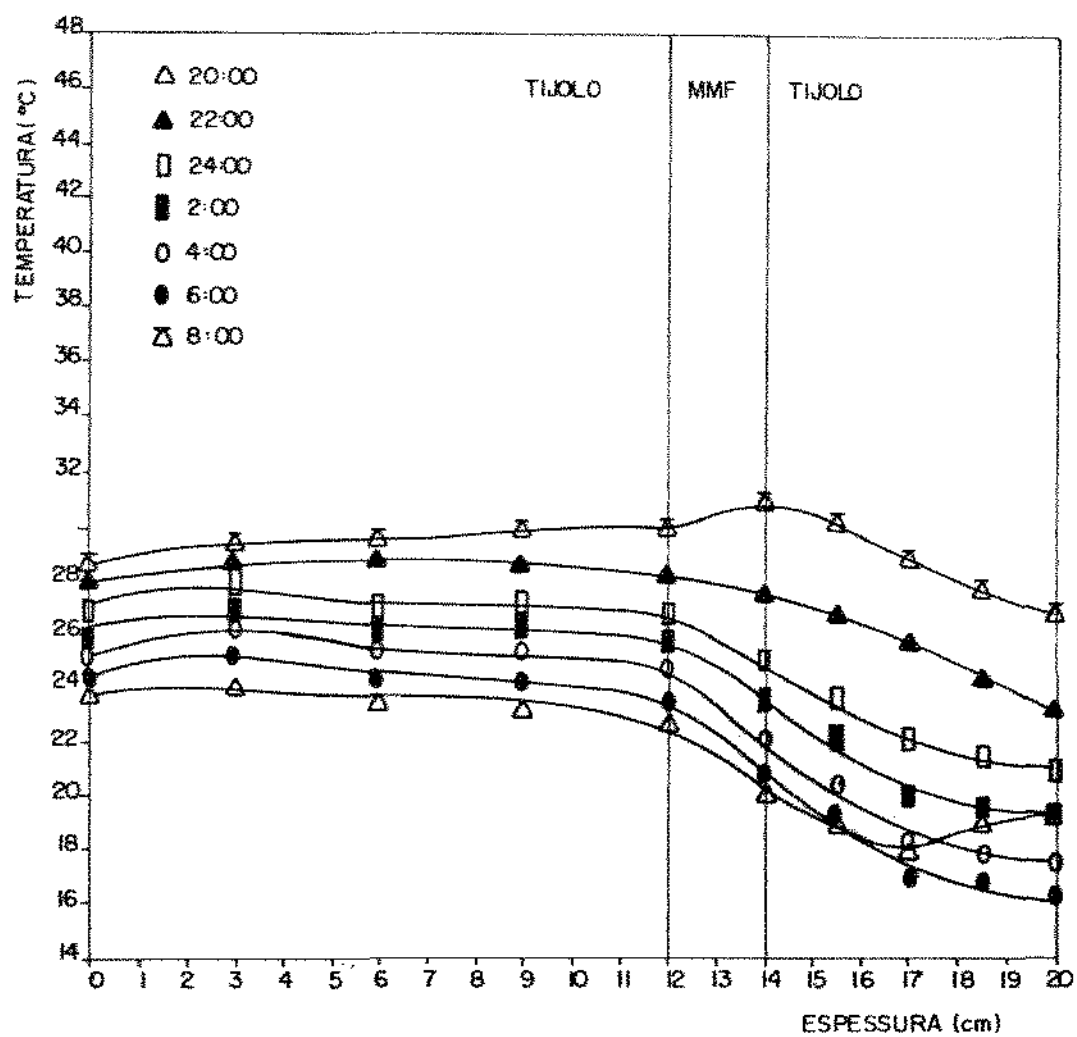


Figura A10.29(b) - Continuação da figura A10.29(a).

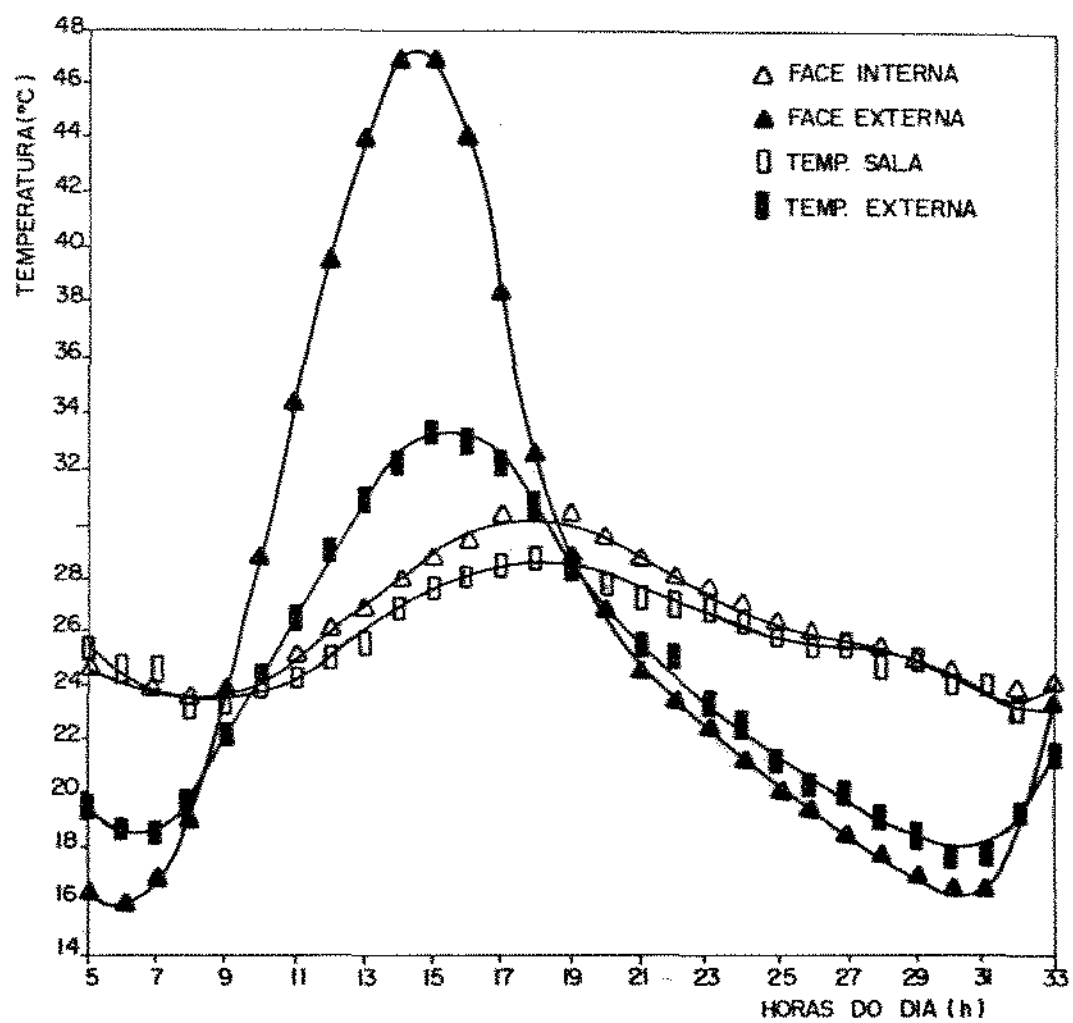


Figura A10.30 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 16).

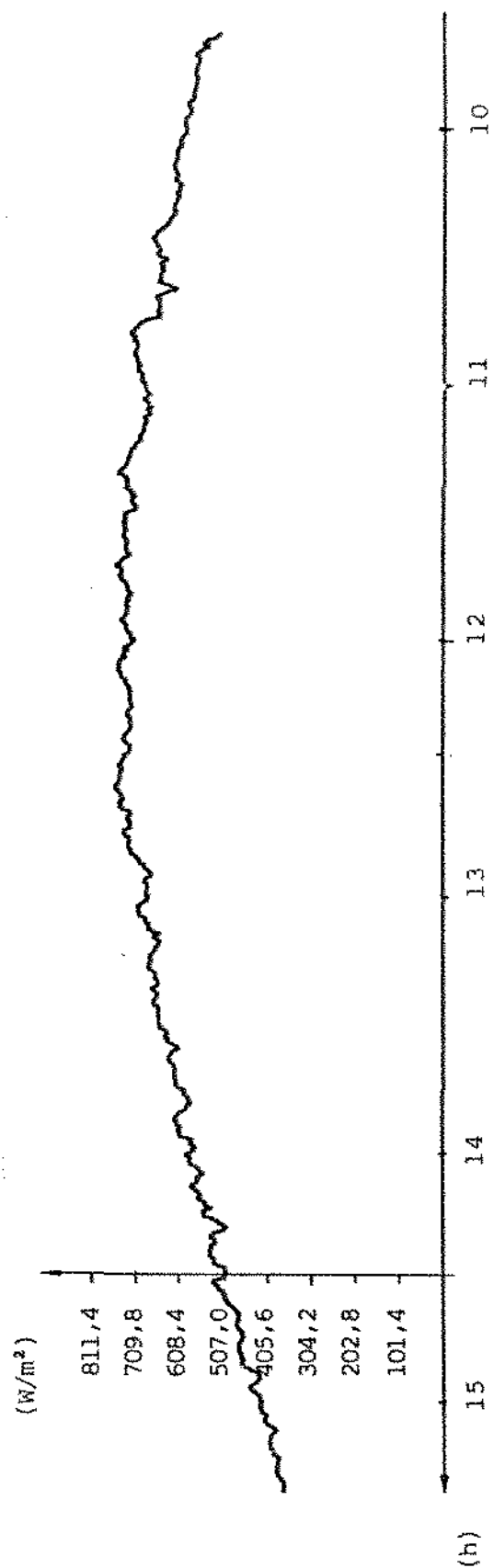


Figura A10.31 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 16 (radiação total no plano horizontal).

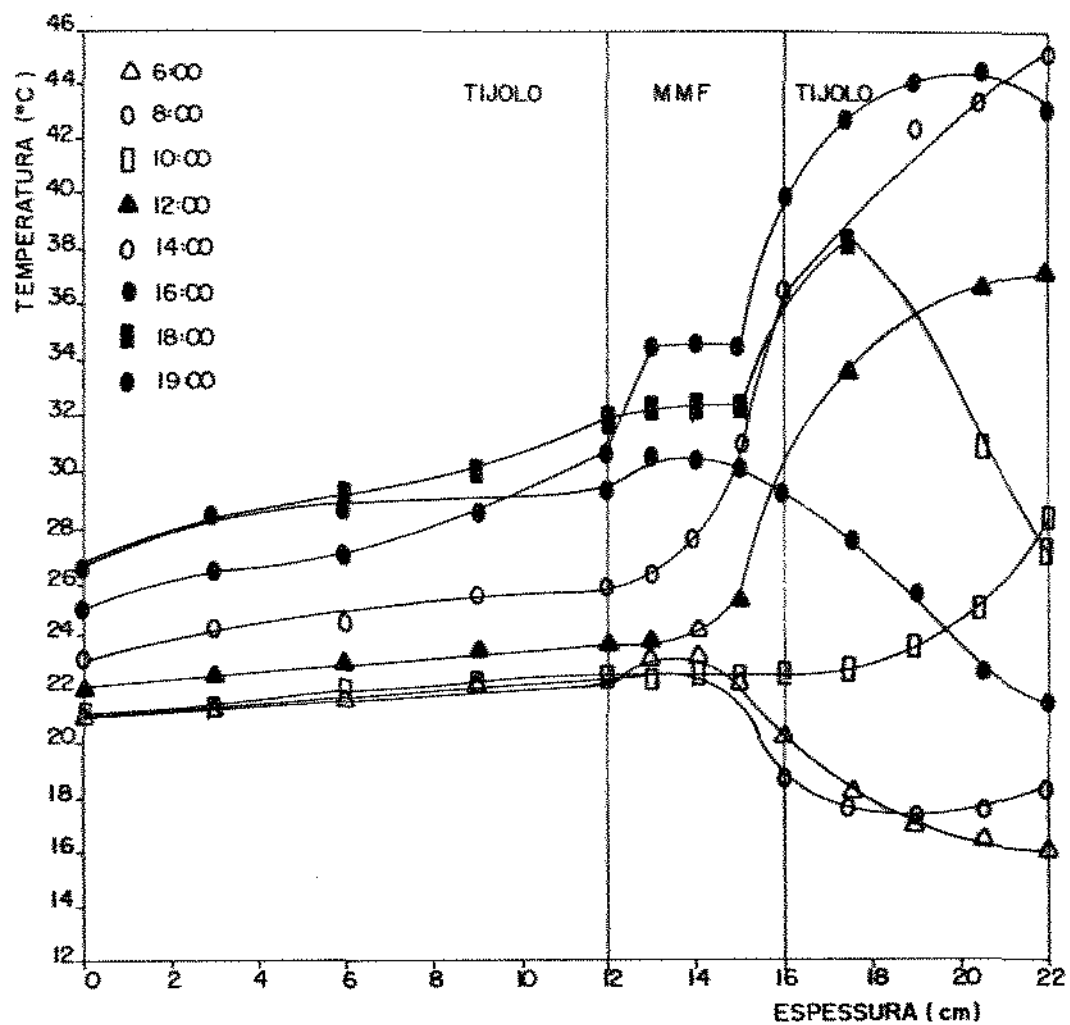


Figura A10.32 - Variação da temperatura ao longo da espessura da parede térmica nas várias horas do dia (experiência 17).

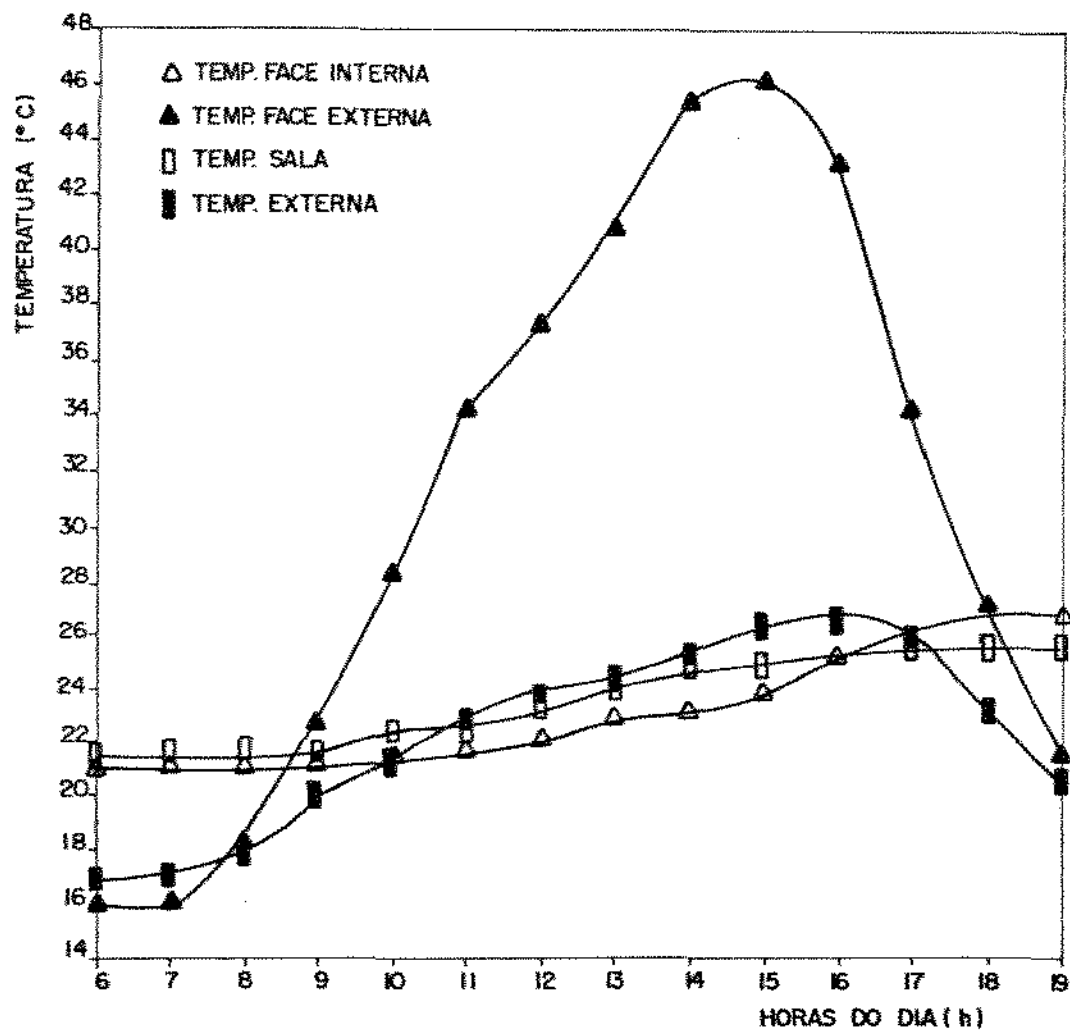


Figura A10.33 - Variação da temperatura com o tempo para a parede térmica ao longo do dia (experiência 17).

b) Cobertura

b.1) Cobertura convencional

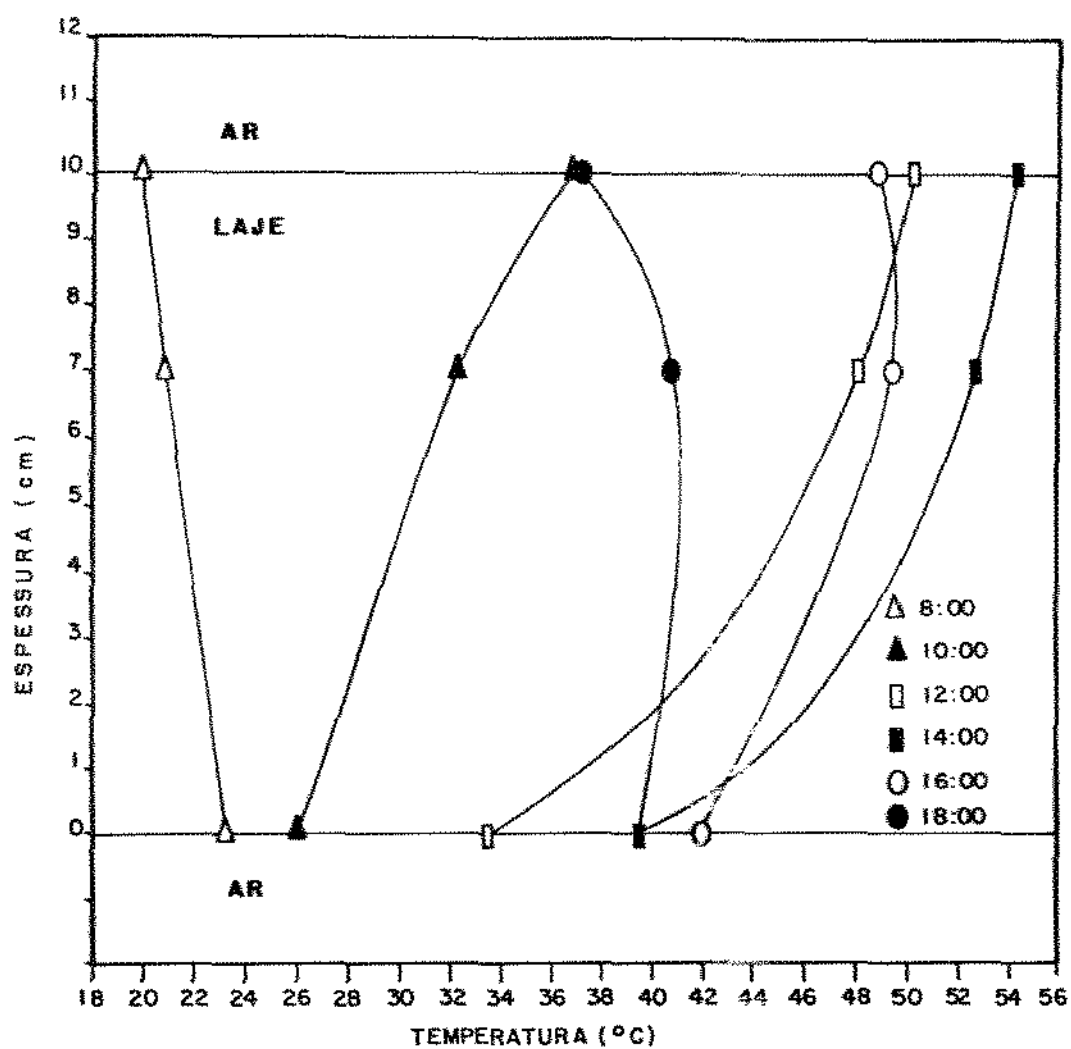


Figura A10.34 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional (laje NVA), nas várias horas do dia (experiência 1).

