

**MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
PARA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PERFIL
TÉRMICO DE SOLOS AGRÍCOLAS**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
- UNICAMP -
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
PARA SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PERFIL
TÉRMICO DE SOLOS AGRÍCOLAS

MAURO JOSÉ ANDRADE TERESO
Orientador: INÁCIO M. DAL FABBRO, Ph.D.

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Alimentos e Agrícola da Universidade Estadual
de Campinas para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA.

Parecer

Este exemplar corresponde a eda-
ção final da Tese defendida por
Mauro José Andrade Tereso e apro-
vada pela comissão julgadora em
27 de abril de 1984.

Campinas, 27 de abril, de 1984.

A meus pais,
Manuel e Noémia
A Lígia

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Inácio M.Dal Fabbro, Ph.D, orientador e amigo, pelos incentivos e ensinamentos durante a pesquisa;

A Prof. Roseana Moraes Garcia, pela colaboração na elaboração dos programas;

Aos autores das publicações utilizadas nesta pesquisa;

As minhas irmãs, por todo apoio que me têm dado;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela colaboração na instalação dos aparelhos;

A M. Júlia Dini Fray, pela execução do trabalho de datilografia;

A Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação - ABIA, pela gentileza das cópias deste trabalho;

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia Agrícola que contribuiram para enriquecer esta pesquisa;

Aos meus amigos, pela paciência, estímulo e carinho que sempre me dispensaram.

ÍNDICE

RESUMO	1
SUMMARY	3
LISTA DE SÍMBOLOS	4
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	5
CAPÍTULO II - OBJETIVOS	8
CAPÍTULO III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
CAPÍTULO IV - TEORIA	21
IV.1. MODELO ANALÍTICO	22
IV.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	30
CAPÍTULO V - MATERIAIS E MÉTODOS	42
CAPÍTULO VI - RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES	67
CAPÍTULO VIII - RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	69
BIBLIOGRAFIA	71
APÊNDICE A - PROGRAMAS	74

APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS ESPERADOS ... 80

APÊNDICE C - GRÁFICOS 118

RESUMO

O presente trabalho inclui um estudo teórico e experimental da distribuição de temperatura em solos agrícolas.

A literatura disponível revela estudos teóricos baseados em soluções analíticas da equação geral de condução de calor em sólidos, e para tanto, o solo foi considerado como um sistema semi-infinito, homogêneo, isotrópico e contínuo. Tais soluções foram comparadas com dados experimentais para se verificar a validade e limitações do modelo matemático proposto. Não obstante, outros autores apresentam modelos matemáticos onde o solo é considerado um sistema composto por diversas fases. Alguns autores utilizaram-se de análises numéricas para facilitar a interpretação da característica não contínua do solo. Trabalhos mais específicos incluem o calor transportado por convecção devido à presença de água no solo. Vários autores exploraram a fenomenologia do ciclo diurno-noturno, o qual foi descrito como uma condição de contorno.

Na presente pesquisa, a temperatura do solo foi medida por meio de termopares até uma profundidade de 60 cm. O solo em questão é o latossolo roxo, encontrado na região de Campinas. O sistema foi considerado como isotrópico e contínuo, para o qual a equação geral da condução de calor, em condições harmônicas de contorno, foi resolvida analiticamente.

Os resultados da solução por Elementos Finitos e da solução analítica foram comparados com os dados experimentais. O

modelo por Elementos Finitos apresenta maiores recursos para se descrever um modelo mais complexo, composto de fases com distin
tas propriedades, aproximando-se mais das condições reais.

SUMMARY

This research work presents a review of the literature on temperature distribution in agricultural soils. Such literature includes papers which considered the soil system to be a continuous and isotropic homogeneous medium for which the general heat conduction equation is valid. Some of the papers considered the soil a system composed by several phases. Some authors also considered the convection phenomena due to the presence of water in the soil. The non-homogeneous characteristic of the soil was also explored for which a numerical analysis was performed.

This paper takes the advantage of the diurnal-nocturnal cycle which made possible to consider a harmonic boundary condition for the general heat conduction equation. Soil was considered a homogeneous isotropic media were heat flows by pure conduction. The results of the analytical solution was compared with experimental results and also with the results obtained from a finite element model. The finite element model was presented in order to consider the non-homogeneity of soil layers for future studies. Comparisons of both models with experimental results show close agreement.

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	NOME	UNIDADE
T	temperatura	°C
t	tempo	seg
x	profundidade	cm
$\partial/\partial t$	derivada parcial com relação ao tempo	-
$\partial/\partial x$	derivada parcial com relação à <u>dis</u> tância	-
P	período	seg
F	frequênciā	seg ⁻¹
D	difusividade térmica	cm ² x seg ⁻¹
K	condutividade térmica	cal cm ⁻¹ seg ⁻¹ °C ⁻¹
ρ	densidade	g x cm ⁻³
S	calor específico	cal x g ⁻¹ °C ⁻¹
Q	fluxo de calor	cal x cm ⁻² seg ⁻¹
λ	produto da densidade pelo calor <u>es</u> pecífico	cal cm ⁻³ °C ⁻¹
[]	notação matricial	-
{ }	notação de vetor coluna	-
TEX	temperatura observada <u>experimental</u> mente	°C
TMA	temperatura esperada pelo método <u>a</u> nalítico	°C
TEF	temperatura esperada por elementos finitos	°C
e	erro percentual em relação à <u>tempe</u> ratura observada	%
e_{\max}	erro percentual máximo	%
Se	erro standard	°C
A	amplitude térmica	°C

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

As mais diferentes pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas para evolução e progresso da agricultura se originaram da necessidade crescente de aumentar a produtividade agrícola e animal, em resposta ao aumento da população mundial e à busca da melhoria da qualidade de vida do ser humano.

Dentre estas pesquisas e técnicas estão as que visam adequar a planta ou o animal a um ambiente onde possam se desen- volver com um máximo rendimento, dentro de suas potencialidades genéticas.

Os estudos da condutividade térmica do solo e do câmbio de energia na superfície são de grande importância, uma vez que influenciam os processos físicos, químicos e biológicos do solo. Estes estudos fornecem bases científicas para melhor aplicação de recursos nos solos a serem cultivados, e proporcionam informações sobre as condições ambientais que o solo pode oferecer. Também , não de menos importância, é o estudo de armazenamento e fluxo de calor no solo.

Dentro desta filosofia, o presente trabalho visa deter-minar o perfil de temperatura do solo, assumindo que a equação geral de difusão de calor é aplicável.

O solo é um meio poroso, não homogêneo, por onde circu-lam líquidos e gases transportando calor. A aplicação de métodos matemáticos de condução de calor em sólidos deve ser feita com al-guns cuidados. Para tanto, o presente considera o solo como um

meio isotrópico, contínuo, semi-infinito, em condições harmônicas de contorno e perdas convectivas desprezíveis.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é prever o perfil da variação periódica da temperatura de solos agrícolas.

Especificamente, visa apresentar um modelo que preveja, de forma simples e de fácil utilização, o perfil de temperatura do solo; para tanto, comparar-se-ão uma solução analítica e uma solução por elementos finitos com dados experimentais obtidos em condições de campo.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Destacado trabalho sobre fluxo de calor em solos foi publicado por PATTEN (1909) do U.S. Bureau of Soils. Foi um dos primeiros trabalhos feitos na determinação das propriedades térmicas do solo por meio de um método transiente. O autor colocou termômetros nas amostras de solo úmido a várias distâncias da fonte de calor. A temperatura era lida para os diferentes pontos em curtos intervalos de tempo. Estes valores eram plotados em oposição à distância e tempo para cada difusividade térmica calculada. A amostra de solo úmido foi colocada numa caixa com termômetros dispostos em intervalos de 1 cm a partir da fonte de calor. A temperatura foi lida em todos os termômetros a intervalos frequentes e curtos. A temperatura foi plotada em função do tempo sendo a inclinação desta curva $\partial T / \partial t$. Para um dado tempo, a temperatura foi plotada em função da distância à fonte de calor. A inclinação desta curva era lida para os pontos $x = 4,5$ cm e $x = 5,5$ cm para determinar $\partial T / \partial x$ para estes pontos. A diferença entre estes dois valores era dividida pela distância entre eles e $\partial^2 T / \partial x^2$ era obtido. Por este caminho, Patten determinou os componentes da equação geral de calor para fluxo unidimensional:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad , \quad (3.1)$$

onde D é a difusividade térmica do solo. Seus resultados mostraram que a difusividade aumenta a um máximo, então decresce antes que o ponto de saturação seja alcançado. O autor afirma que haviam graves defeitos neste método, como mostra na discussão de erros, porém o trabalho serve para dar uma razoável idéia quantitativa do efeito da umidade sobre a condutividade térmica dos solos.

SMITH (1939) estudou o comportamento térmico do solo, te-

tando amostras com diversas umidades em recipientes cúbicos. Concluiu que há uma grande movimentação da fase de vapor e que, com tal método, no equilíbrio, não apenas se verifica um gradiente térmico, mas, também, um gradiente de umidade. Encontrou valores de condutividade térmica para vários tipos de solos a diferentes umidades.

Um tratamento matemático para o efeito da umidade na condutividade térmica do solo foi elaborado por GEMANT (1950). Baseou seus cálculos na suposição que as partículas do solo são esféricas. O autor estava consciente das irregularidades de forma e distribuição dos grãos do solo, porém, mesmo assim, optou pela forma esférica das partículas como uma aproximação suficientemente boa. Comparou os dados calculados com dados experimentais obtidos por KERSTEN (1950) e encontrou bons resultados para umidades entre 5 e 25%.

WEBB (1956), utilizando-se da idéia de GEMANT (1959), verificou matematicamente os valores de resistividade térmica e condutividade térmica do solo, e obteve resultados em torno de três vezes maiores ($0,0025 \text{ cal/cm seg } ^\circ\text{C}$) que os valores observados experimentalmente e relacionados em literatura ($0,0008 \text{ cal/cm seg } ^\circ\text{C}$). Concluiu que esta diferença se deve ao fato do seu modelo considerar as partículas do solo como esferas homogêneas.

HIGASHI (1953) mediu a condutividade e difusividade térmicas de amostras de solos com baixos índices de umidade e de solos congelados. As temperaturas nas condições de contorno variavam sinusoidalmente com o tempo por meio de resistências elétricas. Foi proposto um modelo empírico de forma exponencial para representar a condutividade e difusividades térmicas. Comparou-se

a difusividade térmica dos solos congelados e verificou-se que sua variação em relação à direção do fluxo de calor foi pequena. Notou-se que a difusividade térmica atingiu um máximo ao redor de 50% de umidade.

Uma comparação entre duas diferentes soluções para a equação fundamental de fluxo de calor foi feita por HADAS (1967). Uma das soluções consistia em impor uma variação periódica da temperatura para uma das condições de contorno (método da onda senoidal). Já a outra, para várias profundidades do solo (método da onda quadrada e metade da onda quadrada) determinava-se experimentalmente a função temperatura, e utilizando-se a transformada de Laplace, obteve-se os valores da difusividade térmica. O método da onda senoidal, embora experimentalmente mais difícil de se executar, pareceu apresentar-se mais preciso que aquele onde se utilizou a transformada de Laplace, mas uma boa correlação foi encontrada entre ambos os métodos, com diferenças de 10%.

VAN WIJK e BRUIJN (1964) estudaram a aplicação de curvas empíricas como condição de contorno. A utilização da transformada de Laplace incluindo integração numérica, admite erro, que foi amplamente discutido. Determinou-se as constantes térmicas de solos homogêneos e de solos compostos por diferentes camadas e solos com cobertura vegetal.

Um modelo matemático, expresso por uma solução numérica, foi apresentado por WIERENGA e DEVIT (1970) para resolver a equação do fluxo de calor transiente que indicava a flutuação da temperatura do solo a partir da variação da temperatura na superfície do solo em condições naturais. O solo foi dividido teoricamente em camadas delgadas, cada qual analisada por unidade de tempo,

obtendo-se um grupo de equações diferenciais lineares interdependentes, que representam a equação geral do fluxo de calor. As temperaturas esperadas foram comparadas com as temperaturas observadas no solo nas diversas profundidades, antes e depois de irrigados com 13,4 cm de altura de lâmina d'água. Um programa foi utilizado para resolver o sistema de equações. Admitiu-se ocorrer mudanças na condutividade térmica com a umidade, profundidade e temperatura do solo. No solo úmido as temperaturas, esperadas e observadas, tiveram uma boa aproximação, enquanto que, para o solo seco, significantes diferenças foram observadas para determinados períodos do dia.

PENNER (1969), utilizando uma sonda térmica e através do método do fluxo de calor transiente, determinou a condutividade térmica de dois tipos de solos gelados. Os dados obtidos foram analisados pela teoria da fonte linear de calor. Verificou um incremento do valor da condutividade térmica quando a temperatura é diminuída, associando a maior condutividade térmica do gelo em relação à água. O método não foi considerado satisfatório para temperaturas entre 0°C e 2°C, em que o gelo e a água coexistem nos espaços dos poros do solo. A condutividade térmica do solo foi determinada a partir dos elementos constituintes do solo, utilizando o método de De Vries.