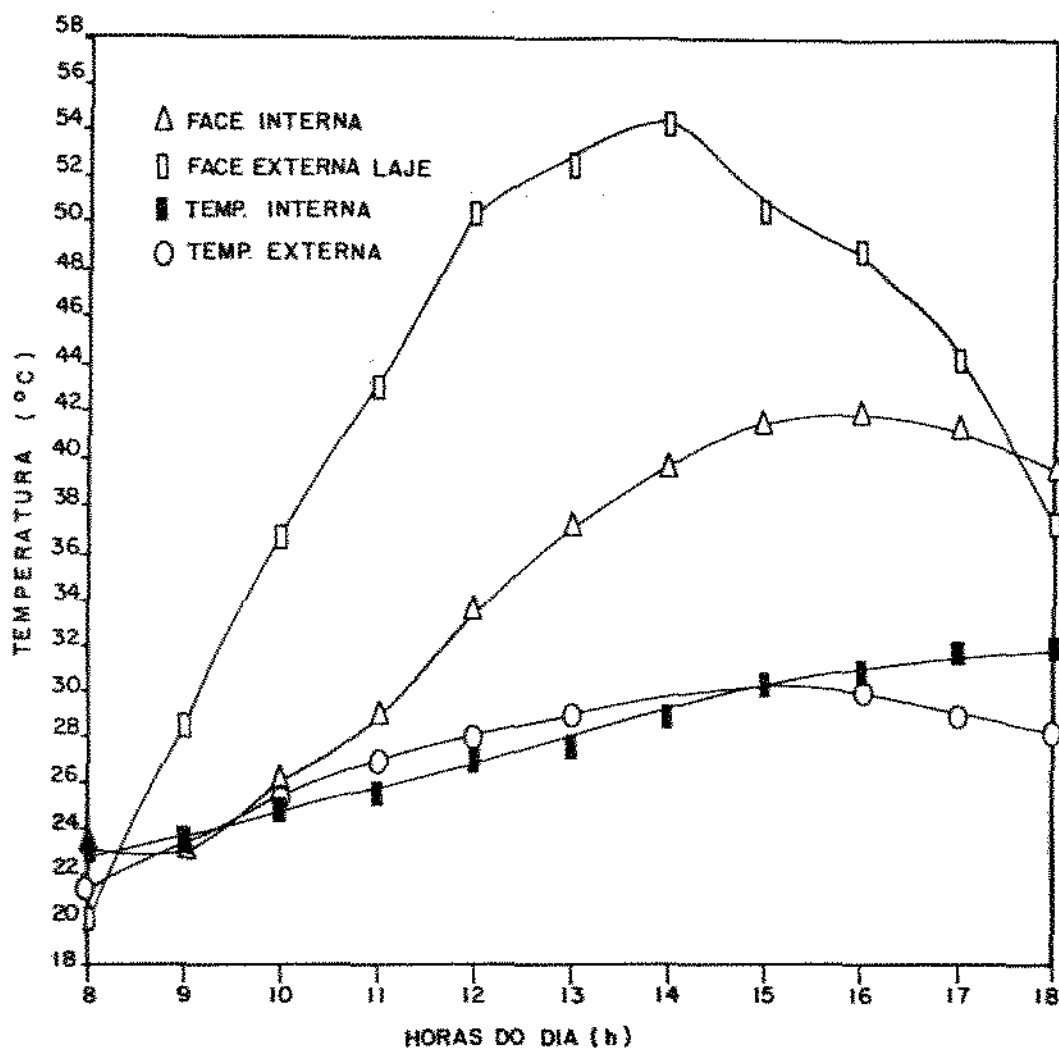


Figura A10.35 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional (laje NVA), ao longo das horas do dia (experiência 1).

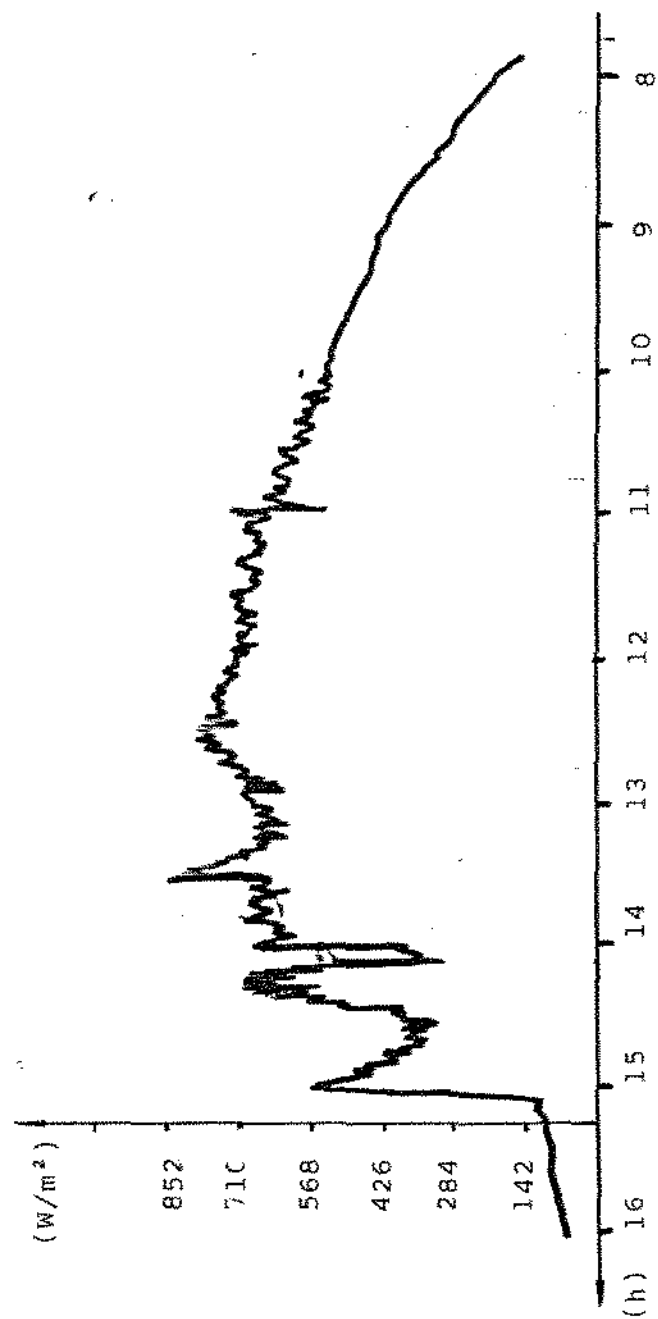


Figura A10.36 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 1 (radiação na horizontal).

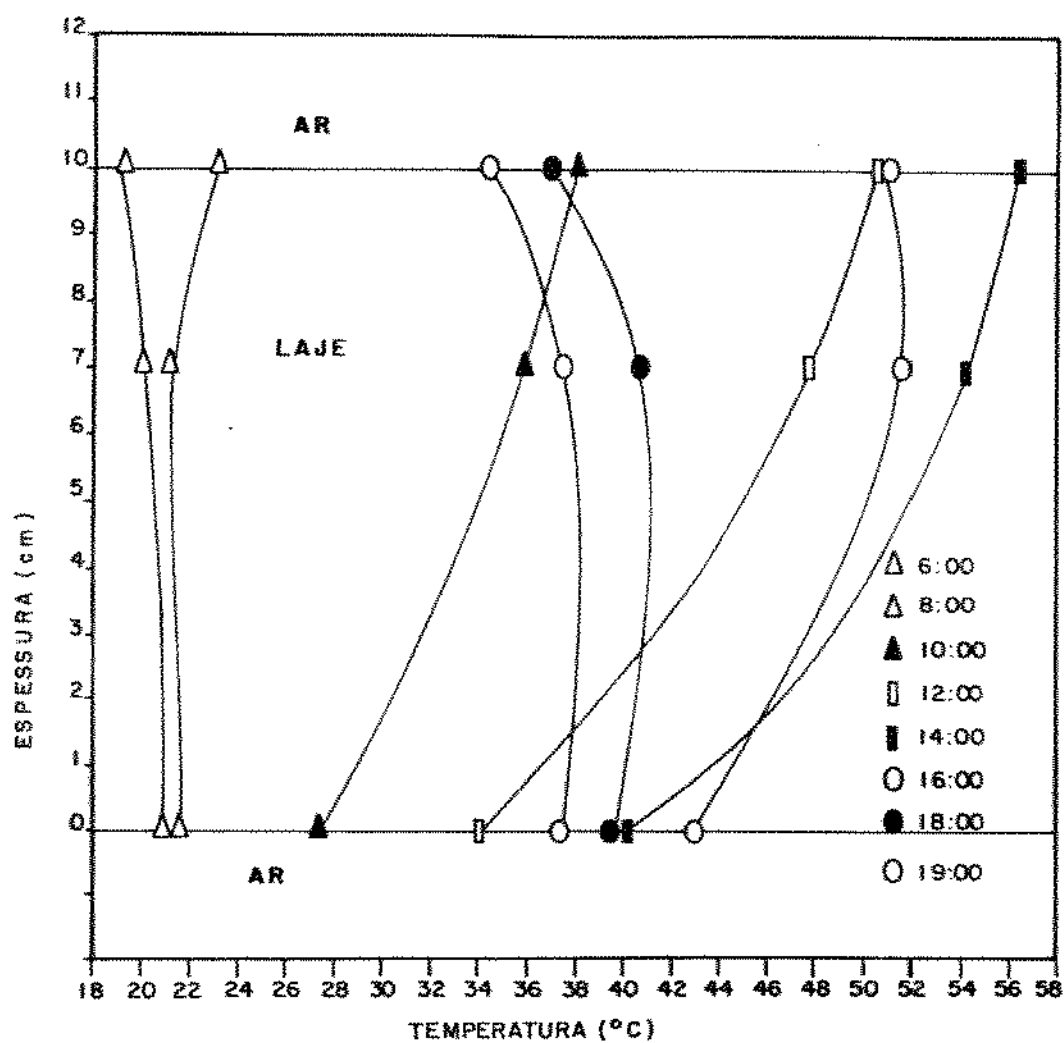


Figura A10.37 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional (laje NVA), nas várias horas do dia (experiência 2).

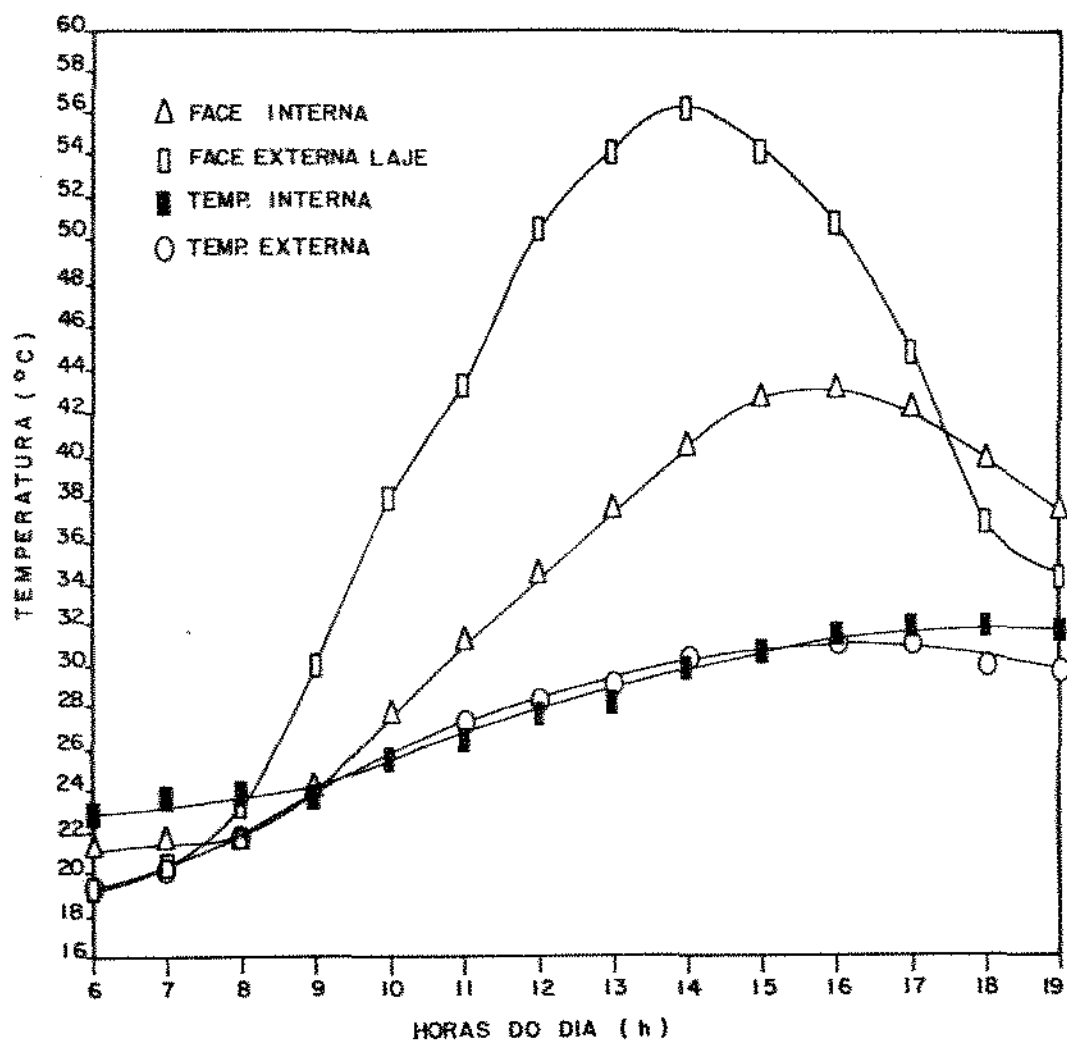


Figura A10.38 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica (lage NVA), ao longo das horas do dia (experiência 2).

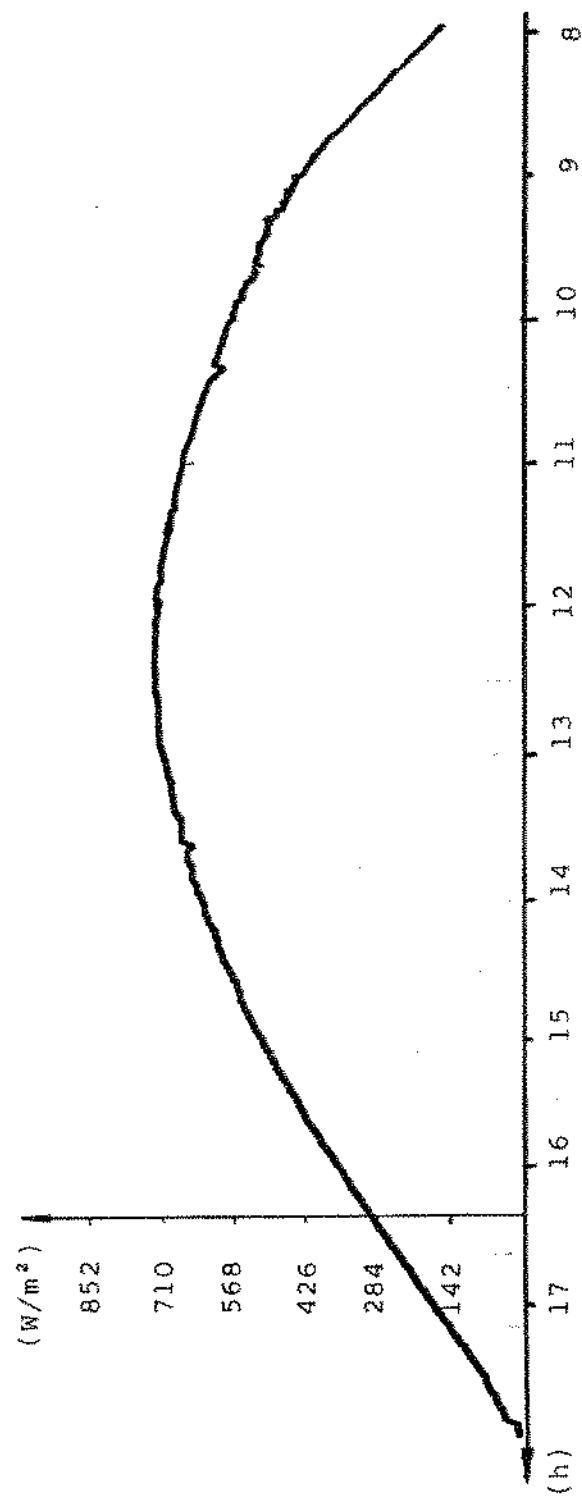


Figura A10.39 - Saída do radiômetro para a experiência 2 (radiação na horizontal).

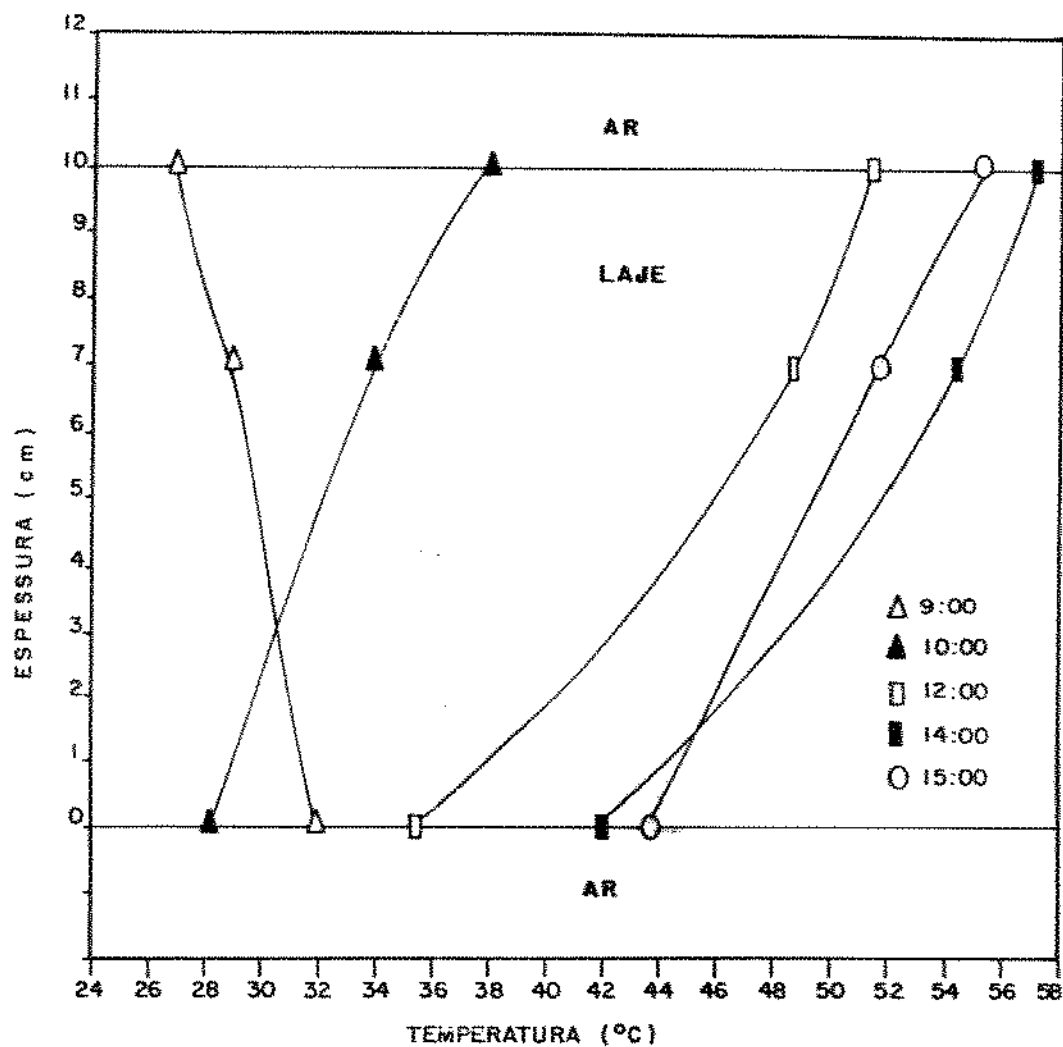


Figura A10.40 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional (laje NVA), nas várias horas do dia (experiência 3).

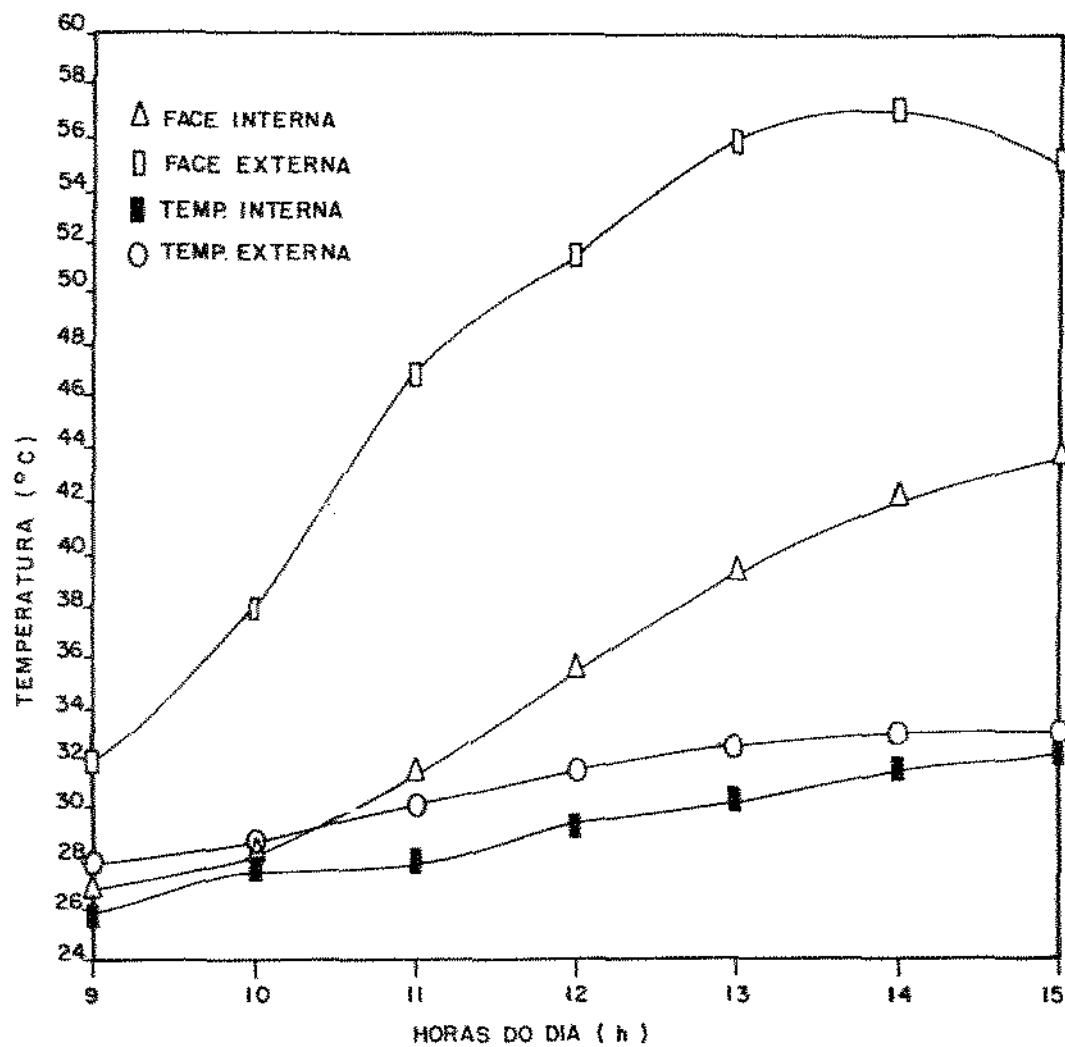


Figura A10.41 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional (lage NVA), ao longo das horas do dia (experiência 3).

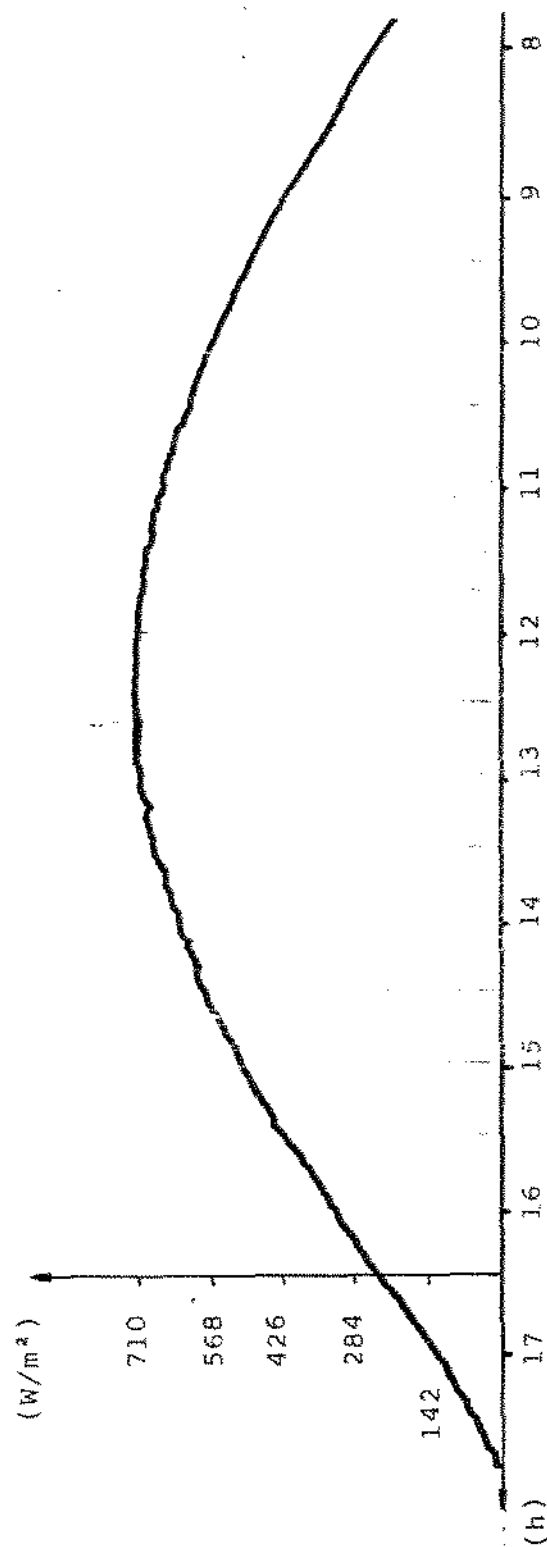


Figura A10.42 - Saída do radiômetro para a experiência 3 (radiação na horizontal).

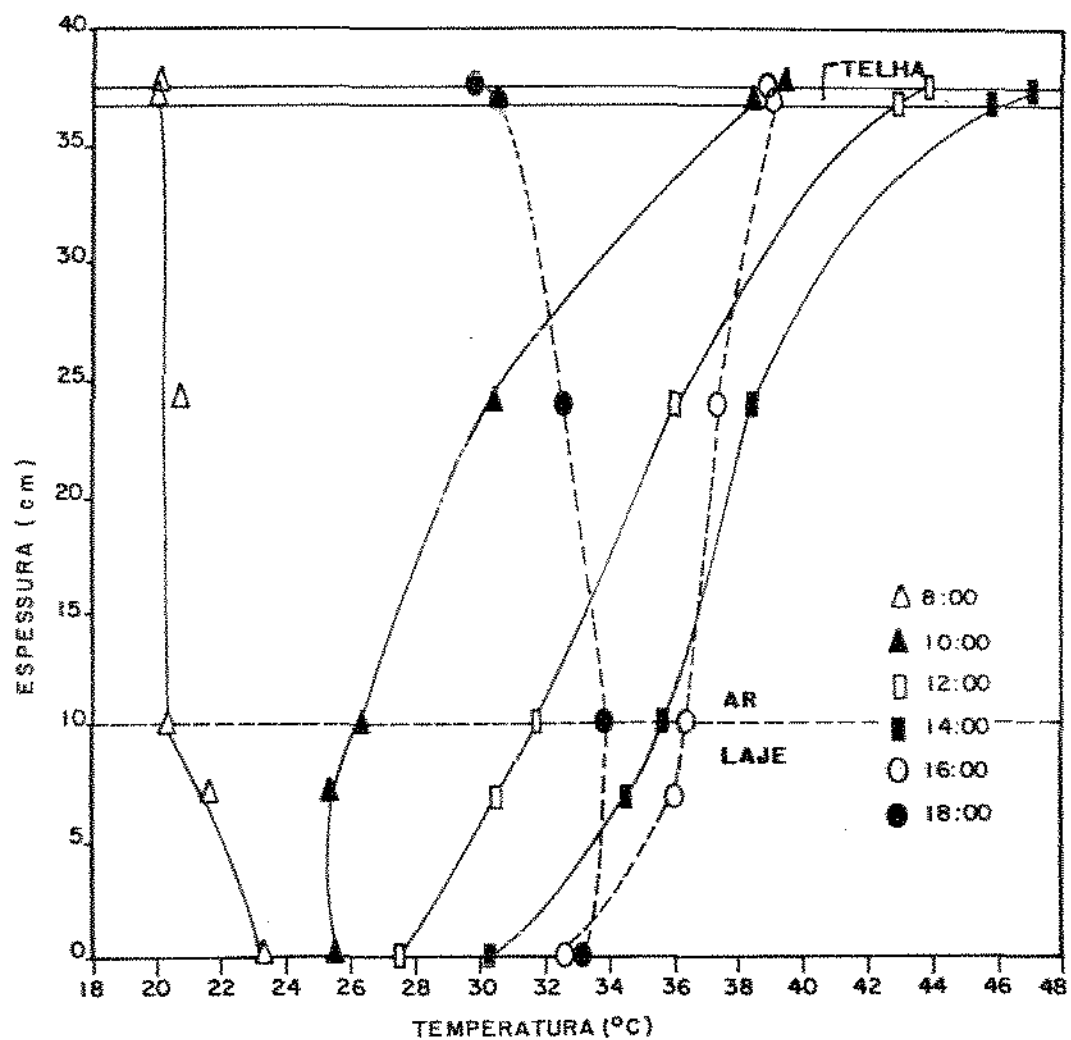


Figura A10.43 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas várias horas do dia (experiência 4).

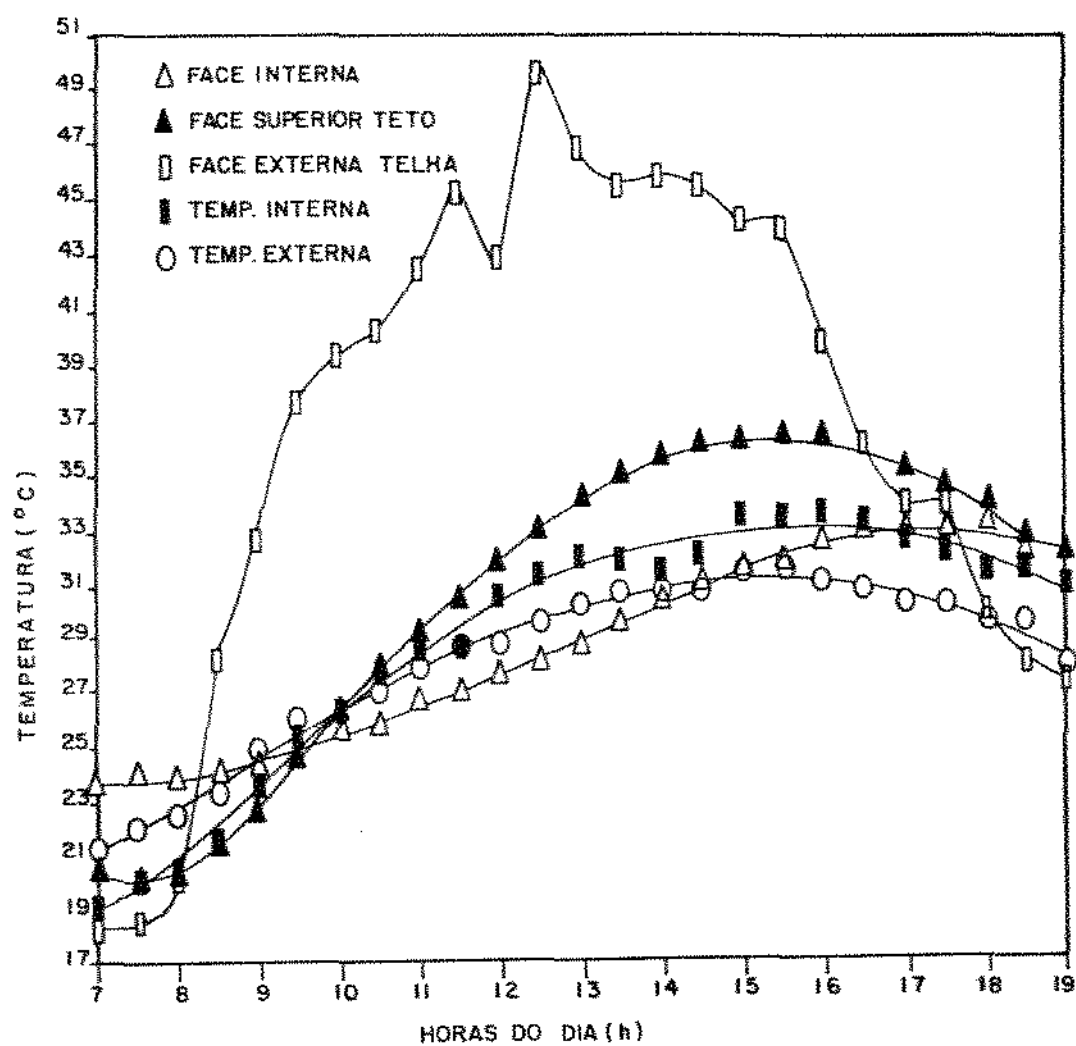


Figura A10.44 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional, ao longo das horas do dia (experiência 4).