MOENCH e EVANS (1970) estudaram a interferência da migração da umidade sobre as medidas das constantes térmicas do solo. Usando uma sonda térmica cilíndrica de diâmetro grande, esta interferência foi reduzida. Os dados obtidos foram analisados pela teoria da fonte linear de calor. Concluiu que a difusividade térmica real, praticamente permanece constante acima de 30% de umidade no solo.

Um método que determina a densidade de fluxo de calor no solo e suas propriedades térmicas baseado no fluxo do calor transiente, foi descrito por SCHNEIDER (1969). Um bloco de material apropriado, cujas constantes térmicas são conhecidas, e a partir de uma temperatura inicial determinada, é colocado sobre a superfície do solo, e a temperatura do plano de contato é medida e registrada com o tempo. Este método é derivado da equação fundamental do fluxo de calor para o caso de corpos colocados em contato no tempo zero. Este método pode ser usado para medir o fluxo de calor na superfície do solo, ou se o gradiente de temperatura na camada superficial (se comporta linearmente para baixas unidades no solo).

STEARNS (1969) considerou o solo como um meio semi-infinito, sujeito a temperaturas cíclicas. O fluxo de calor foi tomado em função das condições harmônicas de contorno. A temperatura do solo foi medida a diversas profundidades e em curtos períodos de tempo. O método foi comparado com o modelo teórico de Lettau (1962) com boa aproximação. Obteve valores de difusividade para solos arenosos desde $2,3 \times 10^{-3}$ até $9,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$ para umidade de zero até 40% respectivamente.

No trabalho sobre difusividade térmica do solo areia vermelha de Waltair, India, VISWANADHAM e RAMANADHAM (1969) utilizaram um método analítico sino-exponencial. A difusividade térmica do solo foi determinada pela razão logarítmica das amplitudes à diferentes profundidades. Para as profundidades x_1 e x_2 , temos as amplitudes A_1 e A_2 respectivamente, e o valor esperado para difusividade é dado pela relação:

$$D = \frac{\pi}{P} \left[\frac{(x_2 - x_1)}{\ln(A_1/A_2)} \right]^2 \quad (3.2)$$

Verificou-se, também, a defazagem entre tempos de ocorrência de temperaturas máximas, ou mínimas, para diferentes profundidades, e a difusividade pode ser calculada pela relação:

$$D = \frac{P (x_2 - x_1)^2}{4 \pi L^2} \quad (3.3)$$

Os resultados se mostraram próximos de dados experimentais e dados obtidos em literatura.

Um trabalho experimental em condições de campo é reportado por VISWANADHAM e RAO (1972). O fluxo de calor periódico em uma dimensão em um meio homogêneo, semi-infinito, foi a base teórica usada para interpretar os dados experimentais. A temperatura foi medida em diversas profundidades, e para superfície resultou aproximadamente uma função sinusoidal do tempo. A variação da difusividade térmica do solo com a profundidade foi atribuída principalmente à variação de umidade.

DAL FABBRO (1975), através de métodos analítico, numérico por elementos finitos, verificou os resultados da distribuição radial da amplitude em amostras de solos de paredes cilíndricas concêntricas, para medir a difusividade térmica do solo em condições de equilíbrio dinâmico. A equação geral da condução de calor, expressa em coordenadas cilíndricas, foi solucionada para tempo tendendo ao infinito, mantendo a face interna em condições harmônicas de contorno. A condição da face externa era de temperatura constante. A solução foi desenvolvida através das equações

de Bessel do primeiro tipo, de primeira e segunda ordem. A equação transcendental de Bessel foi calculada numericamente através de um programa BASIC, o qual também fornecia as raízes da equação. Considerando a amostra - um cilindro de parede expessa - como a proximadamente um meio semi-infinito, o autor aplicou a equação geral da condução de calor, expressa em coordenadas cartesianas, mantendo a condição harmônica em uma das faces. Experimentalmente a condição harmônica da face interna do cilindro foi obtida através de uma onda quadrada gerada por um mecanismo eletromecânico, o qual alternava a passagem de água a diferentes temperaturas. Ambas as soluções analíticas geraram variação de amplitude com o raio. Tais resultados foram comparados com a solução obtida por um modelo de elementos finitos e com os resultados experimentais.

JACKSON (1957) investigou a influência da umidade na determinação da difusividade térmica de solos úmidos, utilizando o método de equilíbrio dinâmico. As amostras eram consideradas como um meio semi-infinito, com condições de contorno harmônicas, e a equação da difusão de calor era analisada depois que a condição de equilíbrio dinâmico fosse alcançada. A variação periódica da temperatura era imposta como condição de contorno em uma das faces da amostra, enquanto que a face oposta era mantida a uma temperatura constante, correspondente ao valor médio entre os valores da variação mínima e máxima periódica. Plotando a difusividade térmica em oposição ao período zero, obteve-se os valores de difusividade do solo úmido.

Em seu método JACKSON e KIRKHAM (1958) promovem a alternância da fonte de calor, que é usada para que a transferência de umidade ocorra em direções alternadas, reduzindo, assim, os efeiutos

tos da movimentação da umidade na determinação da difusividade térmica do solo. Um gráfico dos valores da difusividade térmica aparente versus período da onda de calor, resulta uma curva que, extrapolada para o período zero, fornecerá o valor da difusividade real, correspondente ao gradiente zero de temperatura. Este método tem sido usado para determinação da difusividade real de amostras de solos tanto arenosos como argilosos, de diferentes tensões e umidades, com bons resultados.

De VRIES (1950), mencionado por JACKSON (1957), WIERENGA, P.J. e De VIT (1970) e DAL FABBRO (1975), apresenta um tratamento teórico para resolver o problema da convecção na determinação da difusividade térmica. A composição do solo foi considerada para se determinar sua difusividade térmica. Em outras palavras, a difusividade térmica de cada componente foi considerada em separado, especificando-se a disposição e tamanho das partículas. Foi encontrado por De VRIES que a relação entre a pseudo-condutividade e a condutividade real varia de 0,015 a 1,0.

LETTAU (1954), mencionado por JACKSON (1957), DAL FABBRO (1975) e STEARNS (1969), utilizando análise de Fourier, derivou um modelo de difusão de calor, o qual visa computar o efeito profundiade do solo. Em outras palavras, o modelo leva em consideração a variação das propriedades térmicas das várias camadas do perfil do solo.

CHOWDARY e BHANDARY (1968) propuseram um modelo considerando o solo como composto por duas fases, as quais exibem diferentes propriedades térmicas. A possibilidade de os componentes se encontrarem dispostos em paralelo ou em série com a direção do fluxo de calor foi considerada. Os resultados foram comparados

com os do SMITH (1942), plotando condutividade térmica versus po
rosidade. Camadas consolidadas e não consolidadas se comportam de
maneira diferente no que concerne à disposição das partículas.

No trabalho de SCHNEIDER et alli (1980) determinou - se as propriedades térmicas de um solo da unidade de mapeamento São Pedro, no município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul , Brasil. A difusividade térmica foi obtida através das equações de defasagem e amplitude da onda diária de temperatura. Determinou -se os valores médios da condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico médio por unidade de volume do solo com teor médio de 22% em peso e obteve -se excelente concordância entre os valore medidos e os calculados pelo método proposto.

Um estudo do comportamento da temperatura e densidade de fluxo de calor no perfil do solo, em condições de campo,foi relatado por DEDICO (1974). As propriedades térmicas do solo foram obtidas através das equações de defasagem e amplitudes de onda de temperatura. Apresenta, também, algumas informações sobre a influência de coberturas no perfil térmico do solo, tais como o polietileno, serragens de madeira e matéria seca.

Em resumo, segundo as literaturas citadas, a migração de umidade tem sido, geralmente - excessão feita ao trabalho de JACK SON (1957) - assumida desprezível no que tange à determinação dos coeficientes de difusividade térmica e condutividade térmica, usando os mais variados métodos, quais sejam: o fluxo de calor transiente, método de equilíbrio dinâmico, fluxo de calor periódico e outros modelos matemáticos. O solo é um meio poroso, formado por partículas não-homegêneas quanto ao tipo e forma, por onde circu-

lam fluídos que, também, transportam calor. A aplicação destes mé
todos matemáticos de condução de calor em sólidos deve ser feita
com algumas restrições, uma vez que as discrepâncias entre valo
res teóricos e valore medidos se devem às considerações imprópri
as, ainda que conscientes dos erros que implicam.

CAPÍTULO IV

TEORIA

Este capítulo contém os modelos teóricos propostos para previsão do perfil de temperatura do solo. Por se tratar de modelos matemáticos de condução de calor, o presente trabalho considera o solo como um meio isotrópico, contínuo, semi-infinito, sob condições harmônicas de contorno e perdas convectivas desprezíveis.

IV.1. MODELO ANALÍTICO

O valor do fluxo de calor numa camada de solo é calculado a partir da equação geral da condução de calor em sólidos (CHAPMAN, 1960):

$$Q = -D \cdot \rho \cdot s \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1.1)$$

É importante lembrar que as constantes térmicas são muito importantes no processo de troca de calor nas camadas de solo. A determinação das constantes térmicas, quais sejam condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, se torna extremamente difícil.

A equação de Fourier de condução de calor em uma dimensão (vide Fig. IV.1.1) é dada por:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \cdot s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1.2)$$

Ao assumir que K, ρ e s são constantes - na realidade a variação é tão pequena que ao se assumir esta premissa, não se incorre em grave erro - e sendo a difusividade uma função da condu-

tividade térmica dada pela relação

$$D = \frac{K}{\rho \cdot s} \quad (4.1.3)$$

a equação de condução de calor se torna simplificada:

$$D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1.4)$$

Como condição de contorno, na superfície do solo, onde $x = 0$, propõe-se uma variação sinusoidal da temperatura para um período - no caso um dia - e a oscilação irá ocorrer entre um valor máximo e um mínimo, T_{\max} e T_{\min} , respectivamente. Definindo a temperatura média na superfície por T_M , tem-se que:

$$T_M = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (4.1.5)$$

a variação da temperatura do solo para um período pode ser esperada segundo o gráfico da Fig. IV.1.2.

Definindo uma nova variável temperatura, θ , como sendo:

$$\theta = T - T_M \quad (4.1.6)$$

a condição de contorno para a superfície do solo pode ser expressa por:

$$\theta_{x=0} = \theta_0 \sin(2\pi \cdot F \cdot t) \quad (4.1.7)$$

para θ_0 = amplitude da temperatura na superfície do solo

$$\theta_0 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (4.1.8)$$

Rearranjando-se a equação de condução de calor (4.1.4)

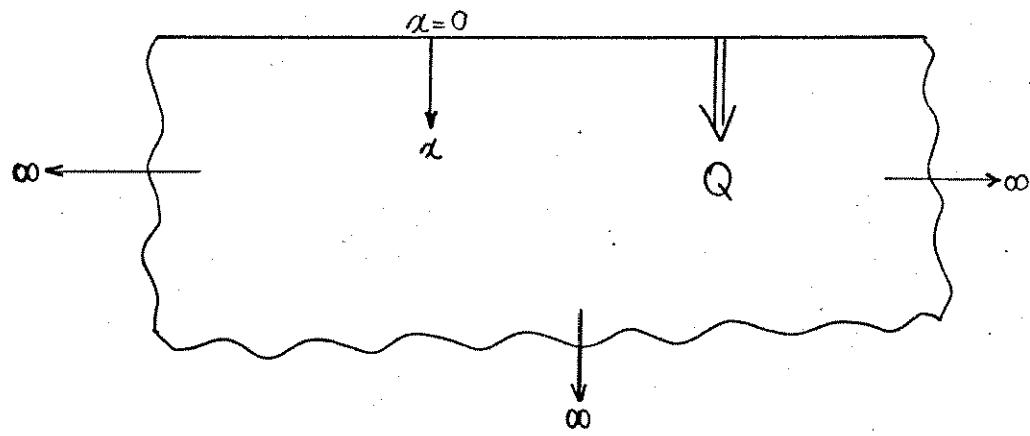


Fig. IV.1.1 – Condução de calor em uma dimensão.

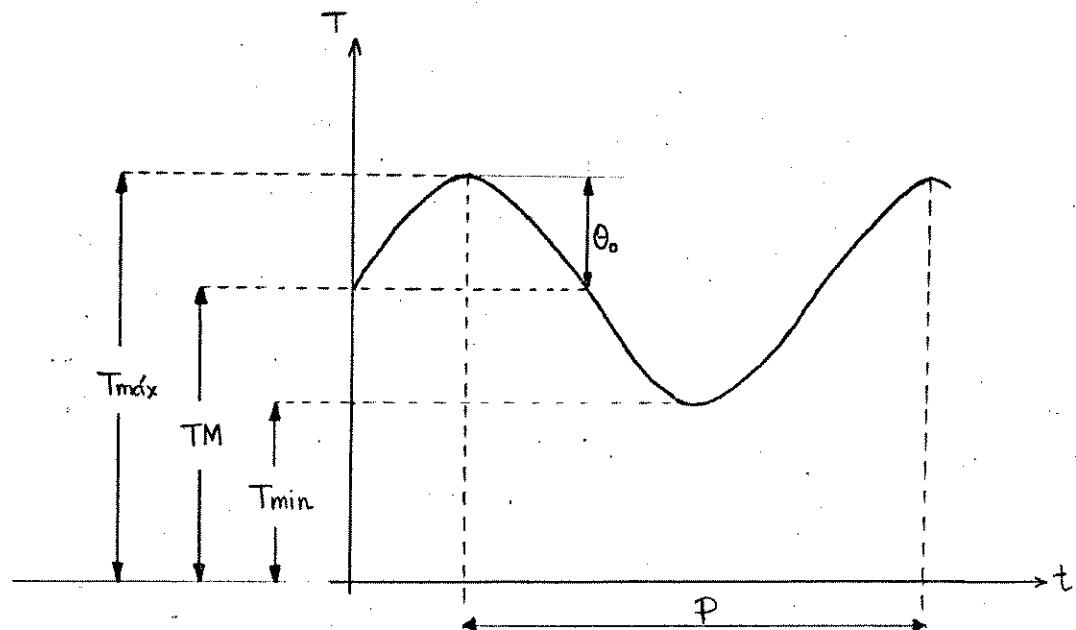


Fig. IV.1.2 – Variação sinusoidal da temperatura na superfície do solo para um período.

em termos da nova variável temperatura θ e assumindo TM constante, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4.1.9)$$

Representando a solução desta equação como produto de duas diferentes funções (cada qual com uma única variável independente) tal como:

$$\theta = T(t) \cdot X(x) \quad (4.1.10)$$

substituindo-se na equação de condução de calor (4.1.9)

$$\frac{X dT}{dt} = D \cdot T \cdot \frac{d^2 X}{dx^2} \quad (4.1.11)$$

e agora rearranjando, tem-se que:

$$\frac{1}{D \cdot T} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = \pm i \beta^2 \quad (4.1.12)$$

Os dois resultados desta equação diferencial ordinária são:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \pm i \beta^2 D T \quad (4.1.13a)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = \pm i \beta^2 X \quad (4.1.13b)$$

Segundo Chapman (1960), a solução para θ é:

$$\begin{aligned} \theta &= J \cdot e^{-\beta x / \sqrt{2}} \left[B \cdot e^{i(\beta^2 \cdot D \cdot t - \beta x / \sqrt{2})} \right] + \\ &\quad J' \cdot e^{-\beta x / \sqrt{2}} \left[B' \cdot e^{-i(\beta^2 \cdot D \cdot t - \beta x / \sqrt{2})} \right] \end{aligned} \quad (4.1.14)$$

da identidade $e^{\pm i\beta} = \cos \beta \pm i \sin \beta$, a solução da equação (4.1.14)

$$\theta = e^{-\beta x/\sqrt{2}} \left[G \cos(\beta^2 \cdot D \cdot t - \beta x/\sqrt{2}) + H \sin(\beta^2 \cdot D \cdot t - \beta x/\sqrt{2}) \right] \quad (4.1.15)$$

Voltando à condição de contorno, para $x = 0$ (equação (4.1.7))

$$\theta_{x=0} = \theta_0 \sin(2\pi \cdot F \cdot t)$$

$$\theta_0 \sin(2\pi \cdot F \cdot t) = G \cos(\beta^2 \cdot D \cdot t) + H \sin(\beta^2 \cdot D \cdot t) \quad (4.1.16)$$

onde se conclui que:

$$G = 0$$

$$H = \theta_0$$

$$\beta^2 = \frac{2\pi \cdot F}{D}$$

A solução para variação da temperatura com o tempo será:

$$\theta = \theta_0 e^{-x\sqrt{(\pi \cdot F)/D}} \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t - x\sqrt{(\pi \cdot F)/D}) \quad (4.1.17)$$

Analizando-se para uma dada distância da superfície, nota-se que a variação da temperatura é periódica, com o mesmo período da superfície, e que a amplitude decresce exponencialmente com a profundidade.

A amplitude A para uma distância x da superfície é:

$$Ax = \theta_0 e^{-x\sqrt{(\pi \cdot F)/D}} \quad (4.1.18)$$

Sendo:

$$\omega = 2\pi \cdot F \quad (4.1.19a)$$

$$e \quad a^2 = \frac{\pi \cdot F}{D} \quad (4.1.19b)$$

A equação (4.1.17) fica então simplificada:

$$\theta(x,t) = \theta_0 \cdot e^{-ax} \cdot \sin(\omega t - ax) \quad (4.1.20)$$

Das equações (4.1.6) e (4.1.20) chega-se à equação que fornece o perfil de temperatura do solo, para profundidades x e tempo t :

$$T = \theta_0 e^{-ax} \cdot \sin(\omega t - ax) + TM \quad (4.1.21)$$

Das equações (4.1.19a), (4.1.19b) e (4.1.20), pode -
-se determinar o valor da difusividade térmica. Definindo a defaz
gem, ou "time lag", como o tempo de ocorrência de temperatura má
xima ou mínima entre profundidades correspondentes, pode-se esti
mar o valor de D (vide Fig. IV.1.3).

Como a temperatura θ , para uma profundidade x , atinge um valor máximo ou mínimo quando $d\theta/dt = 0$

$$\dot{\theta} = -\theta_0 e^{-ax} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - ax) = 0 \quad (4.1.22)$$

portanto, $\dot{\theta} = 0$ somente para

$$\cos(\omega t - ax) = 0 \quad (4.1.23)$$

$$\omega t - ax = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad (4.1.24)$$

somente o tempo de ocorrência de máxima ou mínima temperatura será:

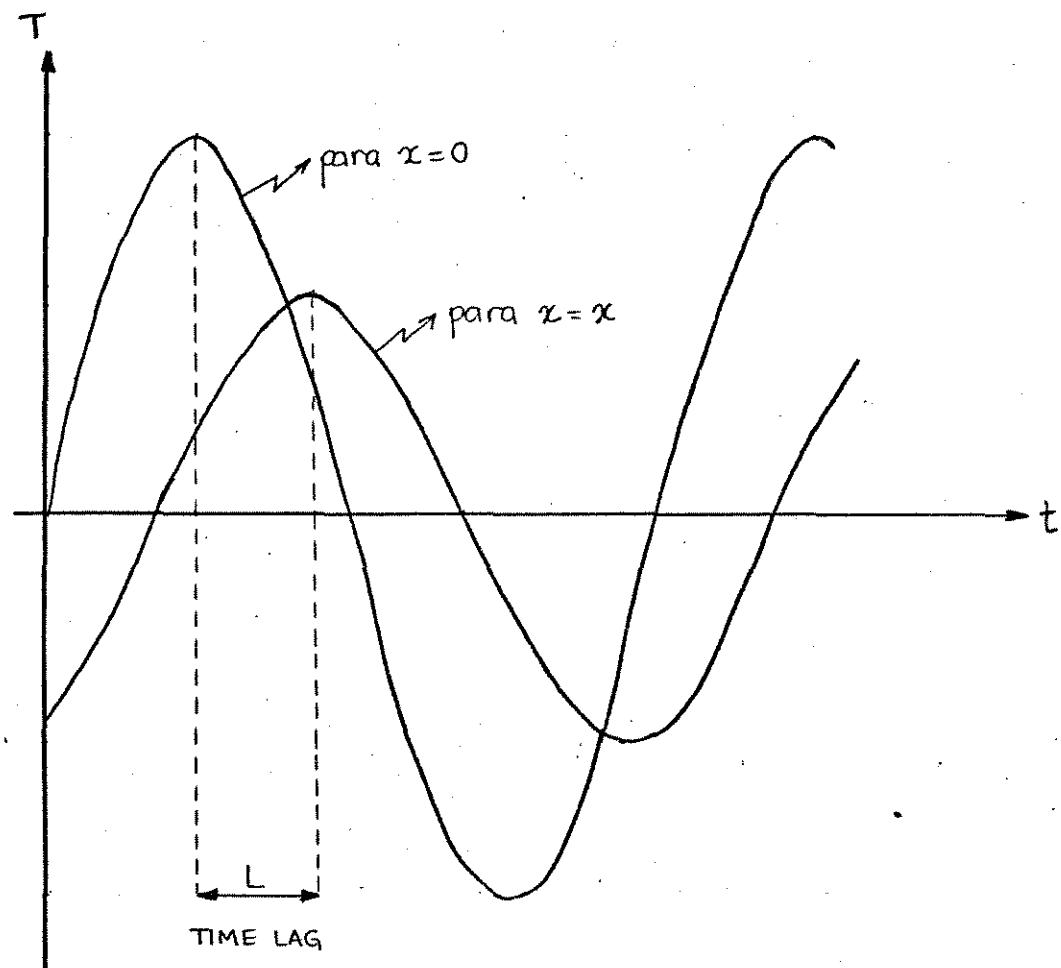


Fig. IV.1.3 - "Time lag" ou tempo de defasagem entre ocorrência de temperaturas máximas para diferentes profundidades.

$$t = \frac{1}{\omega} \left[ax + (2n+1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (4.1.25a)$$

A defazagem, ou "time lag", entre tempos de ocorrência de temperatura máxima ou mínima para os pontos x_1 e x_2 podem ser representados como:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \left[ax_1 + (2n+1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (4.1.25b)$$

$$\text{e} \quad t_2 = \frac{1}{\omega} \left[ax_2 + (2n+1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (4.1.25c)$$

Como o "time lag" é a diferença entre estes tempos de ocorrência:

$$L = t_2 - t_1 = \frac{1}{\omega} [a (x_2 - x_1)] \quad (4.1.26a)$$

$$L = (x_2 - x_1) \sqrt{\frac{\pi \cdot F}{D}} \cdot \frac{1}{2\pi F} \quad (4.1.26b)$$

$$L = (x_2 - x_1) \sqrt{\frac{1}{4D \cdot \pi \cdot F}} \quad (4.1.26c)$$

Através da diferença de tempo de ocorrência de temperatura máxima ou mínima entre dois pontos, a difusividade térmica pode ser calculada pela relação:

$$D = \frac{(x_2 - x_1)^2}{4\pi \cdot F \cdot L^2} \quad (4.1.27)$$

Um outro modo de se determinar difusividade térmica do solo, é pela razão das amplitudes à diferentes profundidades. Da equação (4.1.18) temos a amplitude para uma distância x . Sendo A_1 e A_2 as amplitudes para as profundidades x_1 e x_2 respectivamente:

$$A_1 = \theta_0 e^{-ax_1} \quad (4.1.28a)$$

$$e \quad A_2 = \theta_0 e^{-ax_2} \quad (4.1.28b)$$

Dividindo a equação (4.1.28a) pela equação (4.1.28b), obtém-se:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{e^{-ax_1}}{e^{-ax_2}} \quad (4.1.29a)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{ax_2} \cdot e^{-ax_1} \quad (4.1.29b)$$

$$\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = a(x_2 - x_1) \quad (4.1.29c)$$

$$\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \sqrt{\frac{\pi \cdot F}{D}} (x_2 - x_1) \quad (4.1.29d)$$

Daí, a difusividade térmica pode ser expressa como:

$$D = \pi \cdot F \cdot \left[\frac{(x_2 - x_1)}{\ln(A_1/A_2)} \right]^2 \quad (4.1.30)$$

IV.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Segundo SEGERLIND (1975), quaisquer quantidades contínuas, como temperatura, pressão, deslocamento, podem ser approximadas num modelo discreto, composto de um grupo de funções contínuas

convenientes, definidas num número finito de subdomínios. Este mo
delo é o que se denomina de Elementos Finitos, e neste trabalho
parte-se do elemento simplex unidimensional, já que o problema em
questão trata da transferência de calor numa única direção.

O elemento simplex unidimensional é um segmento de li
nha de comprimento L e dois nós, um em cada extremidade. Estes nós
são denominados por i e j, e os valores dos nós por Φ_i e Φ_j . A o
rigem do sistema pode ser fora do elemento, e a função polinomial
para uma quantidade escalar, ϕ é (vide Fig. IV.2.1).

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad (4.2.1)$$

Os coeficientes α_1 e α_2 podem ser determinados pelas co
dições dos nós:

$$\phi = \Phi_i \quad \text{para} \quad x = x_i$$

$$\phi = \Phi_j \quad \text{para} \quad x = x_j$$

Estas condições resultam num par de equações:

$$\Phi_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i \quad (4.2.2a)$$

$$\Phi_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j \quad (4.2.2b)$$

as quais podem ser resolvidas por:

$$\alpha_1 = \frac{\Phi_i x_j - \Phi_j x_i}{L} \quad (4.2.3a)$$

$$\alpha_2 = \frac{\Phi_j - \Phi_i}{L} \quad (4.2.3b)$$

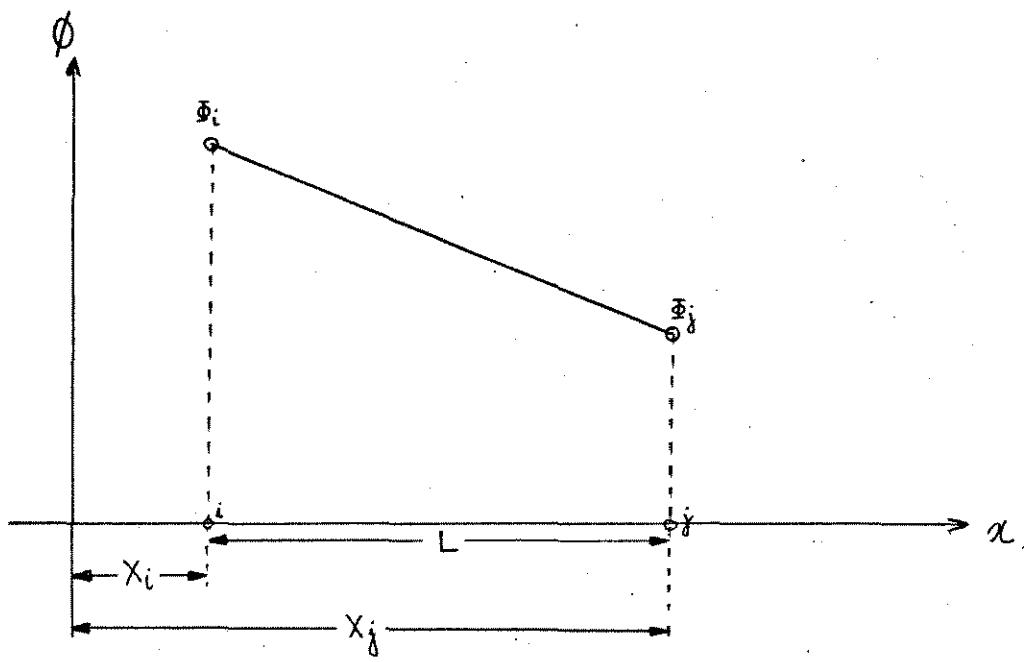


Fig. IV.2.1 - Elemento simplex unidimensional.