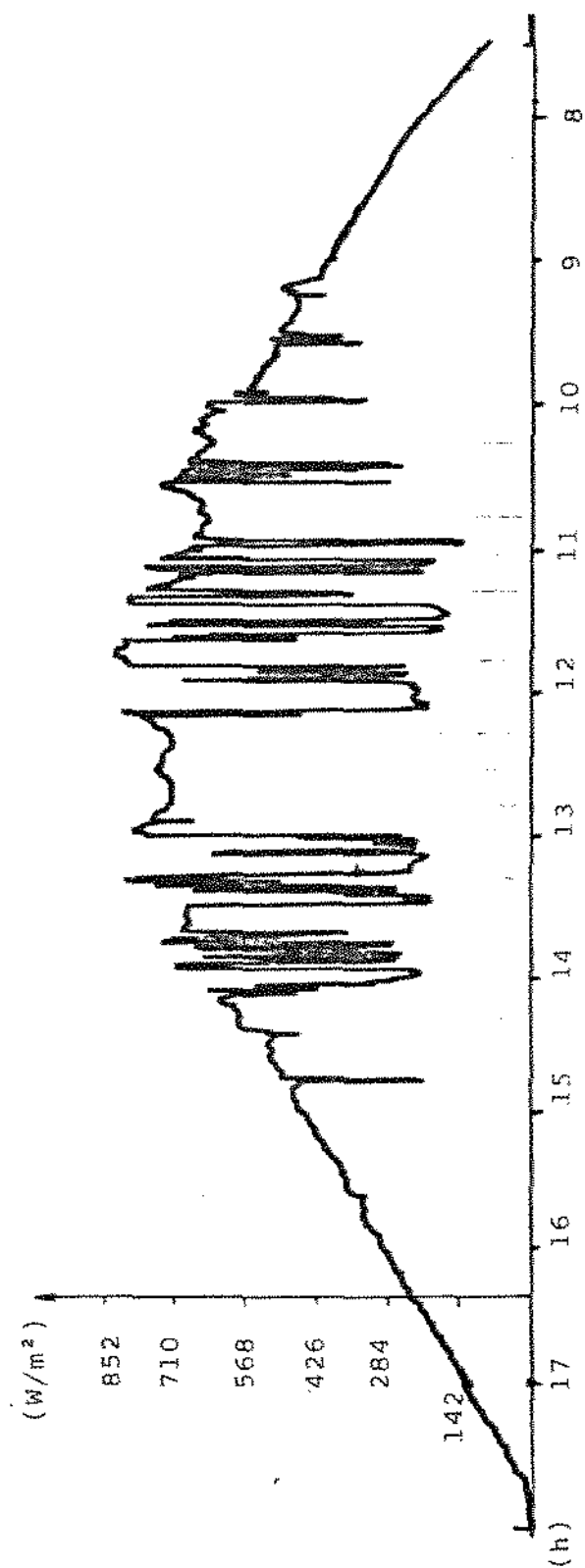


Figura A10.45 - Saída do radiômetro para a experiência 4 (radiação horizontal).

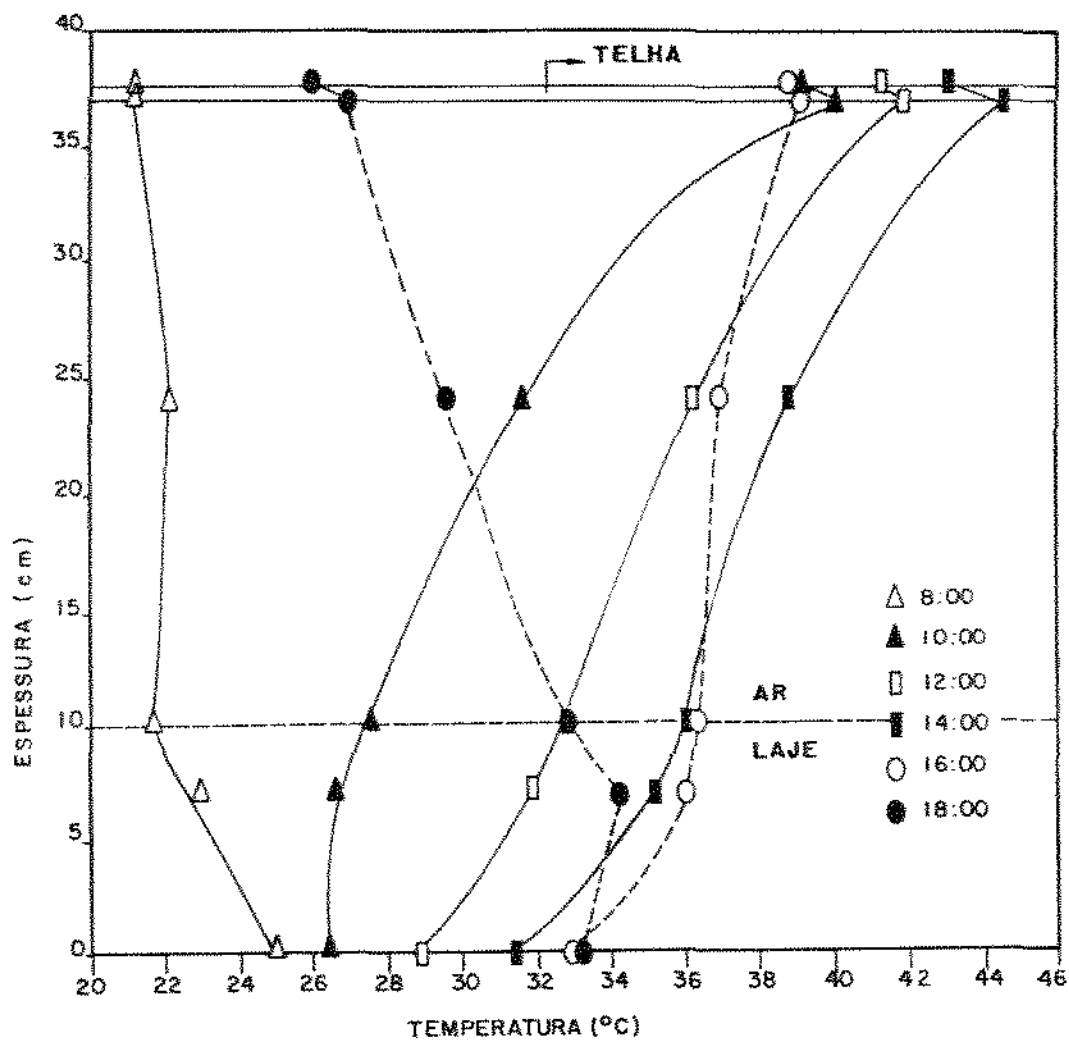


Figura A10.46 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura convencional, nas várias horas do dia (experiência 5).

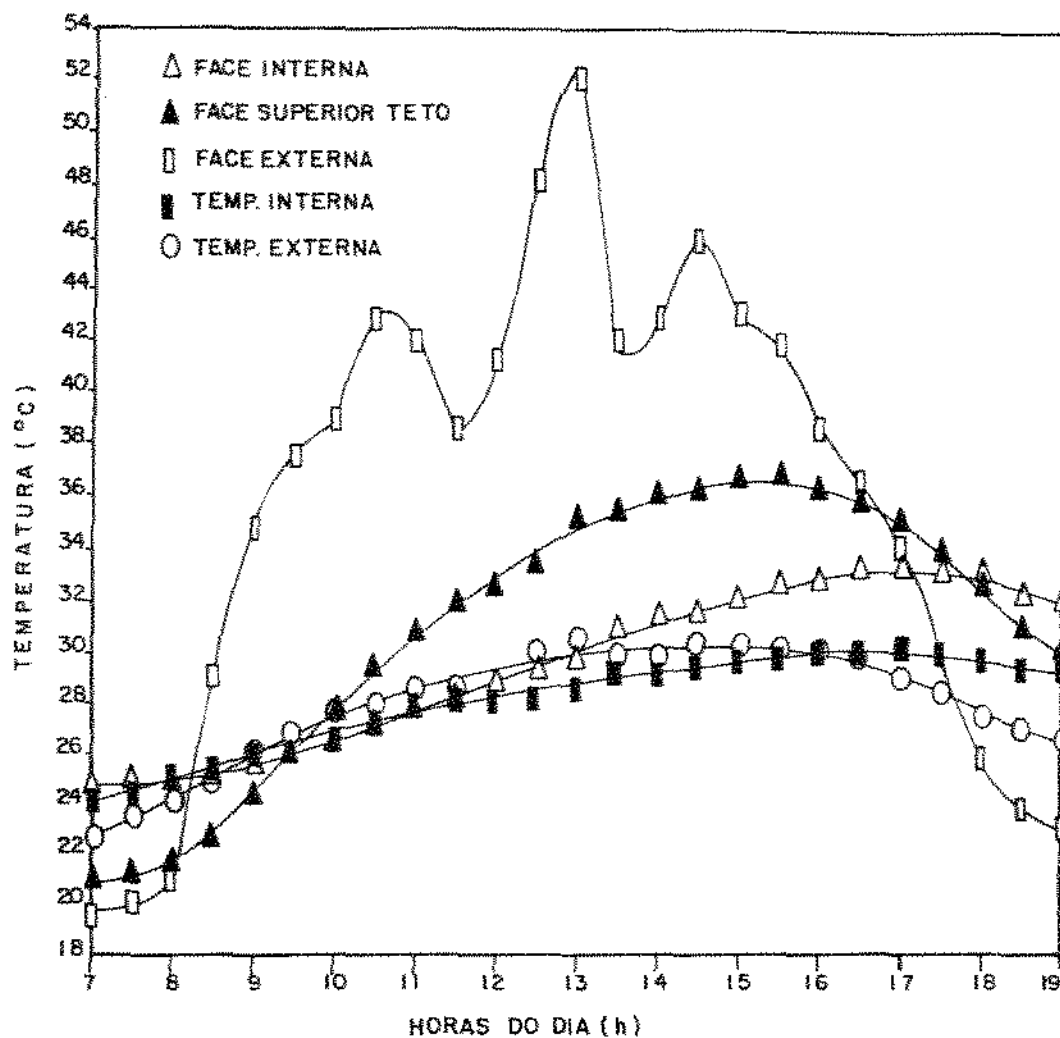


Figura A10.47 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura convencional, ao longo das horas do dia (experiência 5).

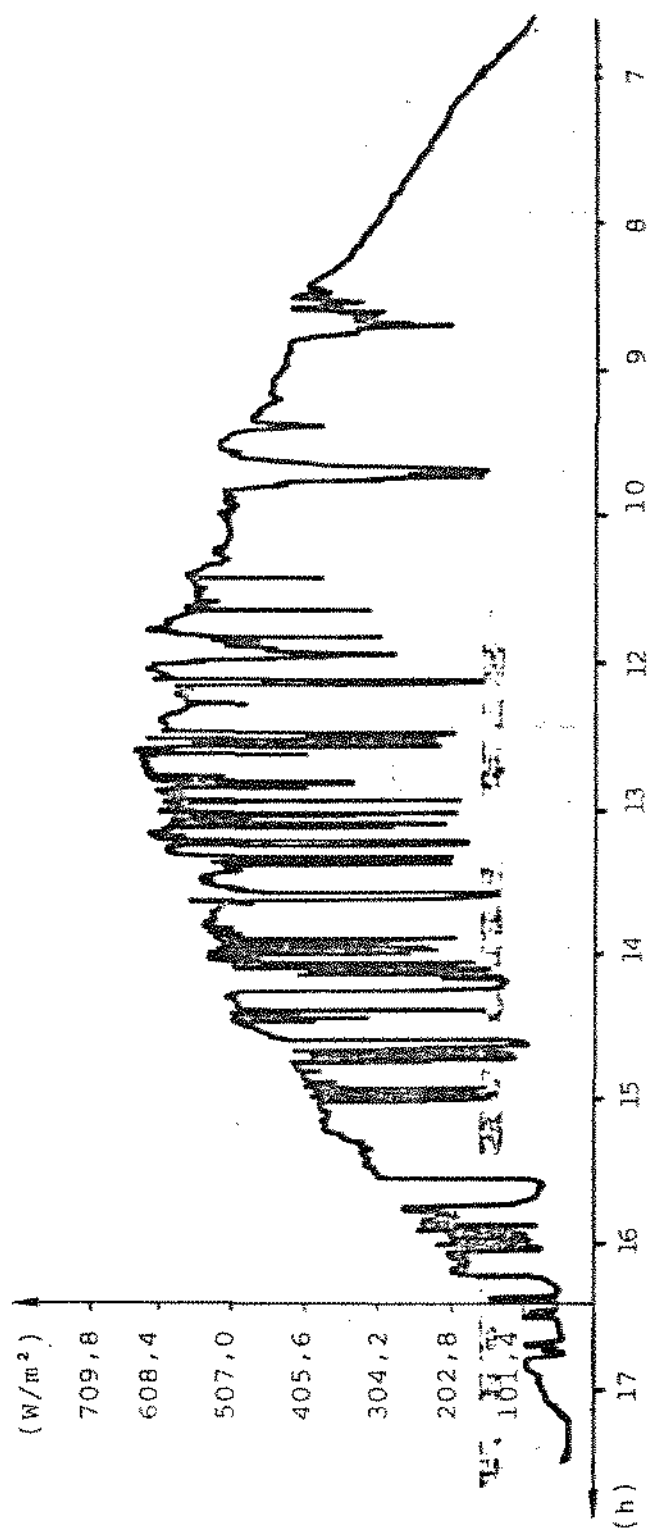


Figura A10.48 - Saída do radiômetro para a experiência 5 (radiação horizontal).

b.20 Cobertura térmica

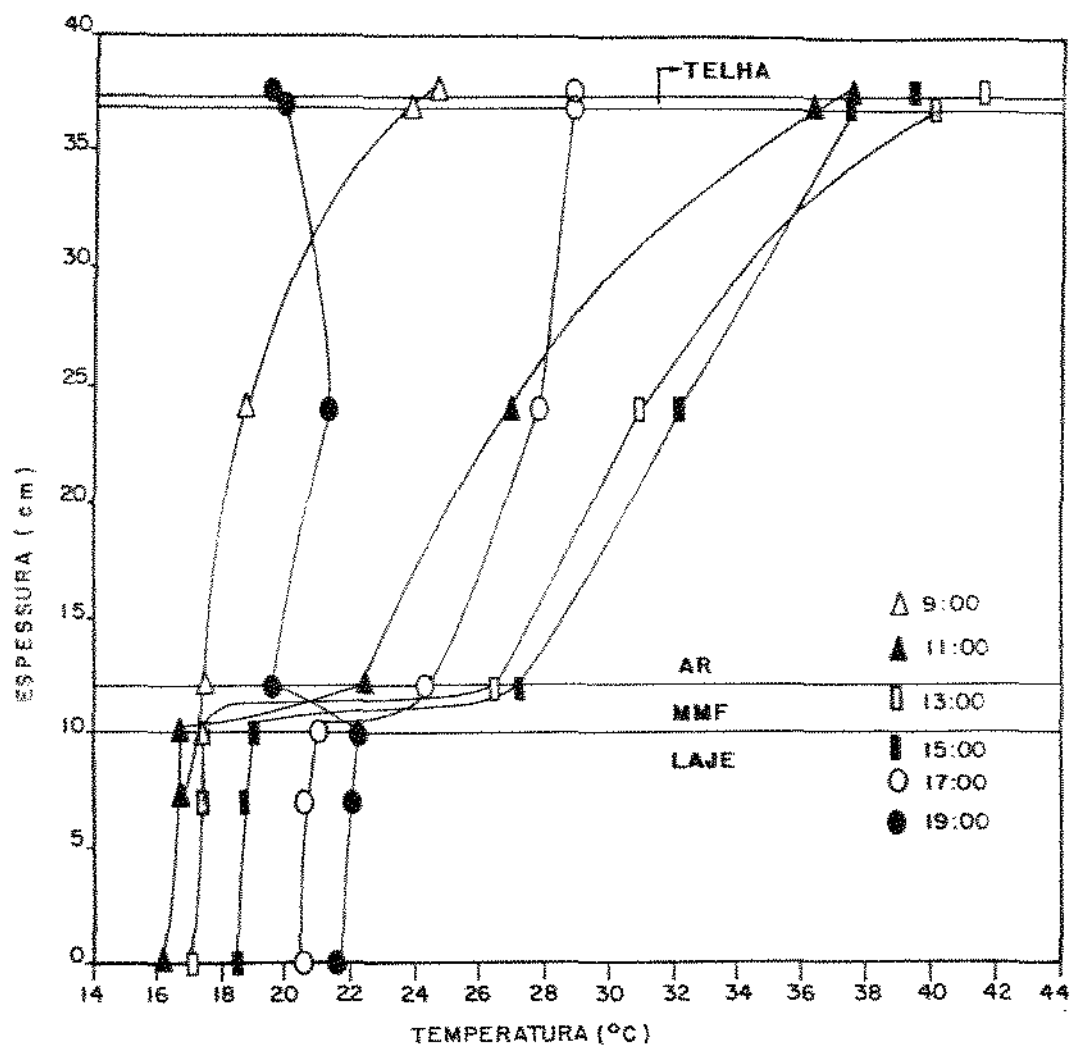


Figura A10.49 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 8).

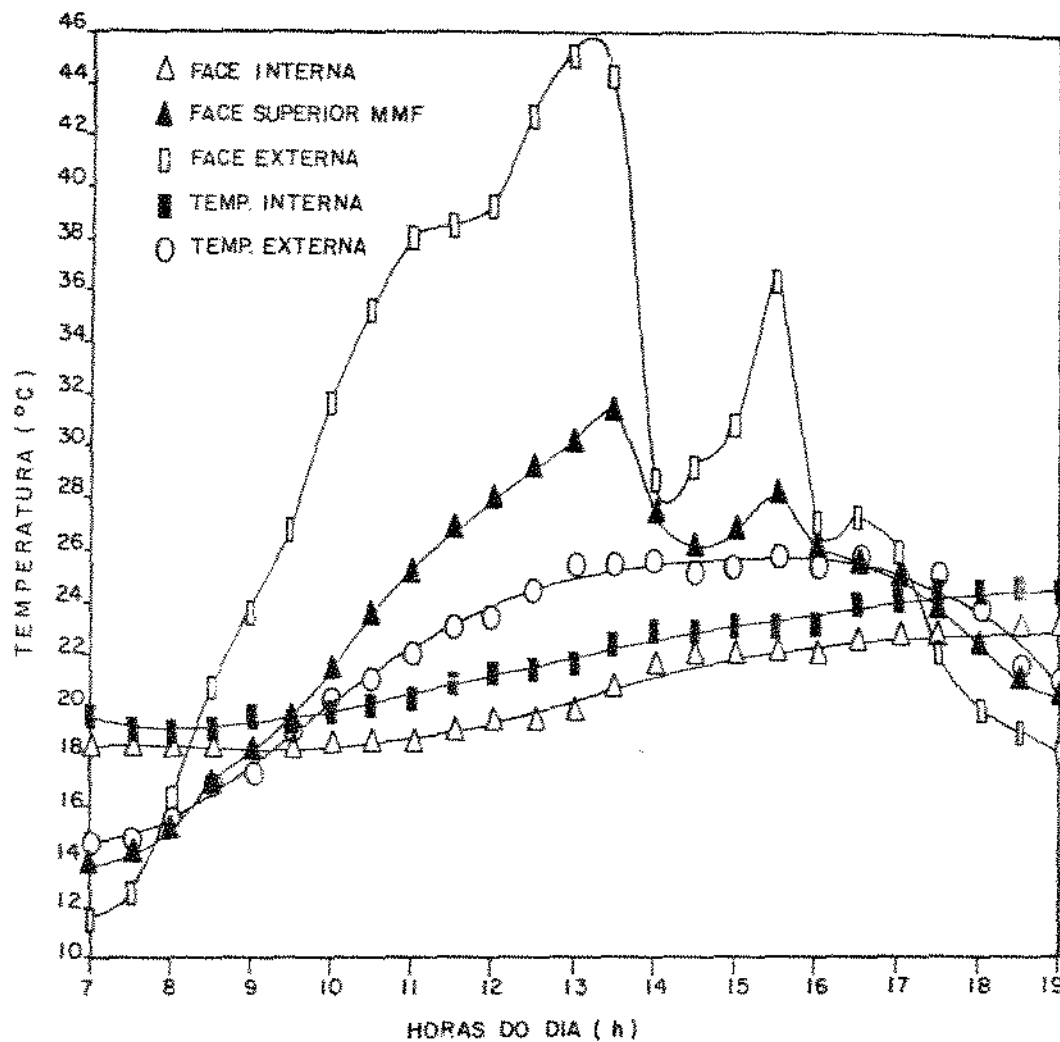


Figura A10.50 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 8D).

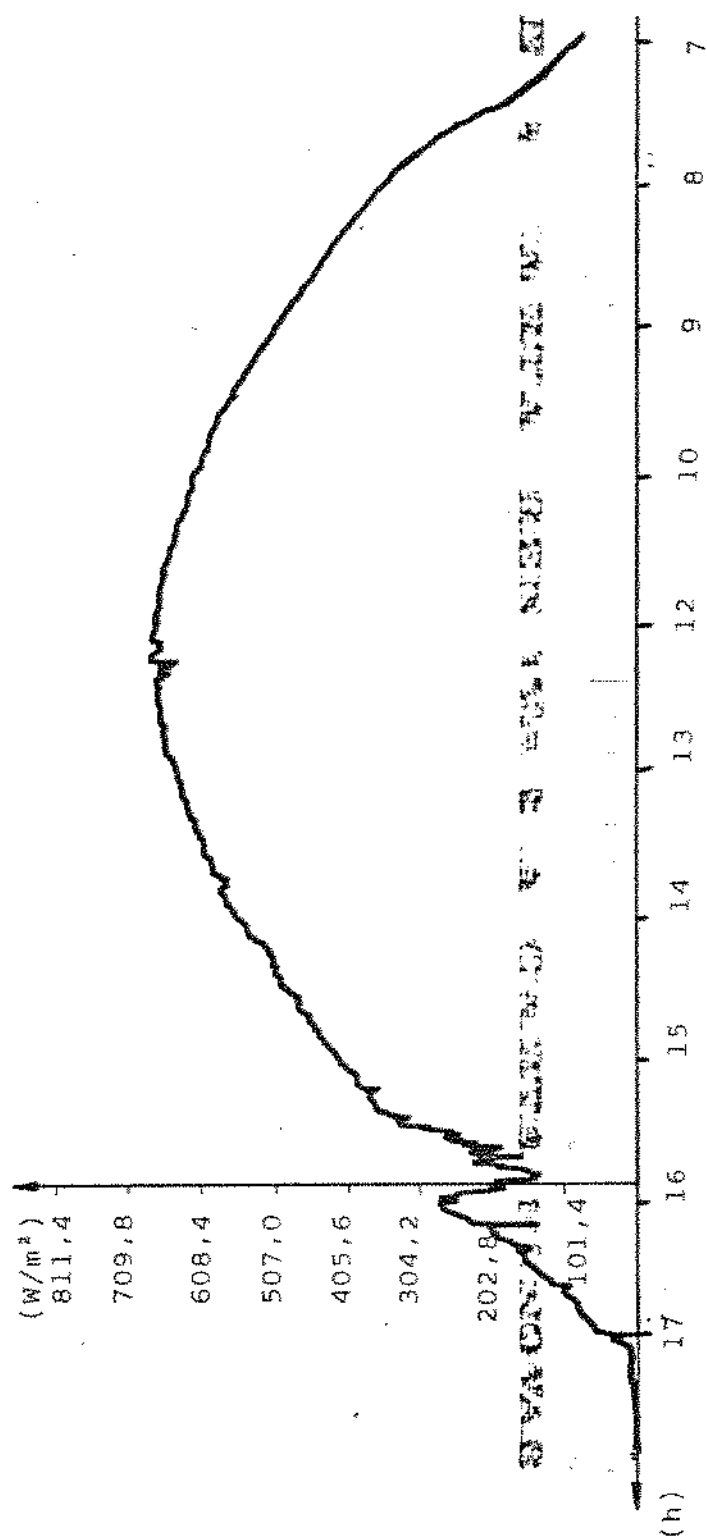


Figura A10.51 - Saída do radiômetro para a experiência 8 (radiação na horizontal).

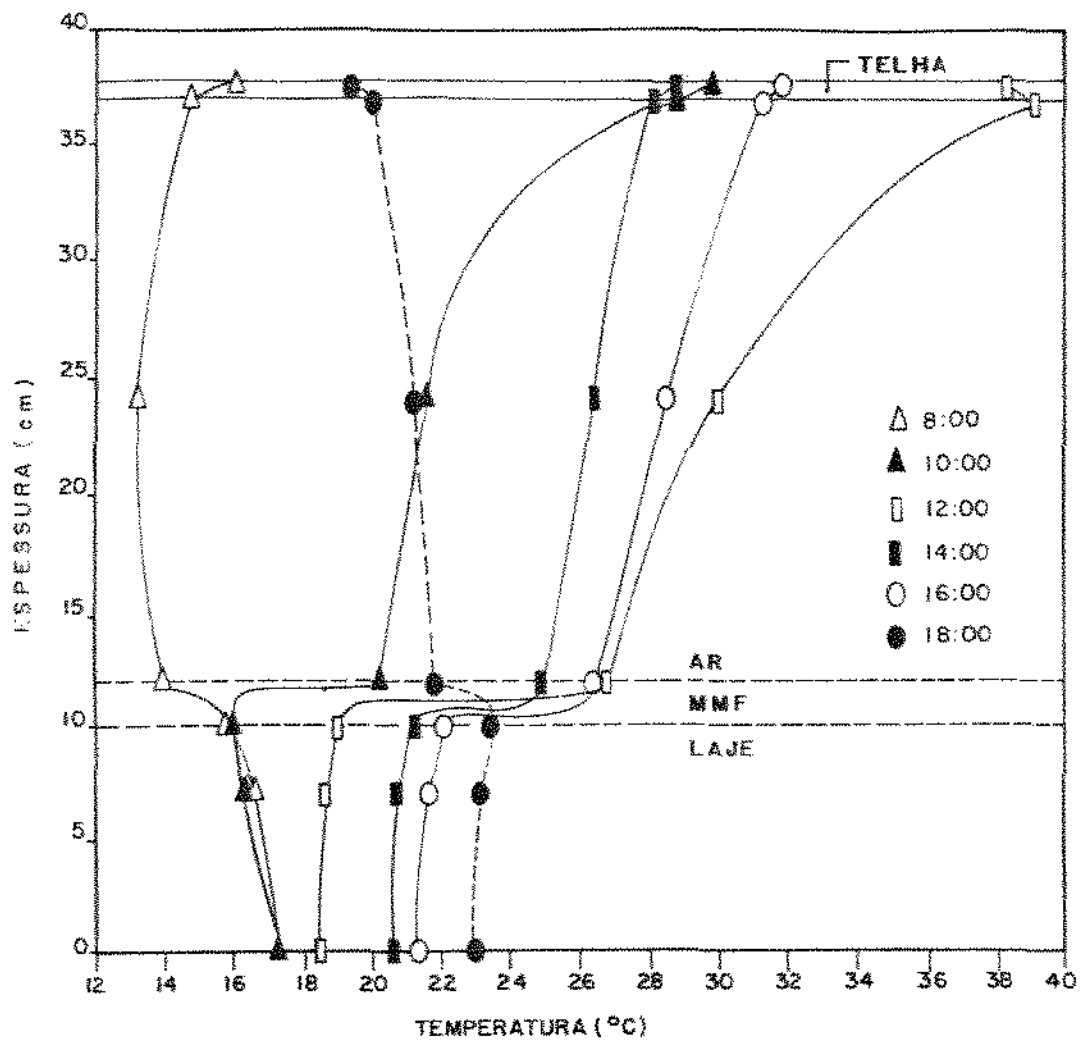


Figura A10.52 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 10).

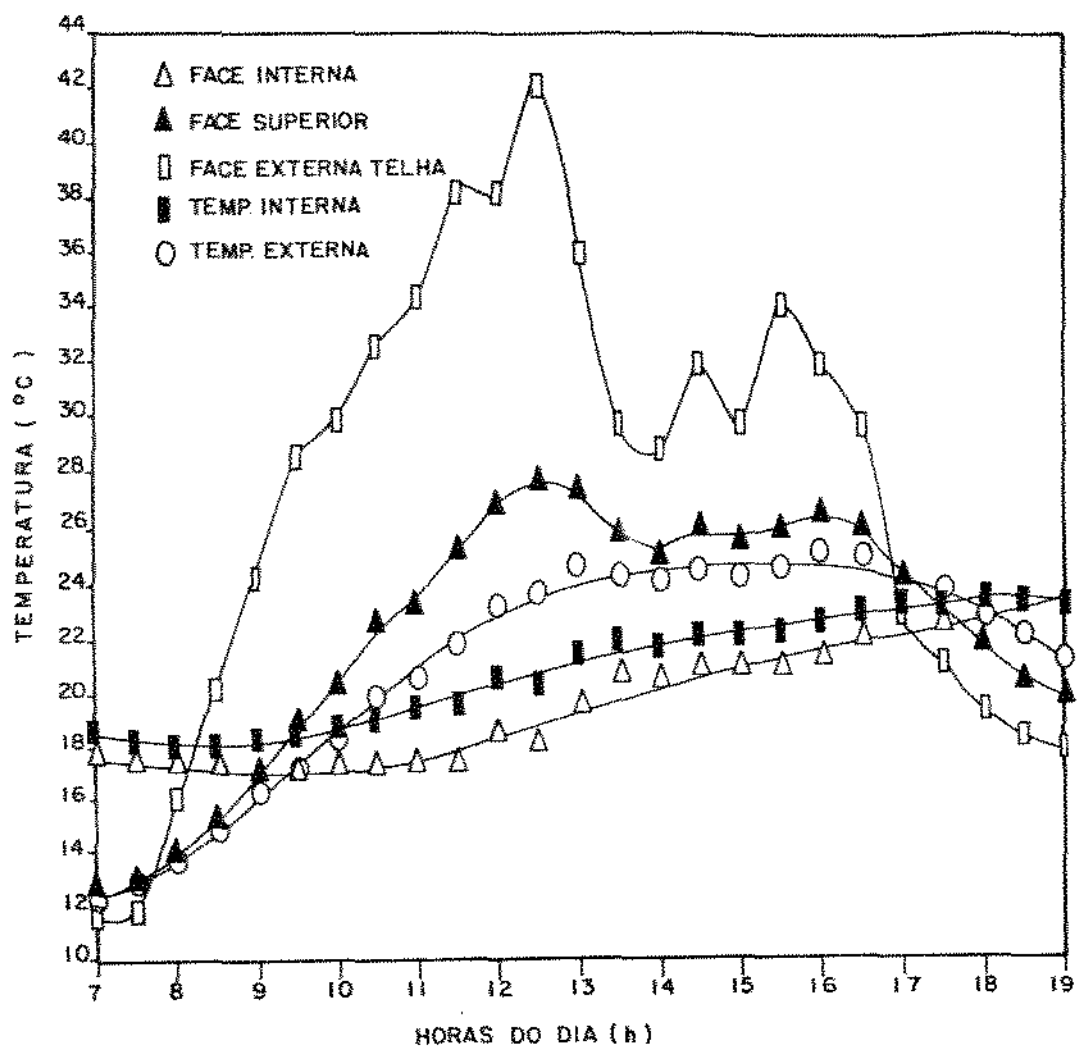


Figura A10.53 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 10).

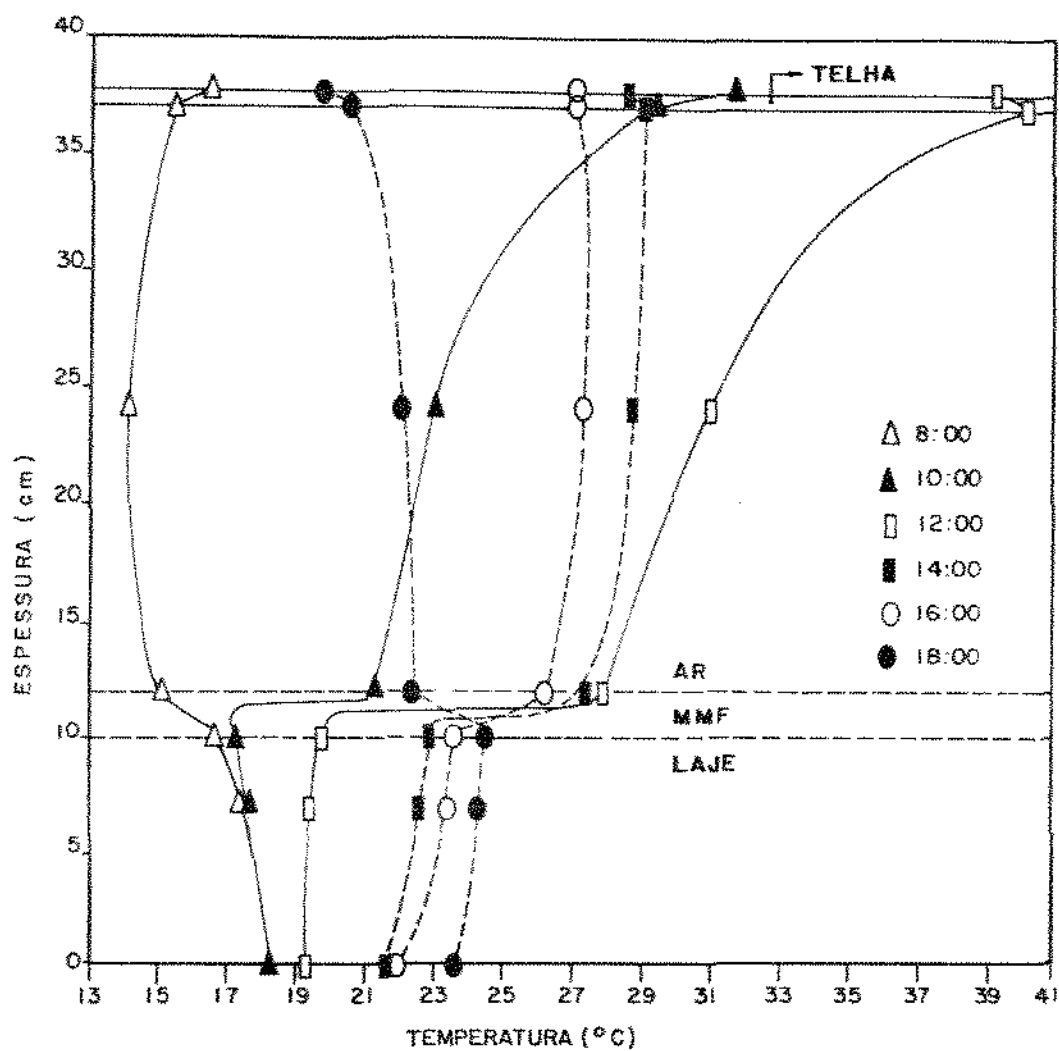


Figura A10.54 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 11).