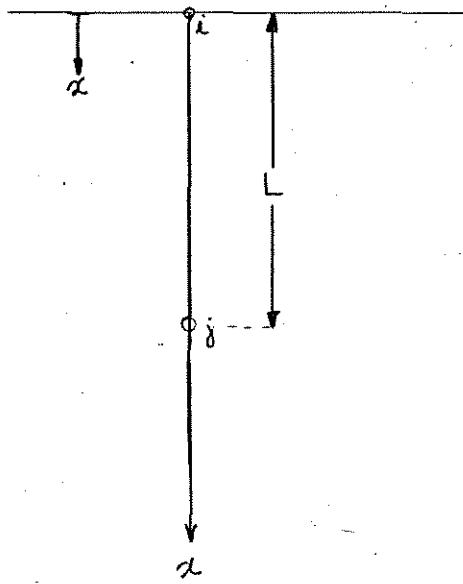


Fig. IV.2.2 - Origem do sistema.

Substituindo os valores de α_1 e α_2 em (4.2.1), obtém-se:

$$\phi = \left(\frac{\Phi_i x_j - \Phi_j x_i}{L} \right) + \left(\frac{\Phi_j - \Phi_i}{L} \right) x \quad (4.2.4)$$

que pode ser rearranjada em

$$\phi = \left(\frac{x_j - x}{L} \right) \Phi_i + \left(\frac{x - x_i}{L} \right) \Phi_j \quad (4.2.5)$$

As funções lineares em x em (4.2.5) são chamados funções forma.

Cada função forma - N_β - deve estar subscrita ao nó ao qual está associada. As funções forma em (4.2.5) são:

$$N_i = \frac{x_j - x}{L} \quad (4.2.6a)$$

$$e \quad N_j = \frac{x - x_i}{L} \quad (4.2.6b)$$

Assim sendo, a equação (4.2.5) pode ser escrita na forma matricial:

$$\phi = N_i \Phi_i + N_j \Phi_j = [N] \{ \Phi \} \quad (4.2.7)$$

$$[N] = [N_i \ N_j] \quad e \quad \{ \Phi \} = \begin{Bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \end{Bmatrix}$$

A determinação do sistema de equações para os valores nos nós envolve a integração das funções forma e suas derivadas sobre o elemento. Esta integração é mais facilmente calculada quando as funções forma são escritas em termos do sistema de coordenadas locais.

A transformação é

$$x = x_i + s \quad (4.2.8)$$

que, substituída nas equações das funções forma (4.2.6a) e (4.2.6b), resulta:

$$N_i = \frac{x_j - (x_i + s)}{L} = \frac{L-s}{L} = 1 - \frac{s}{L} \quad (4.2.9a)$$

$$N_j = \frac{x_i + s - x_i}{L} = \frac{s}{L} \quad (4.2.9b)$$

A equação (4.2.5) passa a ser:

$$\phi = \left(1 - \frac{s}{L}\right) \phi_i + \left(\frac{s}{L}\right) \phi_j \quad (4.2.10)$$

Uma vez que se trata de um problema de transferência de calor, ou seja, $\phi = T$, $\phi_i = T_i$ e $\phi_j = T_j$, a interpolação polinomial para um elemento linear unidimensional é

$$T = N_i T_i + N_j T_j \quad (4.2.11a)$$

onde $N_i = \left(1 - \frac{x}{L}\right)$ e $N_j = \left(\frac{x}{L}\right)$

As funções forma são definidas em relação ao sistema de coordenadas locais, onde o elemento tem comprimento L.

e a matriz

$$[N] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{x}{L}\right) & \left(\frac{x}{L}\right) \end{bmatrix} \quad (4.2.11b)$$

A equação diferencial parcial para condução transiente de calor nos sólidos é:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \lambda \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2.12)$$

No caso unidimensional, as direções y e z não existem e a equação diferencial parcial para condução transiente de calor nos sólidos se torna

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q = -\frac{\lambda \partial T}{\partial t} \quad (4.2.13)$$

Neste trabalho, especificamente, para um período completo $Q = 0$, a equação (4.2.13) é simplificada para:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{\lambda \partial T}{\partial t} \quad (4.2.14)$$

A formulação funcional, através do cálculo variacional da equação (4.2.14) é

$$x = \int_V \frac{1}{2} \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \right] dv + \int_V T \lambda \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (4.2.15a)$$

$$x = x_1 + x_2 \quad (4.2.15b)$$

$$x_1 = \int_V \frac{1}{2} K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 dv \quad (4.2.15c)$$

$$x_2 = \int_V T \lambda \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (4.2.15d)$$

A matriz $[N^{(e)}]$, que se refere a um elemento genérico, consiste numa função-forma e pode ser determinada pela equação

$$T^{(e)} = [N^{(e)}] \{ T \} \quad (4.2.16)$$

É conveniente definir duas matrizes para se iniciar o processo de minimização:

$$\{ g \} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.2.17a)$$

$$e \quad [D] = [K_{xx}] \quad (4.2.17b)$$

A partir de (4.2.17a), chega-se a seguinte relação:

$$\{ g^{(e)} \} = \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right\} = \left[\frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2^{(e)}}{\partial x} \quad \dots \quad \frac{\partial N_p^{(e)}}{\partial x} \right] \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_p \end{Bmatrix} \quad (4.2.18)$$

Assim, por diferenciação de $[N^{(e)}]$ pode-se definir uma nova matriz $[B^{(e)}]$

$$[B^{(e)}] = \left[\frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2^{(e)}}{\partial x} \quad \dots \quad \frac{\partial N_p^{(e)}}{\partial x} \right] \quad (4.2.19)$$

que simplifica a equação (4.2.18), obtendo-se a seguinte relação:

$$\{g^{(e)}\} = [B^{(e)}] \{T\} \quad (4.2.20)$$

Da equação (4.2.11b) e desenvolvendo (4.2.17a)

$$[N] = \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) \left(\frac{x}{L} \right) \right]$$

$$\{g\} = \frac{dT}{dx} = - \frac{1}{L} T_i + \frac{1}{L} T_j = \left[- \frac{1}{L} \frac{1}{L} \right] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \quad (4.2.21)$$

e o valor de $[B]$ é calculado como:

$$[B] = \left[- \frac{1}{L} \quad \frac{1}{L} \right] \quad (4.2.22)$$

A equação (4.2.15c) pode ser rearranjada

$$x_i = \int_V \frac{1}{2} \{g\}^T [D] \{g\} dV \quad (4.2.23)$$

$$x_i^{(e)} = \int_V \frac{1}{2} \{T\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{T\} dV \quad (4.2.24)$$

Esta integral pode ser condensada, e pelo elemento de contribuição tem-se que

$$\frac{\partial x_1^{(e)}}{\partial T} = [K^{(e)}] \{T\} \quad (4.2.25)$$

Define-se a matriz condutância $[K]$ como sendo

$$[K^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dv \quad (4.2.26)$$

Já a equação (4.2.16) diferenciada em relação ao tempo:

$$\frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} = [N^{(e)}] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} \quad (4.2.27)$$

permite rearranjar a equação (4.2.15d) em

$$x_2 = \int_V \{T\} \cdot \lambda \cdot [N^{(e)}] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} dv \quad (4.2.28a)$$

$$x_2 = \int_V \lambda \cdot [N^{(e)}]^T \{T\} [N^{(e)}] dv \frac{\partial \{T\}}{\partial t} \quad (4.2.28b)$$

Esta integral também pode ser condensada, e pelo elemento de contribuição tem-se:

$$\frac{\partial x_2^{(e)}}{\partial T} = [C^{(e)}] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} \quad (4.2.29)$$

Pode-se, assim, definir a matriz capacitância [C]:

$$[C^{(e)}] = \int_V \lambda [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dv \quad (4.2.30)$$

A partir da equação (4.2.11b):

$$[N] = \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) \quad \left(\frac{x}{L} \right) \right]$$

e considerando $dv = Adx$, para A = área da secção transversal,

$$[C^{(e)}] = \lambda \cdot A \cdot \int_0^L \left[\frac{(1-x/L)}{(x/L)} \right] \left[\left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{(x/L)}{2} \right] dx \quad (4.2.31)$$

$$[C^{(e)}] = \frac{\lambda \cdot A \cdot L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.2.32)$$

Quando os resultados são combinados, completa-se a minimização do processo, resultando a seguinte equação global:

$$[C] \frac{\partial T}{\partial t} + [K] \{T\} = 0 \quad (4.2.33)$$

A solução no domínio do tempo pode ser representada a través da técnica de diferença finita:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t} \quad (4.2.34)$$

ou

$$\frac{d\{T\}}{dt} = \{\dot{T}\} = \frac{1}{\Delta t} (\{T_1\} - \{T_0\}) \quad (4.2.35)$$

Desde que $\{\dot{T}\}$ seja avaliado para o ponto médio do intervalo

$$\{\bar{T}\} = \frac{1}{2} (\{T_1\} + \{T_0\}) \quad (4.2.36)$$

substituindo em (4.2.33)

$$\frac{1}{\Delta t} [C] \{T_1\} - \frac{1}{t} [C] \{T_0\} + \frac{1}{2} [K] \{T_1\} +$$

$$\frac{1}{2} [K] \{T_0\} = 0 \quad (4.2.37a)$$

que pode ser rearranjada para:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{ T_1 \} = \left(\frac{2}{\Delta t} [C] - [K] \right) \{ T_0 \} \quad (4.2.37b)$$

Esta última equação pode ser resolvida para fornecer os valores nos nós para o tempo $t + \Delta t$ dado o valor no nó para o tempo t . Esta solução implica que o valor no nó inicial é conhecido. Desde que a equação (4.2.35) foi desenvolvida para o ponto médio, pode-se calcular o valor da temperatura para este ponto, e os valores nos nós podem ser calculados por substituição dos resultados obtidos anteriormente; a solução, pois, resulta numa equação

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{ \bar{T} \} = - \frac{2}{\Delta t} [C] \{ T_0 \} \quad (4.2.38a)$$

ou simplificando

$$\{ T_{N+1} \} : [A] = [P] \{ T_N \} \quad (4.2.38b)$$

$$\{ T_{N+1} \} = [A]^{-1} [P] \{ T_N \} \quad (4.2.38c)$$

onde $[A]$ e $[P]$ são combinações de $[K]$ e $[C]$.

$$[A] = [K] + (2/\Delta t) [C] \quad (4.2.39)$$

$$\text{e} \quad [P] = [2/\Delta t] [C] \quad (4.2.40)$$

e Δt é o "time step" ou incremento de tempo.

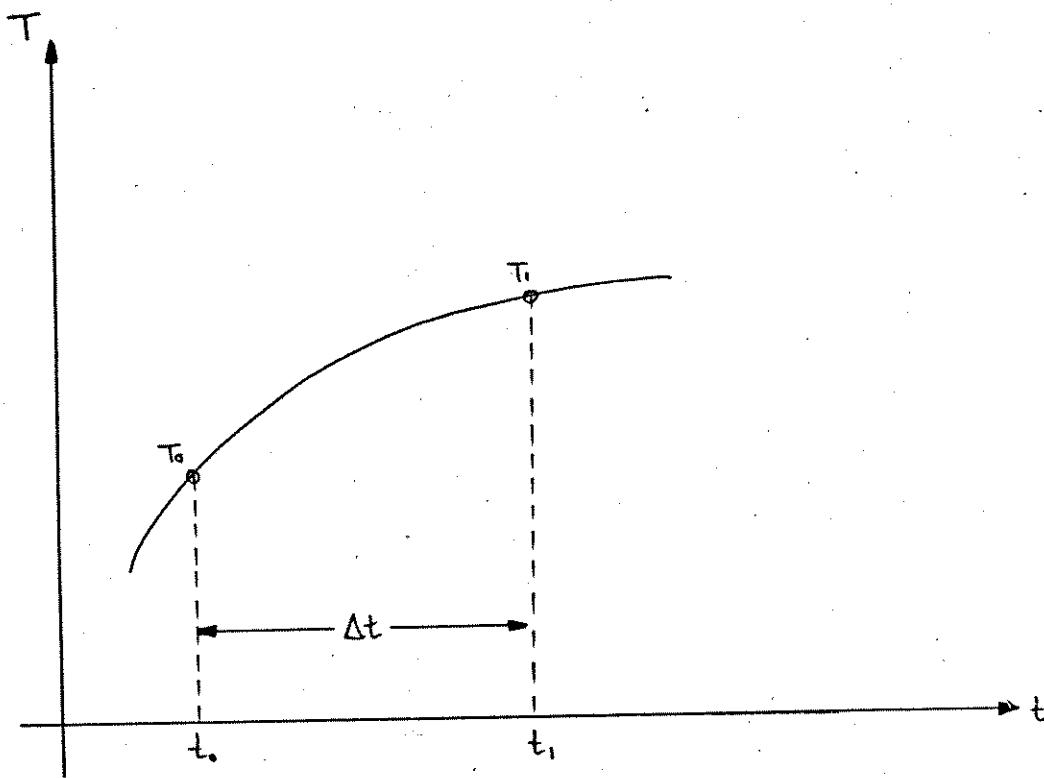


Fig. IV.2.3 - "Time step" ou incremento de tempo.

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo contém os materiais empregados, o procedimento e as metodologias experimental e teórica utilizadas. Inclui-se o esboço da comparação dos dados teóricos e experimentais.

Baseando-se em dados experimentais de autores, tais como WIERENGA e De WIT (1970), VAN WIJK e BRUIJN (1964), VISWANADHAM e RAO (1972), VISWANADHAM e RAMANADHAM (1969) e DAL FABBRO (1975), verificou-se que seria suficiente medir a temperatura do solo a uma profundidade máxima entre 40 e 50 cm, a partir da qual a amplitude da senoidal temperatura versus tempo torna-se desprezível em condições experimentais.

As temperaturas foram tomadas no solo próximo ao Departamento de Engenharia Agrícola da FEAA - UNICAMP, em local e época onde, durante todo o fotoperíodo, não houvesse interferência de sombra. O solo latossol roxo do local, segundo análise do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo, Divisão de Solos, Seção de Pedologia, pode ser considerado representativo da região e, segundo Carslaw, apresenta as seguintes propriedades físico - térmicas:

$$\text{calor específico} \quad S = 0,23 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{difusividade térmica} \quad D = 0,004 \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\text{condutividade térmica} \quad K = 0,0024 \text{ cal/cm seg}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{densidade} \quad \rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$$

produto densidade x

$$\text{calor específico} \quad \lambda = 0,60 \text{ cal/cm}^3^{\circ}\text{C}$$

O aparelho utilizado para medir e registrar as temperaturas foi um registrador elétrico de marca SPEEDOMAX-W da LEEDS & NORTHRUP, de procedência americana.

Operando em 120 V, 40 W, instalado no interior da sala 11 do Departamento de Engenharia Agrícola da FEAA - UNICAMP, uma vez que requer locais cuja temperatura ambiente esteja na faixa de -9°C a 50°C , registrou continuamente, com tempo de resposta de 1 segundo, durante períodos de 24 horas, as temperaturas do perfil do solo, registrando um mesmo ponto, com tempo de defazagem de 2 minutos e 24 segundos, ou seja, para cada ponto de profundidade existiam 600 dados de temperatura em um período de um dia.

A carta registradora é da marca PHILIPS PR 4920/00 de 250 mm de largura e 27,4 m de comprimento, e foi utilizada em velocidade de 30 polegadas por hora, na escala 7 do registrador.

Os termopares utilizados foram do tipo T de cobre (+) - constantan (-), com isoladores duplos, cuja faixa de trabalhabilidade vai de -190°C a 400°C (potência termoelétrica = $5,21 \text{ mV}/100^{\circ}\text{C}$), perfeitamente adequados para o experimento.

O registrador possui 24 canais de operação, isto é, pode registrar até 24 pontos simultaneamente. No experimento foram utilizados 11 canais. Dois deles registraram a temperatura ambiente da sala, apenas como segurança quanto à trabalhabilidade do aparelho, e os outros nove canais correspondiam aos pontos de profundidade do solo, respectivamente: 0, 2, 5, 8, 12, 20, 30, 40 e 60 cm.

No local do experimento, o solo foi escavado até a profundidade de 70 cm, e os termopares colocados nas respectivas profundidades, introduzidos no solo 15 cm a partir do perfil escavado para não alterar a disposição natural das camadas. Uma vez instalados os termopares, a porção de solo retirada foi recolocada. A superfície do solo foi deixada nua, e do local dos pontos tomados até o aparelho, os termopares foram protegidos por conduites de plástico.

A Fig. V.1 ilustra, de modo esquematizado, a disposição dos termopares.

A Fig. V.2 ilustra esquematicamente a disposição dos termopares no aparelho.

Nos cálculos, o ponto correspondente à profundidade zero, ou seja, na superfície, não foi levado em consideração, uma vez que sofre influências várias, as quais escapam a um controle rigoroso, como bruscas alterações de temperatura em curto espaço de tempo, devido nuvens que evitam a radiação solar direta, ventos, variações rápidas de umidade e trocas gasosas.

Para efeito de cálculo, portanto, o ponto superficial foi considerado 2 cm, e o perfil do solo assistido, portanto, por um total de 8 pontos.

Os dados experimentais obtidos estão tabulados no Apêndice B, os quais correspondem a:

- Período de 17:00 Horas do dia 15/08/83 às 17:00 Horas do dia 16/08/83.

APARELHO →

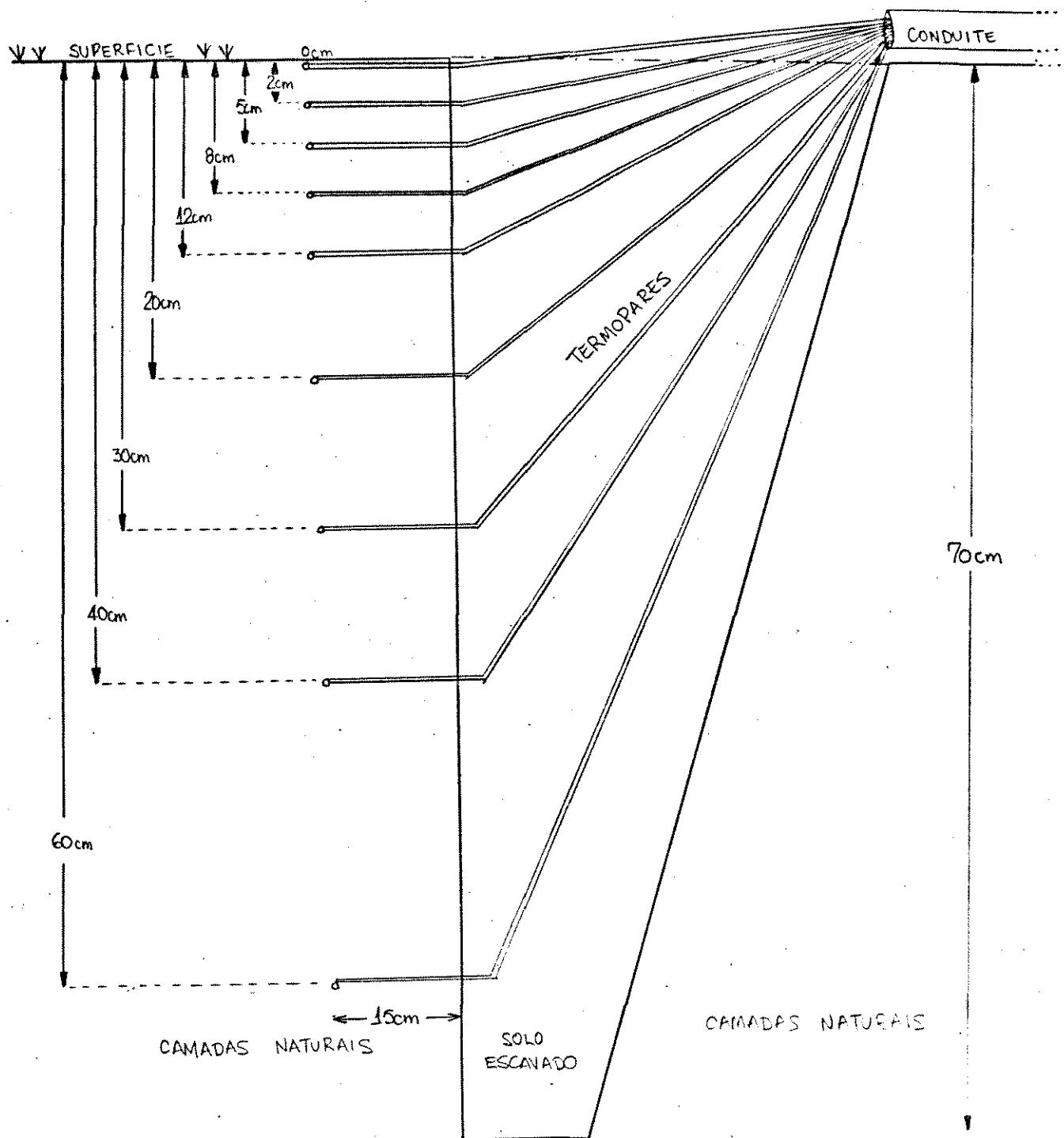


Fig. V.1 - Posição dos termopares no solo.

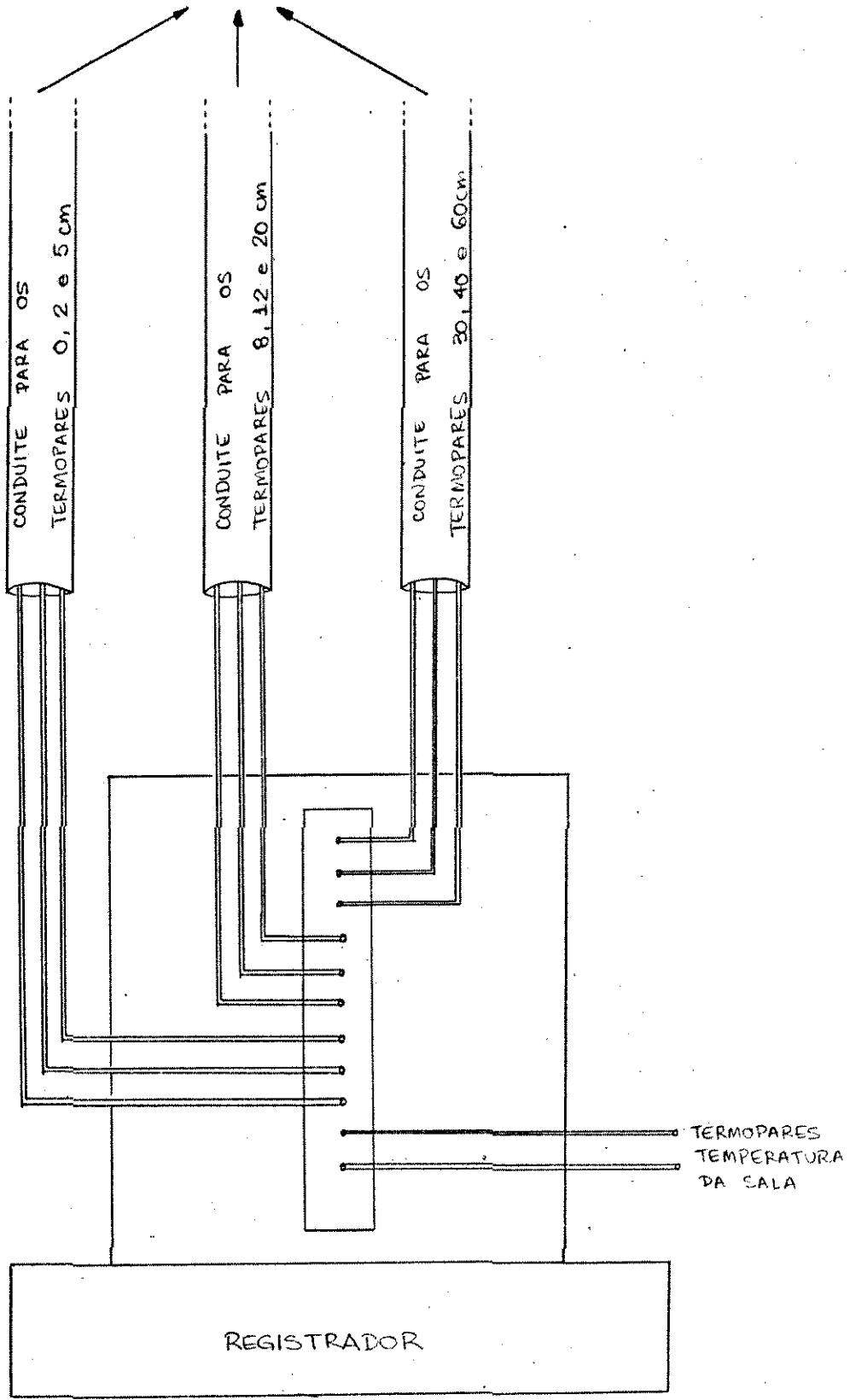


Fig. V.2 - Ligação dos termopares no
aparelho registrador.