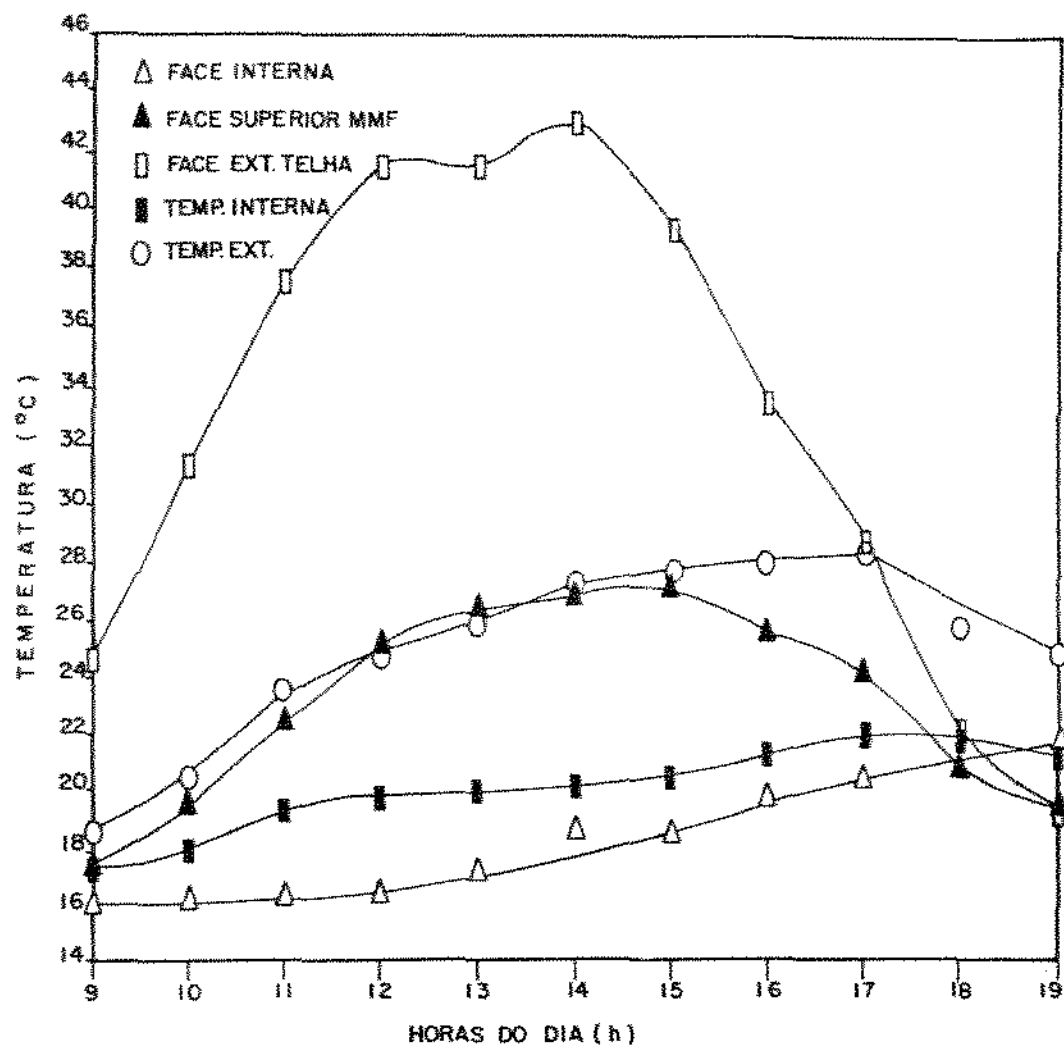


Figura A10.55 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 11).

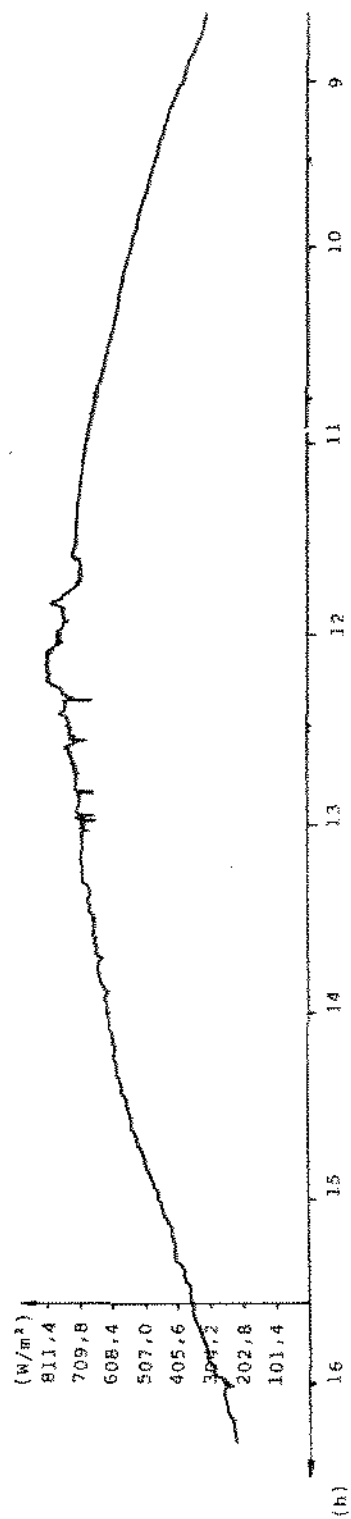


Figura A10.56 - Saída do radiômetro para a experiência 11 (radiação na horizontal).

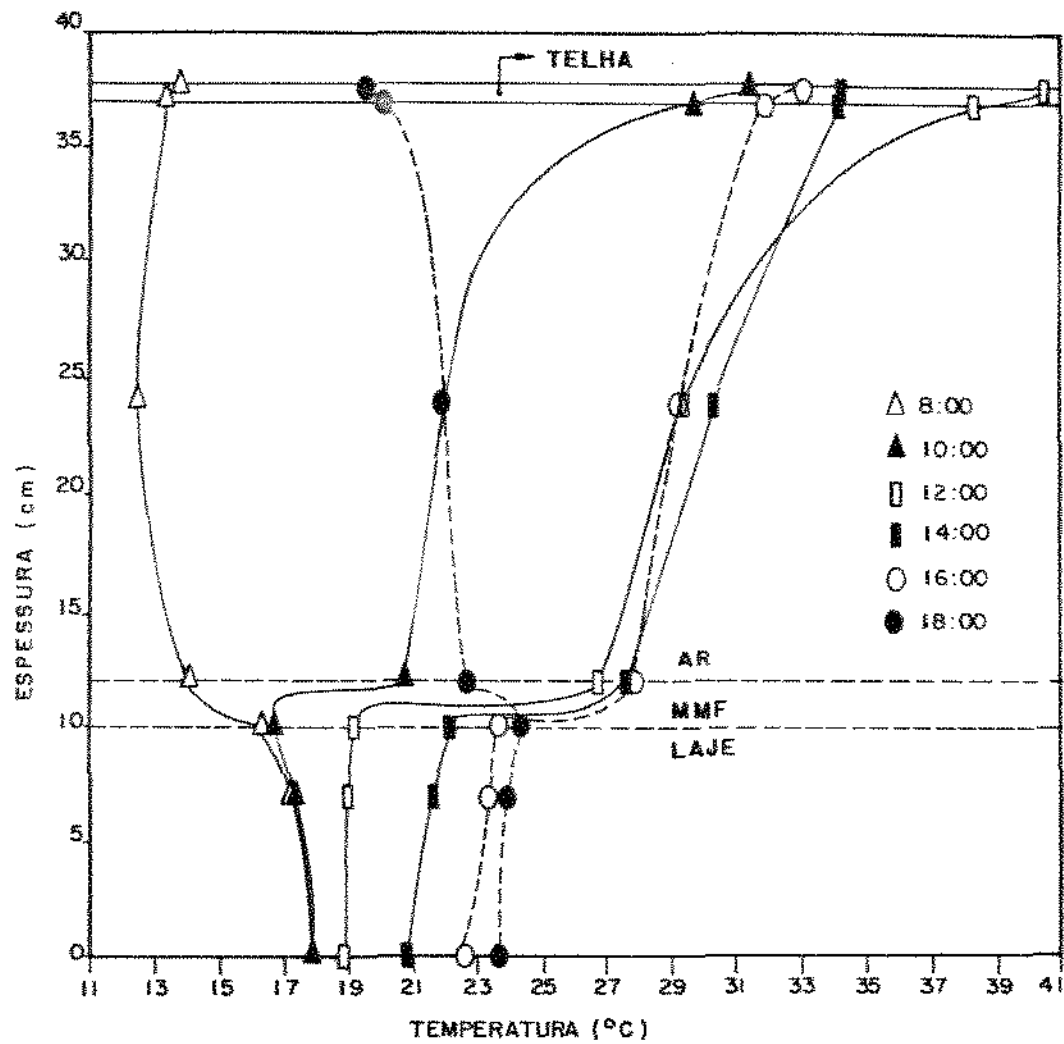


Figura A10.57 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 12).

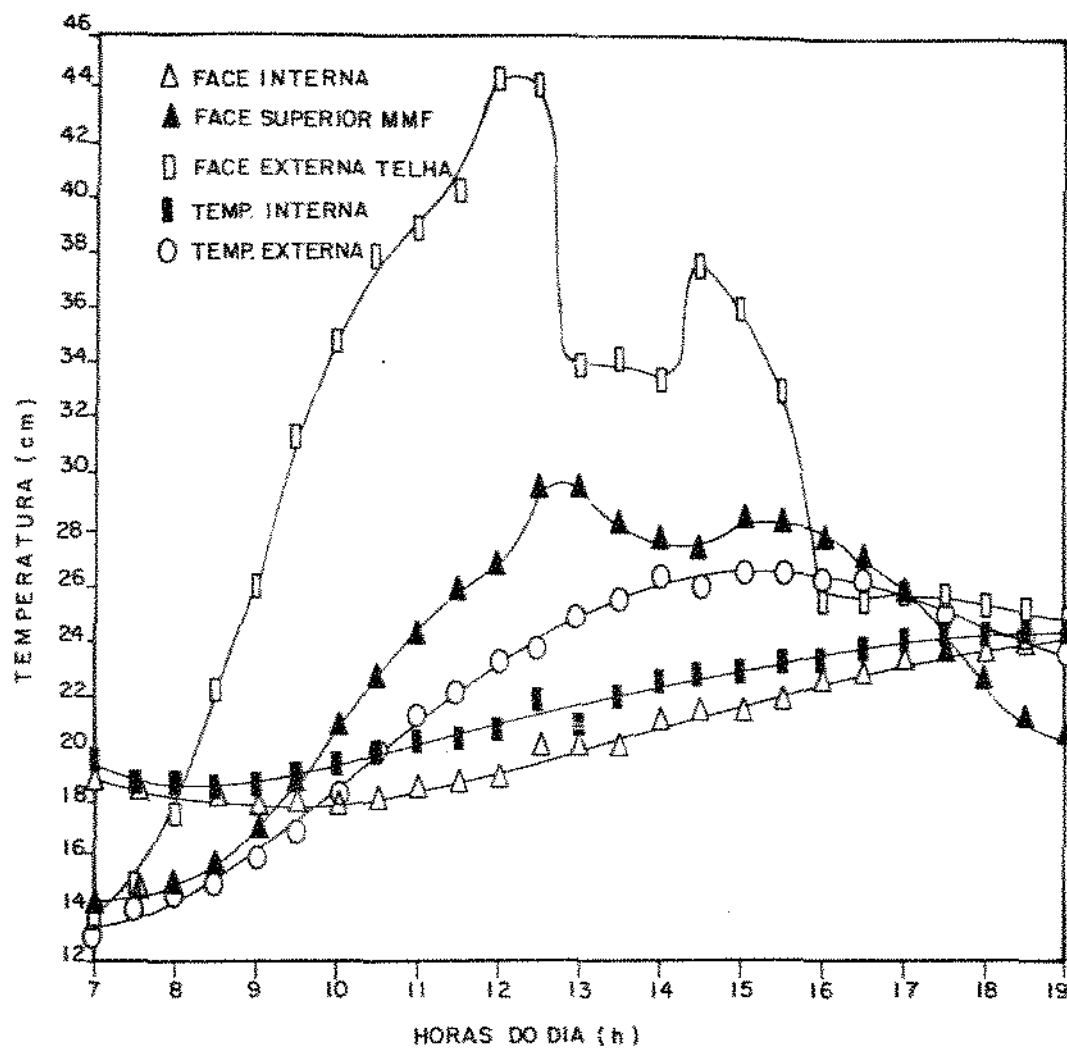


Figura A10.58 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 12).

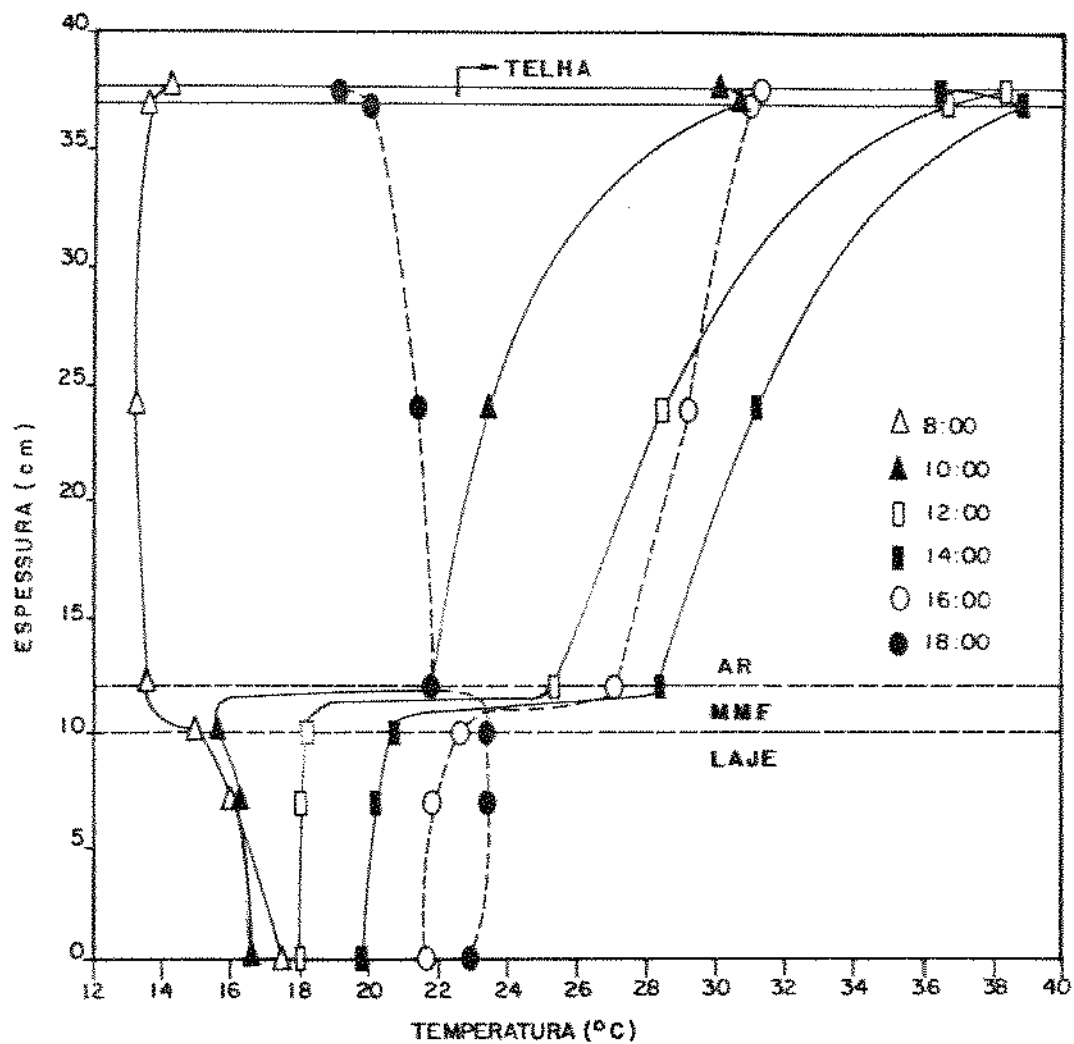


Figura A10.59 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 13).

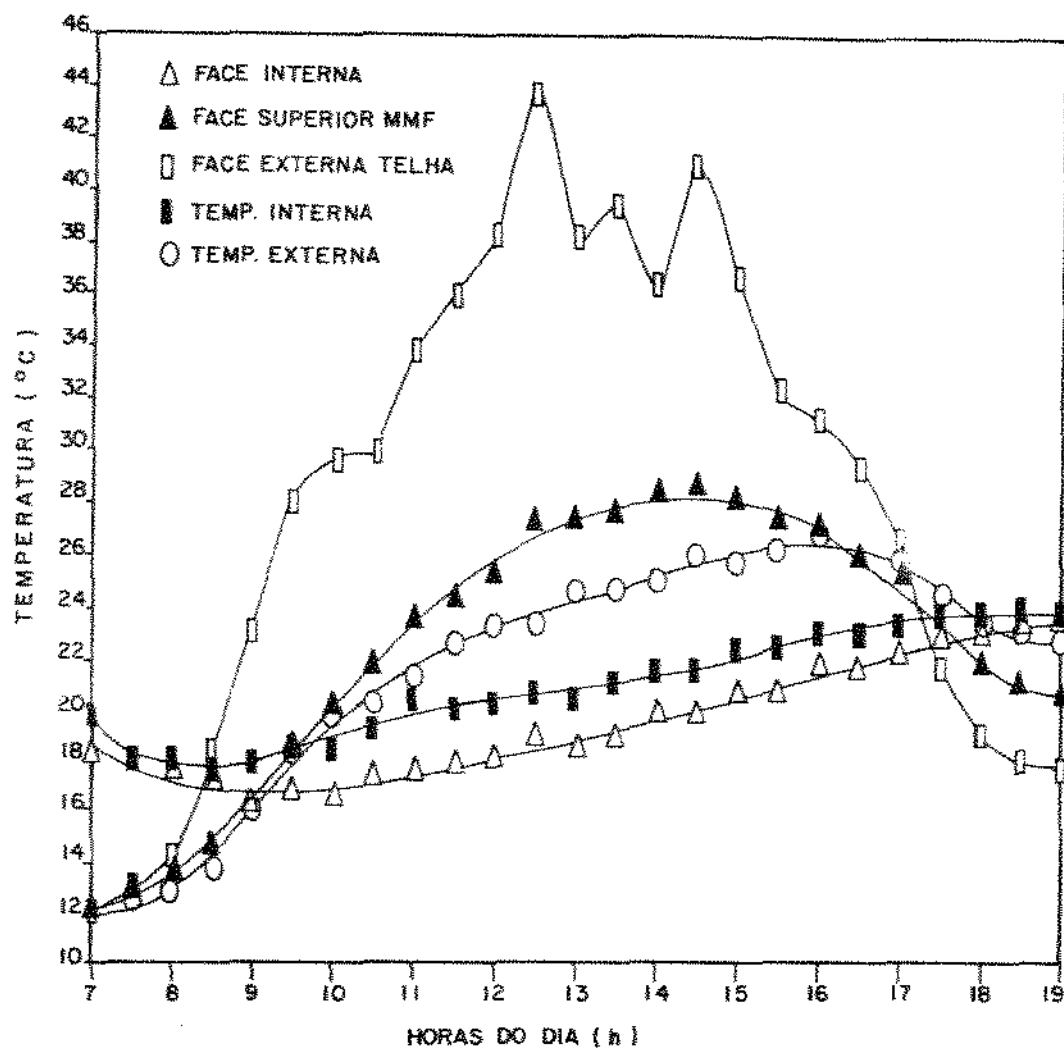


Figura A10.60 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 13).