- Período de 12:00 Horas do dia 18/08/83 às 12:00 Horas do dia 19/08/83.
- Período de 9:00 Horas do dia 29/08/83 às 9:00 Horas do dia 30/08/83.
- Período de 16:00 Horas do dia 30/08/83 às 16:00 Horas do dia 31/08/83.

Os dados obtidos foram comparados com o previsto pelo mé todo analítico, explicado no Capítulo IV e tabulados no Apêndice B. Do mesmo modo, os dados experimentais foram comparados com os resultados previstos pelo método de elementos finitos, também ex planado no Capítulo IV e tabulados no Apêndice B.

As soluções do método analítico, através da equação (4. 1.21), e a do método de elementos finitos, pela equação (4.2.38c), foram tabuladas por meio de programas BASIC de computador, respectivamente mostrados nos Apêndices A.1 e A.2.

Os computadores utilizados foram o TRS-80, Modelo II de 64 Kbytes e o TRS-80, Modelo III de 48 Kbytes do Departamento de Engenharia Agrícola da FEAA - UNICAMP.

Para se verificar se os modelos propostos fornecem valores próximos aos obtidos experimentalmente, analisou-se o comportamento da amplitude térmica em relação à profundidade. Determinou-se também o erro percentual em relação aos dados experimentais através das equações:

$$e = \frac{\text{TEX} - \text{TMA}}{\text{TEX}} \cdot 100\% \quad (5.1.1a)$$

$$e = \frac{TEX - TEF}{TEX} \cdot 100\% \quad (5.1.1b)$$

Feitos os cálculos, pode-se determinar o erro percentual máximo de um período para cada profundidade, verificando o maior valor absoluto de erro percentual obtido. O erro médio pode ser calculado através da equação:

$$\bar{e} = \frac{\sqrt{\sum (e_i)^2}}{24} \quad (5.1.2)$$

Através de um programa BASIC, SE/BAS, encontrado no Apêndice A.3, foi tabulado o erro Standard, que fornece uma faixa de temperatura em torno da qual se espera que oscilem os valores calculados teoricamente em torno dos dados experimentais.

Todos os erros estão tabulados no Apêndice B.

Sendo Y a diferença entre os valores real e teórico e \bar{Y} a média destes valores:

$$Y = TEX - TMA \quad (5.1.3a)$$

$$e = Y = TEX - TEF \quad (5.1.3b)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y(i)}{24} \quad (5.1.4)$$

O erro Standard pode ser calculado pela equação:

$$SE = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y(i) - \bar{Y})^2}{23}} \quad (5.1.5)$$

Foi feita uma análise gráfica para se verificar o comportamento sinusoidal da temperatura em função do tempo, a defa

zagem de tempo de ocorrência de temperaturas máximas para diferentes profundidades, diminuição exponencial da amplitude térmica com respeito ao aumento da profundidade e perfil térmico do solo. Todos os gráficos estão no Apêndice C.

Foi verificado, também, o valor de difusividade térmica teoricamente proposta utilizando-se os métodos analíticos do Capítulo IV sintetizado pelas equações (IV.1.27) e (IV.1.30), aplicados para os valores obtidos experimentalmente.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem por finalidade apresentar, bem como discutir, os resultados obtidos, tanto experimentalmente como por simulação matemática, através dos métodos analítico e numérico.

Na teoria desenvolvida no Capítulo IV deste trabalho, os modelos esperam que a amplitude térmica diminua com a profundidade. No caso do modelo analítico é prevista a diminuição da amplitude de modo exponencial em relação à profundidade, através da equação (IV.1.18).

Segundo os dados obtidos experimentalmente, essa diminuição da amplitude térmica com incremento da profundidade, prevista nos modelos matemáticos, está plenamente satisfeita, como pode ser observado nas Tabelas VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4, apresentadas a seguir.

PROFOUNDIDADE (cm)	AMPLITUDES TÉRMICAS (°C)		
	DADOS EXPERIMENTAIS	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO NUMÉRICO
0	6,0	6,0	6,0
3	4,2	4,5	4,1
6	3,0	3,4	3,0
10	2,3	2,3	2,2
18	1,0	1,1	1,1
28	0,5	0,4	0,4
38	0,0	0,2	0,2
58	0,0	0,0	0,1

Tabela VI.1 - Amplitudes térmicas para o período 15-16 de agosto de 1983

PROFOUNDIDADE (cm)	AMPLITUDES TÉRMICAS (°C)		
	DADOS EXPERIMENTAIS	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO NUMÉRICO
0	6,0	6,0	6,0
3	4,3	4,5	4,1
6	3,4	3,4	3,0
10	2,1	2,3	2,2
18	1,0	1,1	1,1
28	0,5	0,4	0,4
38	0,0	0,2	0,2
58	0,0	0,0	0,1

Tabela VI.2 - Amplitudes térmicas para o período 18-19 de agosto de 1983

PROFOUNDIDADE (cm)	AMPLITUDE TÉRMICA ($^{\circ}$ C)		
	DADOS EXPERIMENTAIS	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO NUMÉRICO
0	8,0	8,0	7,9
3	5,5	6,0	5,4
6	4,8	4,5	4,0
10	3,3	3,1	2,9
18	1,3	1,4	1,4
28	0,8	0,6	0,6
38	0,0	0,2	0,3
58	0,0	0,0	0,2

Tabela VI.3 - Amplitudes térmicas para o período de 29-30 de agosto de 1983

PROFOUNDIDADE (cm)	AMPLITUDE TÉRMICA ($^{\circ}$ C)		
	DADOS EXPERIMENTAIS	MÉTODO ANALÍTICO	MÉTODO NUMÉRICO
0	8,0	8,0	7,9
3	5,8	6,0	5,4
6	5,0	4,5	4,0
10	3,5	3,1	2,9
18	1,3	1,4	1,4
28	0,8	0,6	0,6
38	0,0	0,2	0,3
58	0,0	0,0	0,2

Tabela VI.4 - Amplitudes térmicas para o período 30-31 de agosto de 1983

Segundo a revisão bibliográfica, a amplitude térmica para profundidades superiores a 40 cm deve estar próxima a zero, o que é observado pelos dados experimentais em todos os períodos medidos, e note-se que ambos os modelos matemáticos revelam a mesma previsão.

Os erros percentuais máximo e médio, e o erro standard, descritos no Capítulo V, estão tabulados no Apêndice B, e nas Tabelas VI.5, VI.6, VI.7 e VI.8, a seguir apresentadas, tem-se um resumo dos resultados obtidos.

x (cm)	e_{\max} (%)		\bar{e} (%)		s_e ($^{\circ}\text{C}$)	
	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO
0	10,42	10,00	5,53	5,40	1,5	1,5
3	7,93	7,04	4,64	3,78	1,3	1,0
6	7,64	6,55	3,43	2,87	1,1	0,9
10	4,73	4,81	2,09	1,99	0,7	0,6
18	3,93	4,29	1,61	2,07	0,4	0,4
28	6,04	6,42	4,61	5,27	0,2	0,2
38	6,42	7,17	5,69	6,45	0,1	0,2
58	7,69	9,23	7,69	8,58	-	0,1

Tabela VI.5 - Erro máximo, erro médio e erro standard correspondentes ao período 15.16 de agosto de 1983 para os dois modelos teóricos propostos.

x (cm)	e_{\max} (%)		\bar{e} (%)		S_e (%)	
	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO
0	13,64	13,64	4,48	4,37	1,2	1,3
3	7,08	7,50	3,89	3,22	1,1	0,9
6	4,80	5,31	2,14	2,25	0,6	0,5
10	4,44	4,81	2,03	2,09	0,5	0,5
18	4,00	4,73	2,27	2,84	0,3	0,3
28	5,28	5,66	3,97	4,62	0,2	0,2
38	6,42	7,17	5,69	6,45	0,1	0,2
58	7,69	9,23	7,69	8,56	-	0,1

Tabela VI.6 - Erro máximo, erro médio e erro standard correspondentes ao período 18-19 de agosto de 1983 para os dois modelos teóricos propostos

x (cm)	e_{\max} (%)		\bar{e} (%)		S_e (%)	
	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO
0	12,61	12,61	4,36	4,26	1,4	1,4
3	8,00	6,90	3,60	2,69	1,2	0,9
6	4,49	5,31	2,03	1,68	0,6	0,6
10	5,77	6,54	2,33	2,43	0,6	0,5
18	3,21	3,86	1,55	2,05	0,4	0,4
28	6,54	7,69	4,63	5,53	0,2	0,3
38	6,42	7,55	5,68	6,67	0,2	0,2
58	7,69	9,62	7,69	8,83	-	0,2

Tabela VI.7 - Erro máximo, erro médio e erro standard correspondentes ao período 29-30 de agosto de 1983 para os dois modelos teóricos propostos

x (cm)	e_{\max} (%)		\bar{e} (%)		s_e (%)	
	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO	ANALÍTICO	NUMÉRICO
0	8,78	9,27	4,03	3,92	1,2	1,2
3	8,42	7,02	3,66	2,87	1,1	0,8
6	6,67	7,50	2,27	2,42	0,7	0,7
10	4,81	5,83	2,21	2,47	0,5	0,4
18	4,44	5,19	1,85	2,40	0,4	0,4
28	5,77	6,92	4,88	5,78	0,2	0,2
38	6,42	7,55	5,68	6,67	0,2	0,2
58	7,69	9,62	7,69	8,83	-	0,2

Tabela VI.8 - Erro máximo, erro médio e erro standard correspondentes ao período 30-31 de agosto de 1983 para os dois modelos teóricos propostos

Observa-se que o erro percentual máximo num período oscila aproximadamente entre 4% e 12%. Os maiores índices de erro percentual máximo correspondem à profundidade zero cm, que possui maior amplitude térmica. Isso é explicado pela diferença entre o comportamento real e o teórico esperado.

O que acontece em condições de campo é que a temperatura máxima na superfície ocorre em torno das 15:00 Horas e a mínima diária entre 5:00 e 7:00 Horas. Os modelos teóricos formulados prevêem um comportamento de onda sinusoidal para a temperatura em função do tempo, portanto, as temperaturas máxima e mínima em um período de 24 Horas são esperadas com 12 Horas de diferença, ou seja, quando a máxima ocorre às 15:00 Horas, a mínima é esperada às 3:00 Horas (vide Fig. VI.1).

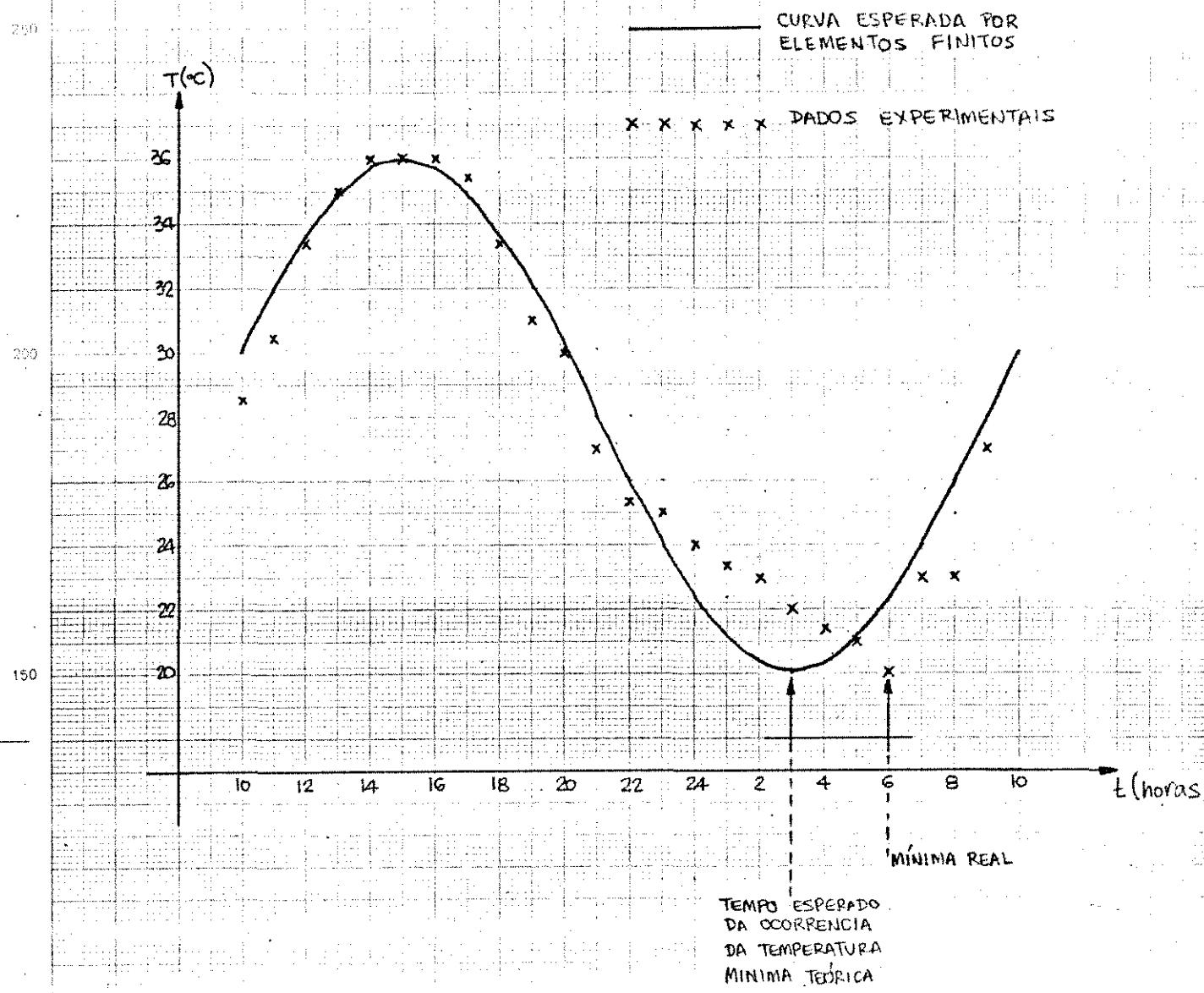


Fig. VI.1 - Diferença entre o comportamento teórico e real sobre ocorrência da temperatura mínima do período 29-30 de agosto de 1983.

O erro máximo dos períodos, que pode ser observado nas tabelas do Apêndice B, corresponde justamente aos horários próximos da ocorrência da temperatura mínima real, fenômeno esse explicado pela diferença existente entre a ocorrência das temperaturas mínimas observada a esperada teoricamente.

Ainda assim, o erro máximo da ordem de 12% traduz 2°C , o qual pode ser considerado plenamente satisfatório face às considerações feitas inicialmente no Capítulo IV.

Quanto ao erro médio, os valores obtidos são satisfatórios, variando de 2 a 5% para profundidades até 30 cm.

Para as profundidades maiores, o erro médio está bem próximo do erro máximo correspondente ao período, ou seja, varia entre 6 e 9%. As amplitudes térmicas são próximas a zero, existindo uma diferença de $1,5^{\circ}\text{C}$ a $2,0^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas esperada e obtida experimentalmente (vide Fig. VI.2). Isso pode ser explicado pela diferença entre o modelo proposto e as condições naturais de campo. A difusividade térmica não é constante para todo perfil do solo; existe um valor para cada camada tomada isoladamente devido à uma diferença de teores de umidade para cada profundidade. As constantes físicas do solo variam, ao contrário do que foi proposto inicialmente. Todas essas pequenas diferenças somadas podem estar causando essa discrepância entre o esperado e o real; porém, mesmo assim, o erro médio pode ser considerado altamente satisfatório.

A partir dos resíduos, as diferenças entre as temperaturas obtidas e previstas pelos modelos matemáticos, obtém-se o valor do erro standard, que fornece uma faixa de temperatura em tor

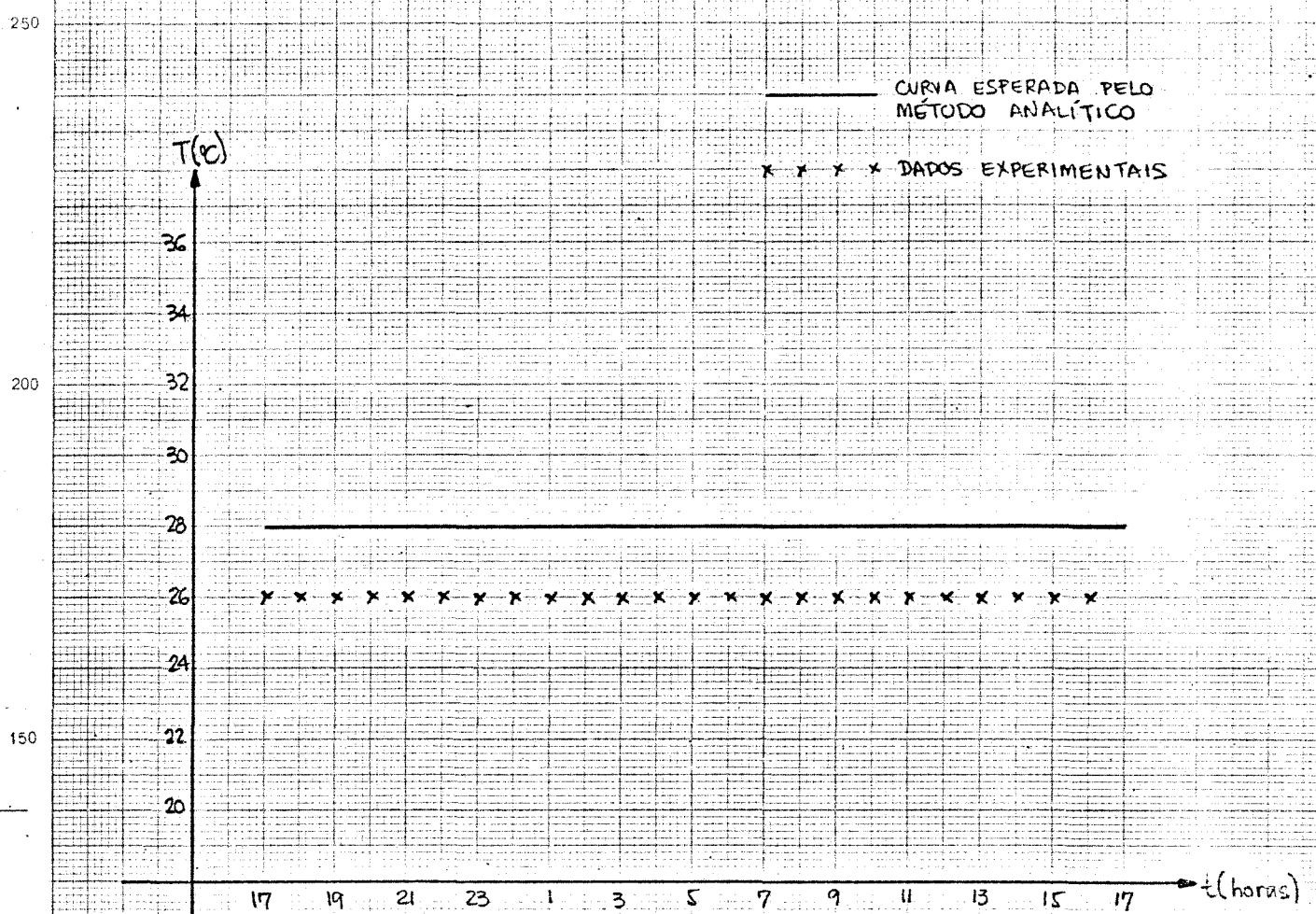


Fig. VI.2 - Diferença entre temperaturas esperadas teoricamente e obtidas experimentalmente para profundidade 58 cm em 15-16 de agosto de 1983.

no da qual se pode esperar que os dados experimentais oscilem.

Para profundidades até 20 cm, os valores de erro standard obtidos podem ser considerados satisfatórios, variando de 1,5 °C a 0,4 °C para 0 e 18 cm respectivamente.

Já para maiores profundidades, os valores de erro stand ard encontrados são pequenos devido às diferenças residuais se manterem praticamente constantes durante todo o período, e nada se pode afirmar, então, com respeito a este índice em relação a essas profundidades.

Segundo o desenvolvimento teórico do Capítulo IV, é espe rado um comportamento sinusoidal da temperatura em função do tem po, defasado em relação à profundidade, uma diminuição exponen cial da amplitude térmica com o aumento da profundidade. Os gráfi cos do Apêndice C e as Figs. VI.3, VII.4, ilustram a comparação entre os resultados obtidos com os dados experimentais, de compor tamento como o previsto teoricamente.

Também no Capítulo IV, onde se desenvolveram os modelos teóricos, há que se recorrer à determinação do coeficiente de di fusividade térmica do solo.

Do modelo analítico foram propostos dois métodos para o cálculo do coeficiente de difusividade térmica do solo a partir dos dados experimentais:

- método do tempo de defasagem - time lag -

sobre ocorrência de temperaturas máximas entre duas profundidades distintas, calculado pela equação (4.1.27) e método da razão das amplitudes à diferentes profundidades, onde a difusividade térmica

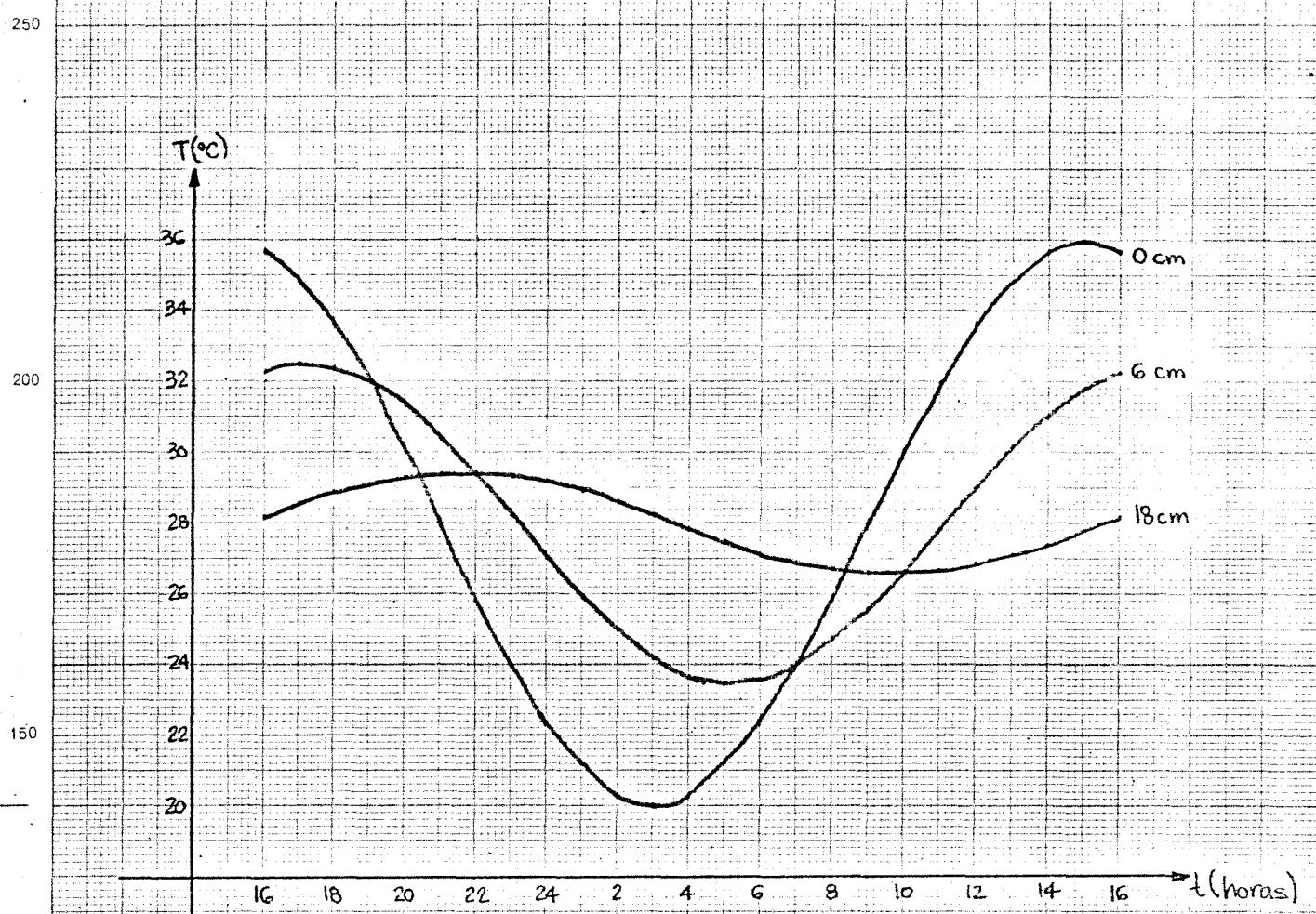


Fig. VI.3 - Comportamento sinusoidal da temperatura em função do tempo e diminuição da amplitude térmica com a profundidade. Curvas esperadas pelo método analítico para o período 30-31 de agosto de 1983.