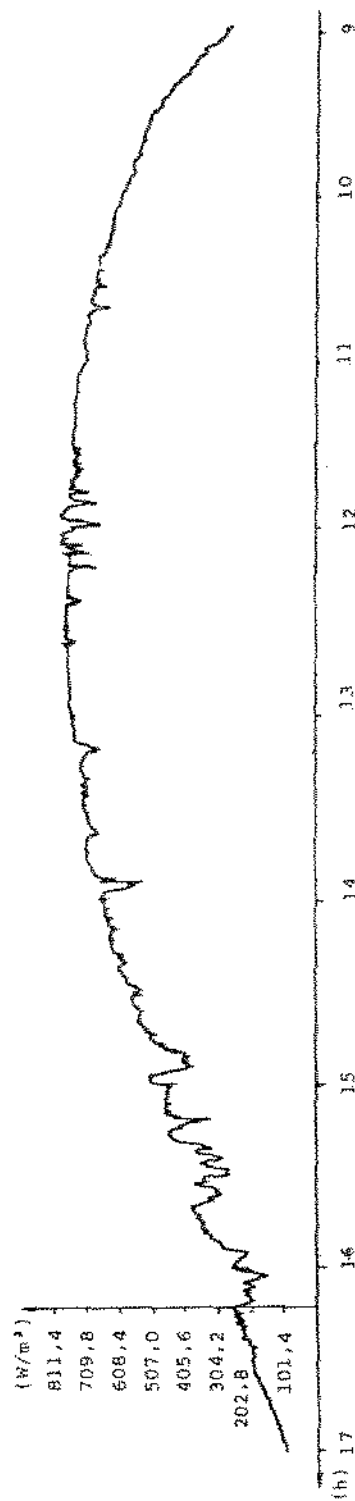


Figura A10.61 - Saída parcial do radiômetro para a experiência 13 (radiação na horizontal).

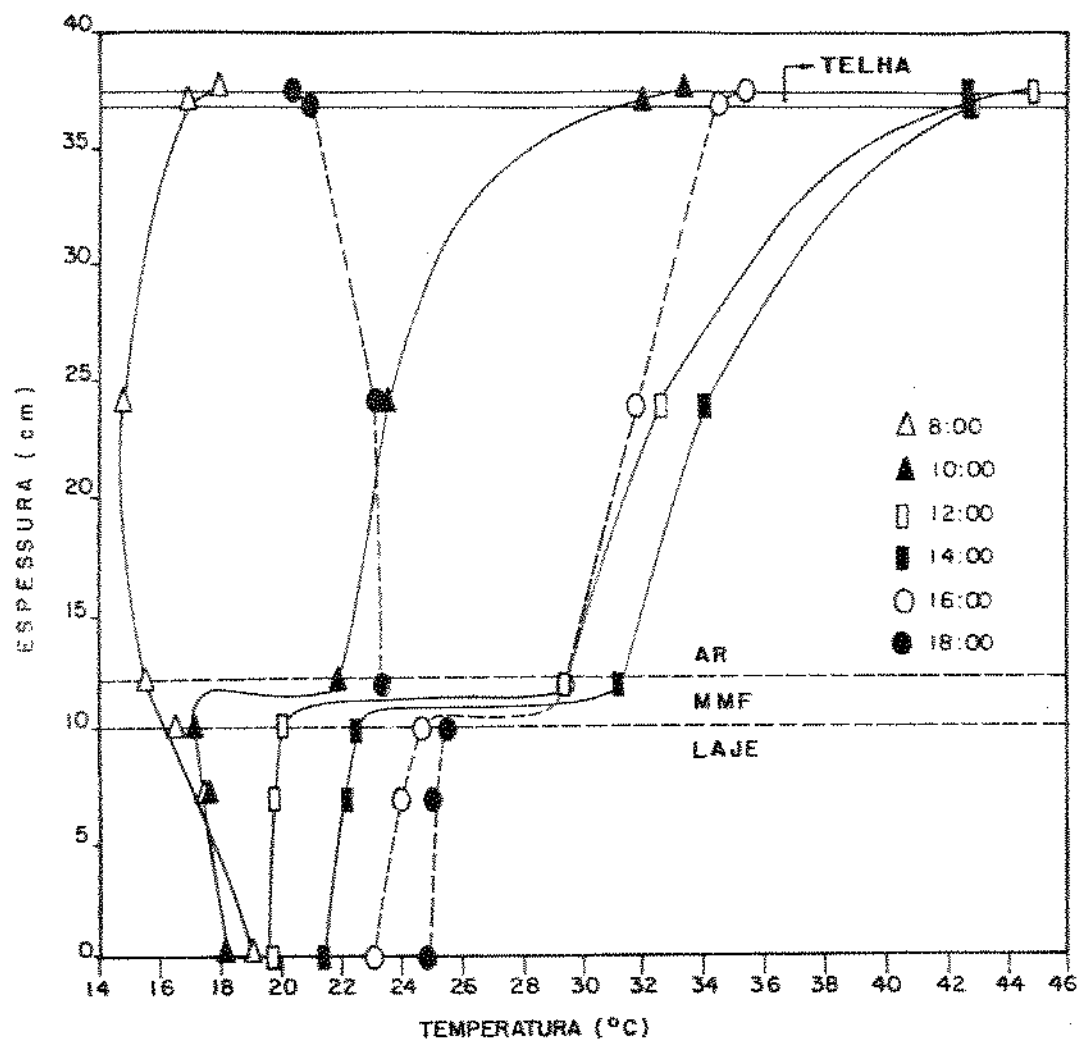


Figura A10.62 - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 14).

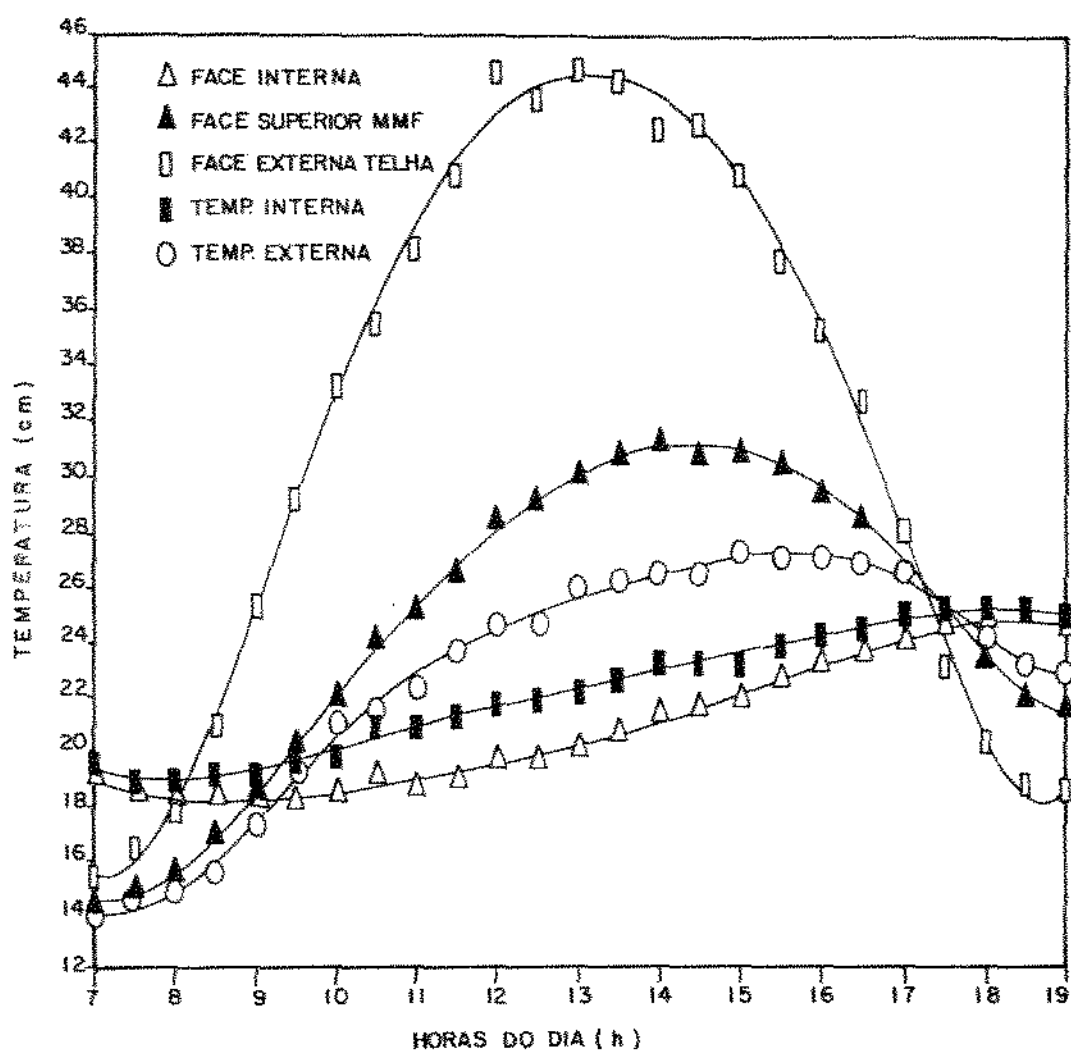


Figura A10.63 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 14).

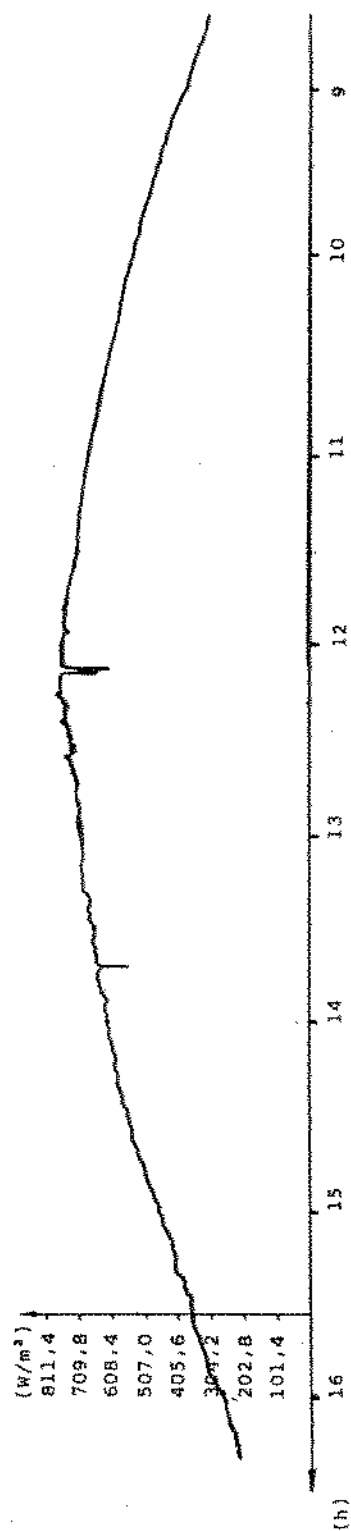


Figura A10.64 - Saída do radiômetro para a experiência 14 (radiação na horizontal).

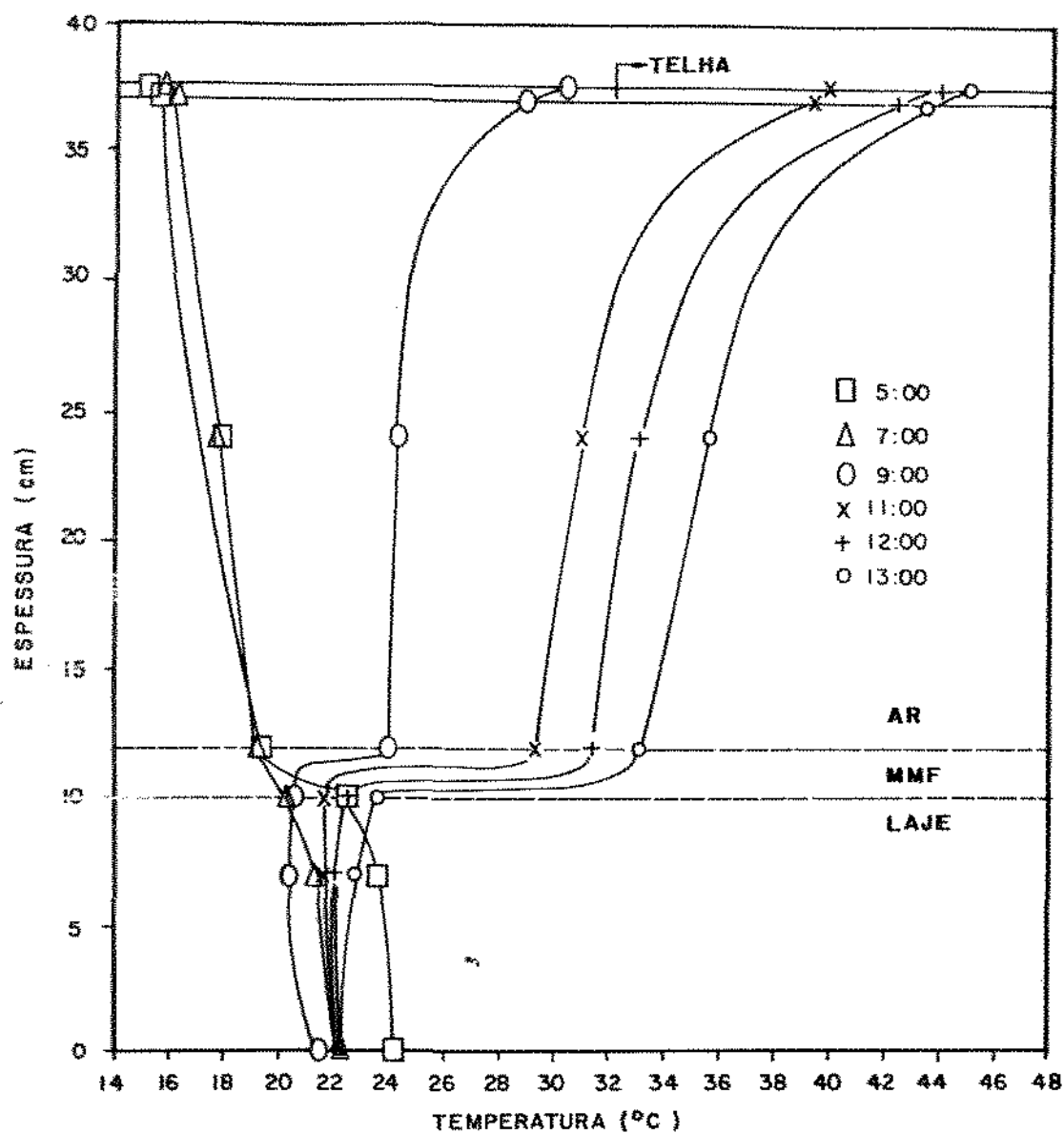


Figura A10.65(c) - Variação da temperatura ao longo da espessura da cobertura térmica, nas várias horas do dia (experiência 16).

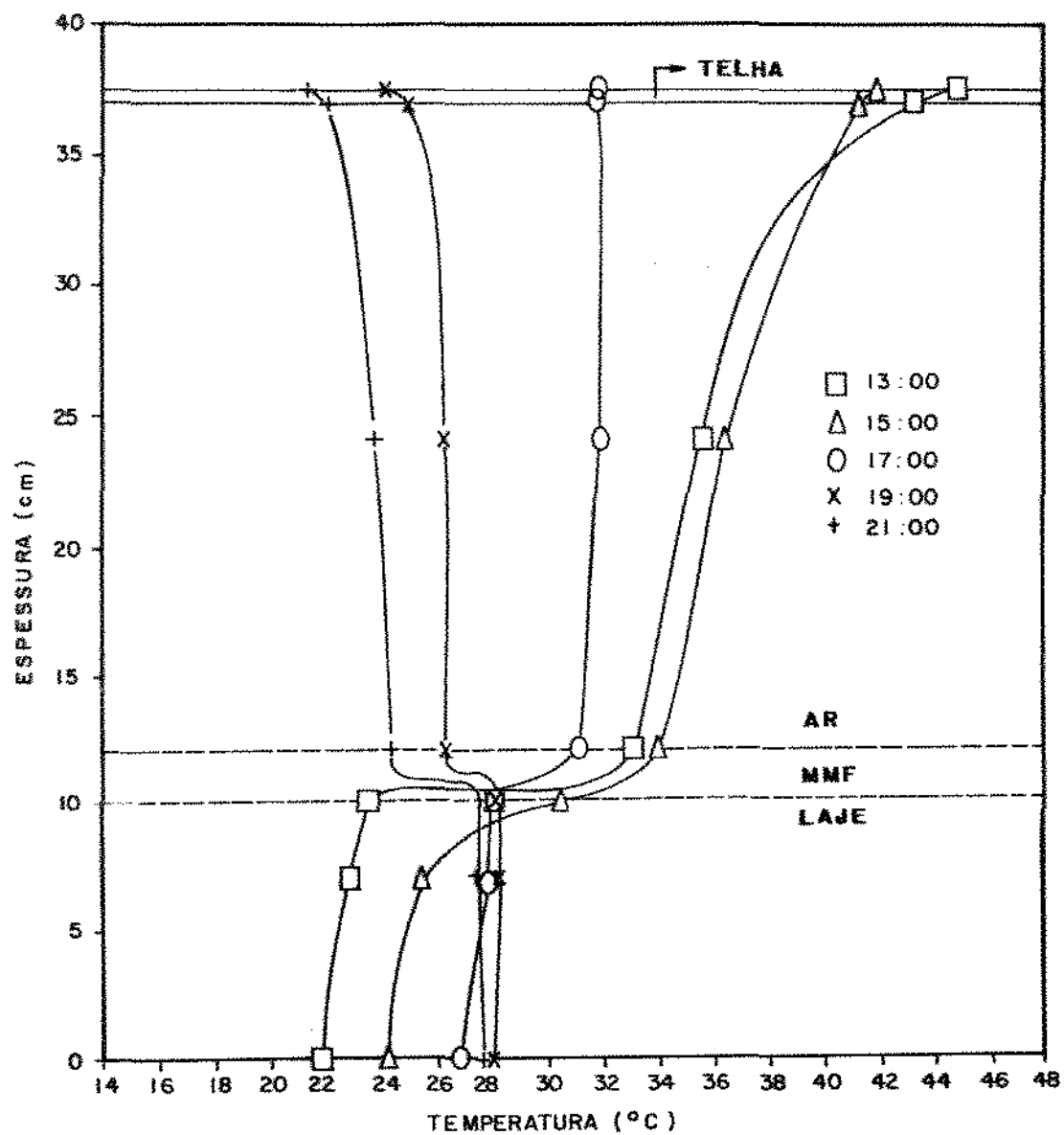


Figura A10.65(b) - Continuação da figura A10.65(a).

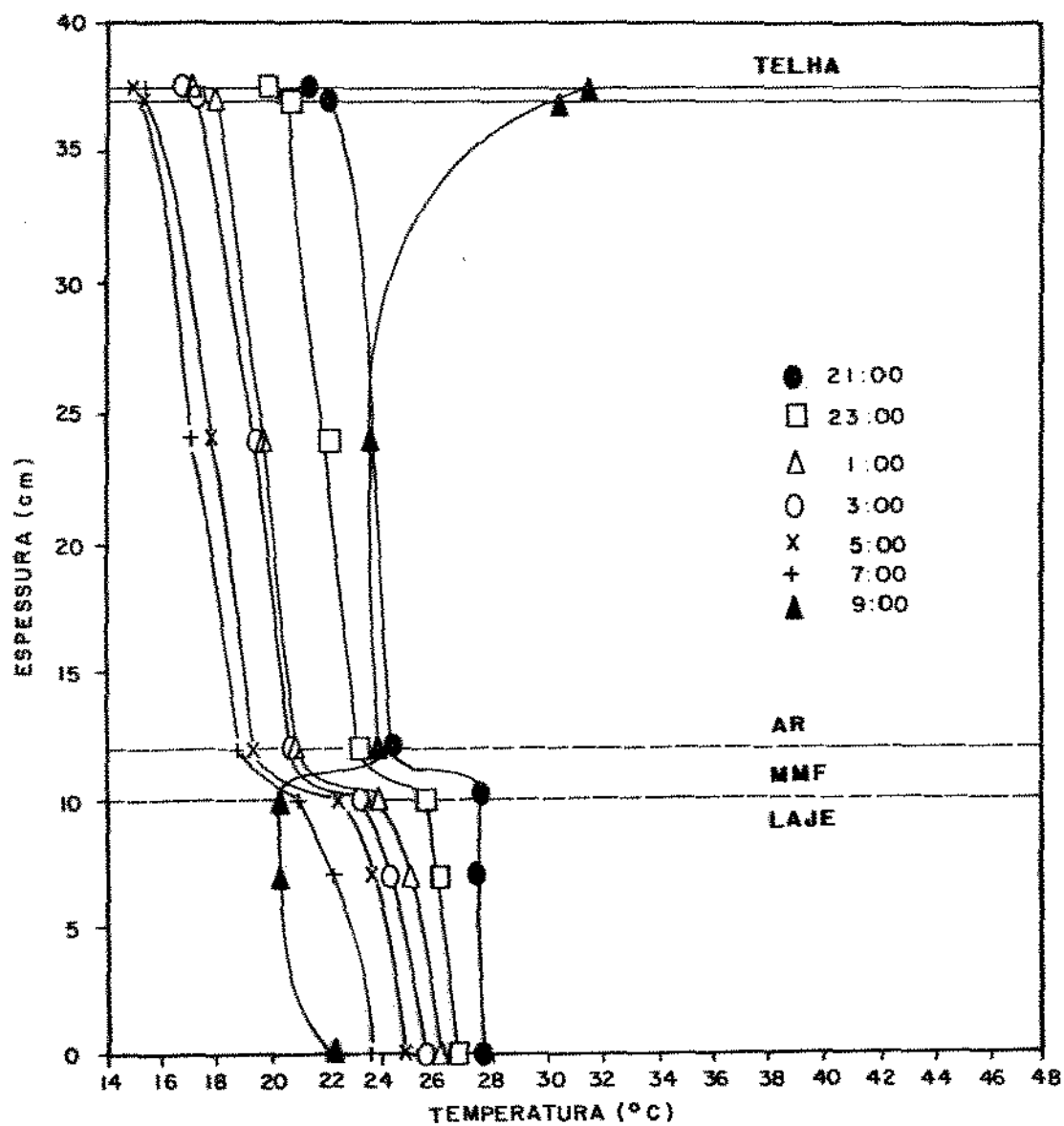


Figura A10.65(c) - Continuação da figura A10.65(a) e (b).

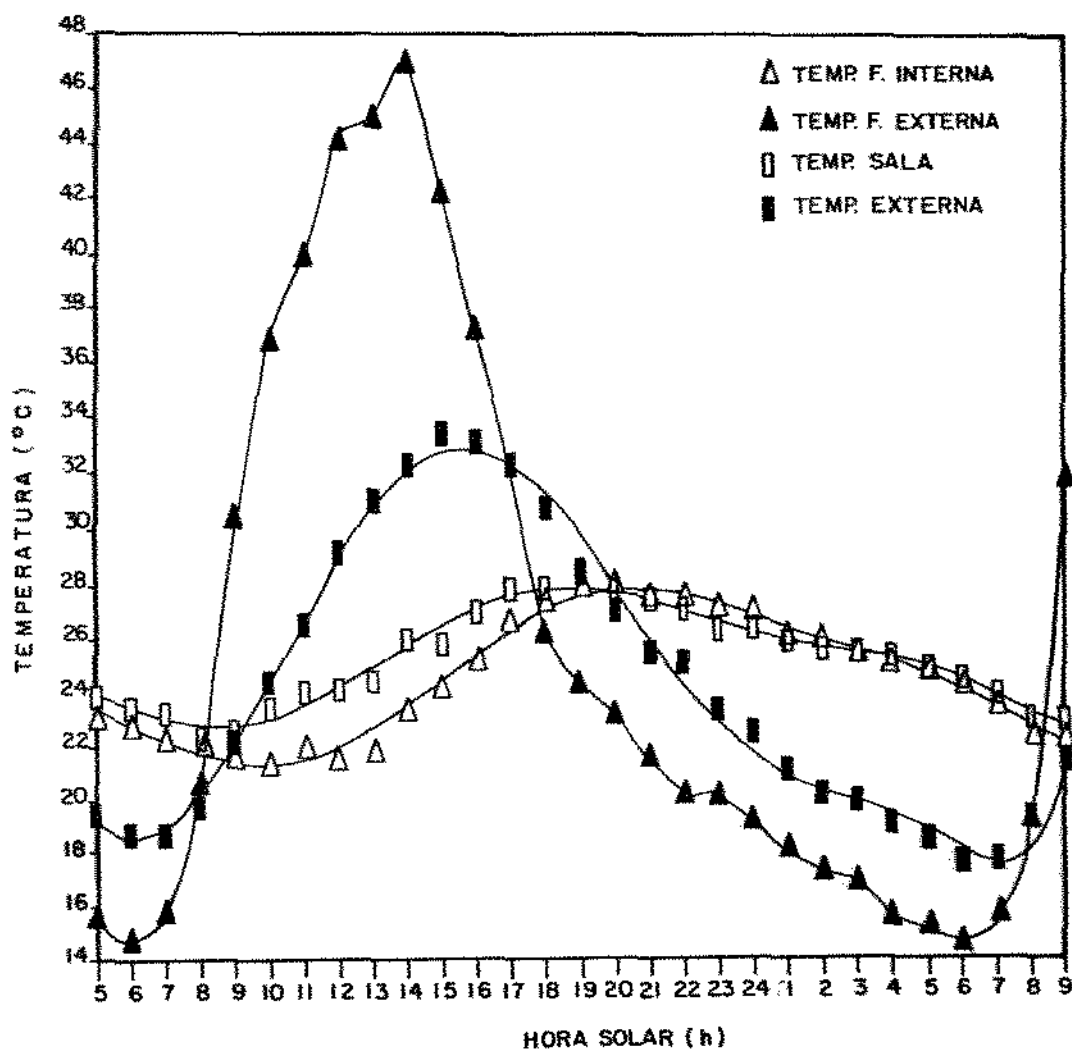


Figura A10.66 - Variação da temperatura com o tempo para a cobertura térmica, ao longo das horas do dia (experiência 16).

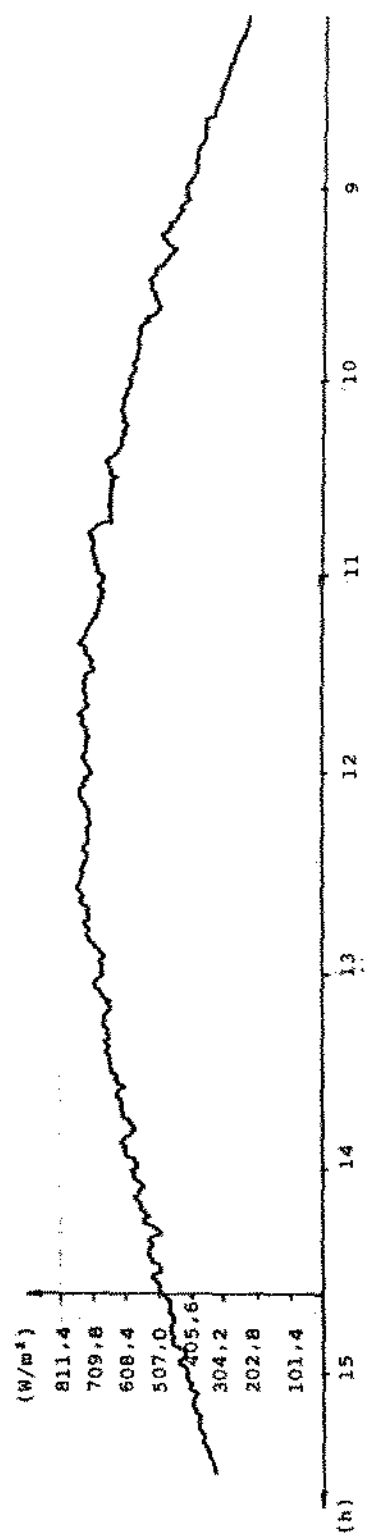


Figura A10.67 - Saída do radiômetro para a experiência 16 (radiação na horizontal).

## BIBLIOGRAFIA

- [01] SOLOMON, A.D., "Design Criteria in PCM Wall Thermal Storage", Energy, vol. 4, pp 701-709, 1979.
- [02] VISKANTA, R., BATHELT, A.G. & HALE, N.W. "Latent Heat-of Fusion Energy Storage: Experiments on Heat Transfer During Solid-Liquid Phase Change", in Alternative Energy Sources III, vol. 1, pp 273-304, 1983.
- [03] ECKERT, E.R.F. & DRAKE, R.M. Jr, "Analysis of Heat and Mass Transfer", New York: McGraw-Hill, pp 522-537, 1972.
- [04] SISSOM, L.E. & PITTS, D "Fenomeno de Transporte", Guanabara Dois, 1979.
- [05] CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. "Conduction of Heat in Solids", 3<sup>o</sup> ed, Oxford University Press, London, 1959
- [06] OZISIK, M.N. "Heat Conduction", A Wiley - Interscience Interscience Publication John Wiley & Sons, Cap 10, 1980.
- [07] MURRAY, W.D., & LANDIS, F. "Numerical and Machine Solutions of Transiente Heat - Conduction Problems Involving Melting or Freezing", in Journal of Heat Transfer, pp 108-112. May 1959.
- [08] CARNAHAN, B., LUTHER, H.A. & WILKES, J.O. "Applied Numerical Methods", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1969.
- [09] HOTTEL, H.C., "A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmosphere", Ises Congress, California (1975).

- [110] LIU, B.Y. & JORDAN, R. C., "The Interrelationship and Characteristic distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation", Solar Energy, 3(4), 1960.
- [111] MACEDO, I.C., "Estimativas de Medias Mensais de Radiação Direta Difusa", VI COPIMERA, São Paulo, 1975.
- [112] SRIVASTAVA, A., KUMAR, A. & TIWARI, G.N., "Thermal Performance of a South Facing Wall as Solar Collector Storage System", Energy Research, Vol. 4, 309-316, 1980.
- [113] ABHAT, A., "Short Term Thermal Energy Storage", Revue Physique Applique 15, 477-501, 1980.
- [114] M.M.E. - SETEC "Balanço de Energia Útil", Dezembro, 1984.
- [115] FELDMAN, D.; SHAPIRO, M.M. & BANU, D., "Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage", Solar Energy Materials, 13, 1-10, 1986.
- [116] ABHAT, A. "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials", Solar Energy, Vol. 30, 313-332, 1983.
- [117] PERRY, R.H. & CHITON, C.H., "Manual de Engenharia Química, Guanabara Dois, 1980.
- [118] LORSCH, H.G.; KAUFMANN, K.W. & DENTON, J.C. "Thermal Energy Storage for Solar Heating and Off-Peak Airconditioning", Energy Conversion 15, 1-2, 1975.
- [119] YONEDA, N. & TAKNASHI, S., "Eutectic Mixtures for Solar Heat Storage", Solar Energy 21, 61-63, 1978.

- [20] ASTM. "Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement", ASTM Special Technical Publication 470A, Philadelphia, 1974.
- [21] BENEDICT, R.P., "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements", 2<sup>a</sup> ed, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [22] ASHRAE HANDBOOK & PRODUCT DIRECTORY, 1977 FUNDAMENTALS, Published by the American Societhe of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engeneers, Inc.
- [23] INSTITUTO AGRONOMICO DE CAMPINAS, "Valores Médios no Período de 1956-1972, dos Dados Meterológico para a Cidade de Campinas-SP (latitude 22°53'S, longitude 47°05' W, altitude em relação ao nível do mar 614 m).
- [24] DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A., "Solar Energy Thermal Processes", Wiley Interscience, New York, 1980.
- [25] SMITH, G.D., "Numerical Solution of Parcial Differential Equations", Oxford University Press, London, 1965.
- [26] RICHTMEYER, R.D., "Difference Methods for Inicial Value Problems", Interscience Publischers, Inc, New York, 1957.
- [27] OZISIK N.N., "Boundary Value Problems of Heat Conduction", International TextBook Company, Scraton, Pennsylvania, 1968.
- [28] BUDDHI, D., BANSAL, N.K., SAWHNEY, R.L. & SODHA, M.S. "Solar Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials", International Journal of Energy Research,

Vol. 12, 547-555 (1988).

- [29] BENARD, C., BODY, Y., GOBIN, D. & GUERRIER, B. "Use of a Variable Parameter Test-Cell for the Study of Latent-Heat Solar Walls", Solar Energy, Vol. 29, n<sup>o</sup> 2, 101-109, 1982.
- [30] BENARD, C., BODY, Y. & ZANOLI, A. "Experimental Comparison of Latent and Sensible Heat Thermal Walls", Solar Energy, Vol. 34, n<sup>o</sup> 6, 475-487, 1985.
- [31] ZHANG, Z. & BEJAN, A. "Solidification in the Presence of High Rayleigh Number Convection in Enclosure cooled from the Side", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, n<sup>o</sup> 4, 661-671, 1990.
- [32] BISWAS, D.R. "Thermal Energy Storage Using Sodium Suphate Decahydrate and Water" Solar Energy 19, 99-100, 1977.
- [33] BENARD, C. GOBIN, D. & MATINEZ, F. "Melting in Rectangular Enclosures: Experiments and Numerical Simulations, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, 794-803, Nov. 1985.
- [34] GÜÇERİ, S.I. & FAUNCE, S.F. "Modeling of a Thermal wall Panel Using Phase Change Materials" Energy, Vol. 4, 695-699, 1979.
- [35] SOLOMON, A.D. "Melt Time and Heat Flux for a Simple PCM Body", Solar Energy, Vol. 22, 251-257, 1979.
- [36] HUANG, B.K., TOKSOY, M. & CENGEL, Y.A. "Transiente Response of Latent Heat Storage in Greenhouse Solar System". Solar Energy, Vol. 37, n<sup>o</sup> 4, 279-292, 1986.

- [37] TCPO. "Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos", Editora Pini Ltda., 2<sup>a</sup> ed, 1977.
- [38] HOLMAN J.P., "Trasnfereência de Calor", McGraw-Hill, 1983.
- [39] OZISIK, M.N., "Transferência de Calor um Texto Básico", Gunabara Koogan, 1990.
- [40] CARRIER AIR CONDITIONING; "Handbook of air conditioning System Design"; ED. Mc Graw - Hill Book Co.; U.S.A.; 1965.
- [41] Chemical Week, março 1, 1978, 34-35.
- [42] PARIS, J., VILLAIN, F. AND HOULE, J, F. "Incorporation of PCM in Wallboards A Review of Recent Developments", World Renewable Energy Congress, Reading 1990, 23-28 September 1990 - U.K., Vol. 4, 2397 - 2401.
- [43] ZERROUKI, A. "Thermophysical Characteritics of Mult-Layered Construction of Wall", World Renewable Energy Congress, Reading 1990, 23-28 September 1990 - U.K., Vol. 4, 2585 - 2589.
- [44] ISMAIL, K. A.R.; CASTRO, J.N.C. "Performance Teórica de uma parede Térmica Composta de Alvenarias e Material de Mudança de Fase, submetida a Insolação", V Congresso Latino-Americano de Energia Solar, ValParaíso-Chile, E 168-E 176, 1986.
- [45] "ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "Avaliação do Comportamento de uma Parede Térmica submetida a Insolação", IV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, Vol. 113, 136-146, 1987.

- [46] ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "Thermal Performance of Walls Filled With Phase Change Material", Internacional Conferecen of Heat Transfer in Energy Conservation, Shenyane, PR China, 1988.
- [47] ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "Determinação Experimental das Propriedades Termofísicas de alguns Materiais de Mudança de Fase", IX Seminário ADUNESP-Guaratinguetá, Vol. II, 306-311, 1988.
- [48] ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "Numerical and Experimental Analysis of PCM Walls", 7<sup>o</sup> Congresso Nazionale Sulla Trasmissione del Calore, Firenze, 15-17, Glugno, 1989.
- [49] ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "PCM Walls and Roofs for Passive Thermal Confort", World EeNEWable Energy Congress, Reading 1990, 23-28, U.K., Vol. 4, 2660-2664, September, 1990.
- [50] ISMAIL, K. A. R.; CASTRO, J. N.C. "Performance Térmica de Paredes Preenchidas com Material de Mudança de Fase". II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, 10-12 dezembro (Cencite 90), 973-977, 1990.