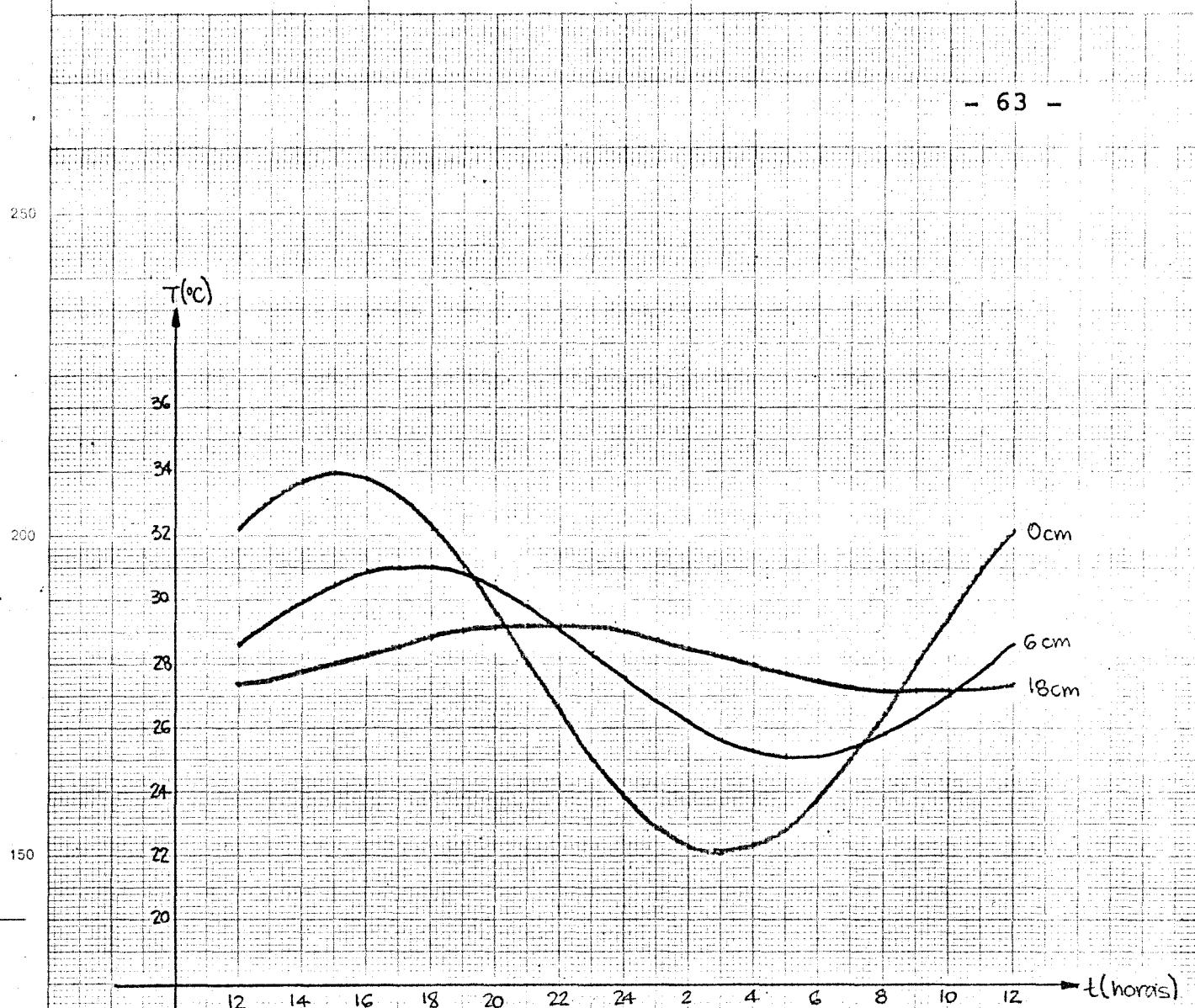


Fig. VI.4 - Comportamento sinusoidal da temperatura em função do tempo e diminuição da amplitude térmica com a profundidade. Curvas esperadas por elementos finitos para o período 18-19 de agosto de 1983.

ca pode ser expressa pela equação (4.1.30).

Para efeito de cálculo teórico, seguindo orientação de CARSLAW, admitiu-se que a difusividade térmica do solo, onde foram tomadas as medidas experimentais, fosse constante e de valor $4,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$. Esse valor pode ser comparado através dos dois métodos, a partir dos dados de campo e obteve-se ótimos resultados, bem próximos ao esperado (vide Tabelas VI.9, VI.10, VI.11 e VI.12).

PROFUNDIDADES $x - (\text{cm})$	DEFASAGEM $L - (\text{seg})$	DIFUSIVIDADE $D - (\text{cm}^2/\text{seg})$
0 a 3	3744	$4,41 \times 10^{-3}$
3 a 6	4032	$3,81 \times 10^{-3}$
6 a 10	5184	$4,09 \times 10^{-3}$
0 a 10	12960	$4,09 \times 10^{-3}$

$$\text{MÉDIA} = 4,10 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\text{DESVIO} = 0,25 \times 10^{-3}$$

Tabela VI.9. - Cálculo da difusividade térmica pelo método da defasagem a partir dos dados experimentais do período de 15-16 de agosto de 1983

PROFUNDIDADES x - (cm)	DEFASAGEM L - (seg)	DIFUSIVIDADE D - (cm ² /seg)
0 a 3	3888	$4,09 \times 10^{-3}$
3 a 6	4032	$3,81 \times 10^{-3}$
6 a 10	5328	$3,88 \times 10^{-3}$
0 a 10	13248	$3,92 \times 10^{-3}$

$$\text{MÉDIA} = 3,93 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\text{DESVIO} = 0,12 \times 10^{-3}$$

Tabela VI.10 - Cálculo da difusividade térmica pelo método da defasagem, a partir dos dados experimentais do período de 30-31 de agosto de 1983

PROFUNDIDADES x - (cm)	AMPLITUDES (°C)		DIFUSIVIDADE D - (cm ² /seg)
	A ₁	A ₂	
0 a 6	8,0	4,8	$5,02 \times 10^{-3}$
6 a 18	4,8	1,3	$3,07 \times 10^{-3}$
3 a 18	5,5	1,3	$3,93 \times 10^{-3}$

$$\text{MÉDIA} = 4,01 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\text{DESVIO} = 0,98 \times 10^{-3}$$

Tabela VI.11 - Cálculo da difusividade térmica pelo método da razão das amplitudes, a partir dos dados experimentais do período de 29-30 de agosto de 1983

PROFUNDIDADES x - (cm)	AMPLITUDES ($^{\circ}$ C)		DIFUSIVIDADE D - (cm 2 /seg)
	A ₁	A ₂	
0 a 6	6,0	3,4	$4,06 \times 10^{-3}$
6 a 18	3,4	1,0	$3,50 \times 10^{-3}$
3 a 18	4,3	1,0	$3,86 \times 10^{-3}$

$$\text{MÉDIA} = 3,80 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\text{DESVIO} = 0,28 \times 10^{-3}$$

Tabela VI.12 - Cálculo da difusividade térmica pelo método da razão das amplitudes, a partir dos dados experimentais do período de 18-19 de agosto de 1983

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Baseado no que foi exposto nos capítulos anteriores, pode-se chegar à algumas conclusões que, de certa forma, eram esperadas desde o início deste trabalho, as quais visam recomendar técnicas para se prever o comportamento do perfil de temperatura do solo, face a periodicidade térmica das camadas superficiais. Essas conclusões resumem-se no seguinte:

- As soluções analítica e por elementos finitos prevêem o perfil térmico de maneira bastante satisfatória, com diferenças pequenas. O erro máximo observado é da ordem de 12%, ou seja, em torno de 2°C , correspondente às horas de ocorrência de temperatura mínima real.

- Para ambos os métodos, a amplitude térmica diminui exponencialmente com o incremento da profundidade.

- Para diferentes profundidades, a ocorrência de temperaturas máximas do período ocorrem com uma defasagem de tempo - "time lag".

- O cálculo da difusividade térmica pelos métodos da defazagem e razão das amplitudes, propostos pelo modelo analítico, revelaram-se satisfatórios, sendo que o método da defazagem - "time lag" - mostrou-se mais preciso.

- A solução por Elementos Finitos pode ser de grande valia para se descrever um modelo teórico mais complexo, composto de camadas de solo com distintas propriedades físico-térmicas, numa tentativa de aproximar-se mais das condições reais, por ser um método de grande maleabilidade de recursos.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDAÇÕES PARA
FUTUROS ESTUDOS

Como parte deste trabalho, são apresentadas algumas considerações julgadas importantes para futuros estudos. Dentre elas, se destaca a necessidade de construir um modelo matemático mais realista, considerando-se as diferenças existentes entre as propriedades físico-térmicas das diversas camadas do solo. Não de menos importância é o movimento por entre os poros do sistema, de fluidos, os quais transportam calor, fazendo com que o fenômeno deixe de ser puramente de condução térmica. Para tanto, o método de Elementos Finitos parece ser ideal, desde que admite elementos com diferentes propriedades físico-térmicas compondo o meio.

Julga-se, também, de interesse relacionar a difusividade térmica com a umidade, e chegar-se a estes valores através do perfil térmico do solo.

BIBLIOGRAFIA

CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C. (1960), Conduction of Heat in Solids.
Second Edition. Clarendon Press, Oxford.

CHAPMAN, J.A. (1967), Heat Transfer. Second Edition. The MacMillan
Co., New York.

DAL FABBRO, I.M. (1975), Development of an Apparatus for the
Determination of Soil Thermal Diffusivity. Analytical and
Numerical Solutions of the Diffusivity Equations. M.S.U. -
Unpublished paper.

DECICO, A. (1974), Determinação das Propriedades Térmicas do Solo em
Condições de Campo. Tese de Livre Docência da E.S.A. "Luiz de
Queiroz" da U.S.P.

FRANKLIN, P. (1944), Methods of Advanced Calculus. McGraw-Hill Book
Co., New York.

GEMANT, A. (1959), The Thermal Conductivity of Soils. Jour. of Appl.
Phy., 21:750-752.

HADAS, A. (1968), A Comparison Between Two Methods of Determining
the Thermal Diffusivity of Moist Soil. Soil Sc. Soc. Amer. Proc.,
Vol. 32.

HIGASHI, A. (1953), On the Thermal Conductivity of Soil, with
Special Reference to that of Frozen Soil. Tran. Amer. Geo.
Union. 34:737-748.

JACKSON,R.D. (1957), Determination of Thermal Diffusivity of Moist Soil. Unpublished Master Thesis. Iowa State College.

JACKSON,R.D. and KIRKHAM,P. (1958), Method of Measure of the Real Thermal Diffusivity of Moist Soil. Soil Sc. Soc. Amer. Proc., Vol. 22, N. 6.

KENNEDY,J.B. and NEVILLE,A.M. (1976), Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists. Harper and Row Publ., New York.

MOENCH,A.F. and EVANS,D.D. (1970), Thermal Conductivity and Diffusivity of Soil using a Cilindrycal Heat Source. Soil Sc. Soc. Amer. Proc., Vol. 34.

OSTLE,B. (1963), Statistic in Research. The Iowa State University Press. Second Edition.

PATTEN,H.E. (1909), Heat Transfer in Soils. U.S. Dep. of Agr. Bur. Soils Bul. 59.

PENNER,E. (1970), Thermal Conductivity of Frozen Soils. Can. Jour. of Earths Sc., 7:982.

SCHNEIDER,F.M. et alli (1980), Determinação das Propriedades Térmicas de um Solo da Unidade de Mapeamento São Pedro. Rev. Centro de Ciências Rurais 10(4):357-363.

SCHNEIDER,T. (1969), The Block Method for Measuring Heat Flux Density at the Surface of Soils and Other Solids. Agr. Meteo., 6:423-434.

SEGERLIND,L.J. (1976), Finite Elements. John Willey & Sons Co.

SMITH,W.O. (1939), Thermal Conductivities in Moist Soils. Soil Sc. Soc.of Amer. Proc., 4:32-40.

STEARNs,C.R. (1969), Application of the Lettau Theoretical Model of Thermal Diffusion to Soil Profiles of Temperature and Heat Flux. Jour. of Geo. Res., Vol. 74, № 2.

VAN WIJK,W.R. (1964), Two New Methods for the Determination of the Thermal Properties of Soil near the Surface. Physica, 30:387-388.

VAN WIJK,W.R. and BRUIJN,P.J. (1964), Laplace Transforms of Empirical Curves in the Evaluation of Physical Parameters in Differential Equations. Physica, 30:1097-1108.

VISWANADHAM,Y. and RAMANADHAM,R. (1969), The Thermal Diffusivity of Red Sandy Soil at Waltair. Pure and Appl. Geo., Vol. 74.

VISWANADHAM,Y. and RAO,N.J.M. (1972), The Thermal Diffusivity of Soil at Tropical Stations in Southern Hemisphere. Pure and Appl. Geo., Vol. 101:247-260.

WEBB,J. (1956), Thermal Conductivity of Soil. Nature 177:989.

WIERENGA,P.J. and DeVIT,C.T. (1970), Simmulation of Heat Transfer in Soils. Soil Sc. Soc. Amer. Proc., Vol. 34.

APÉNDICE A

PROGRAMAS

APÊNDICE A.1

5'

10' PROGRAMA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DO SOLO PELO MÉTODO
ANALÍTICO

20 DIM X (10), T(30)

30 DATA 0., 3., 6., 10., 18., 28., 38., 58.

40 INPUT "ENTRE COM O NÚMERO DE VALORES DE PROFUNDIDADE"; N

50 INPUT "ENTRE COM O NÚMERO DE MEDIDAS DE TEMPO"; M

60 FOR I = 1 TO N

70 READ X(I)

80 NEXT I

90 A = 6.00

100 W = 0.26180

110 B = 0.09534

115 TM = 280

120 FOR J = 1 TO M

130 T(J) = J

135 NEXT J

140 FOR I = 1 TO N

150 LPRINT "PROFUNDIDADE:" X(I), "CENTÍMETROS"

160 BX = B * X(I)

170 FOR J = 1 TO M

180 TS = A * EXP(BX) * SIN(W*T(J)+(BX))+TM

190 LPRINT "TEMPO:", T(J), "TEMPERATURA", TS

200 NEXT J: NEXT I

APENDICE A.2

90' TEFA6/BAS

100' PROGRAMA PARA CALCULAR TEMPERATURA DO SOLO POR ELEMENTOS FINITOS

120 DIM C(8,8), K(8,8), A(8,8), P(8,8), F(8), Z(8)

130 DATA

135 DATA

140 DATA

145 DATA

150 DATA

155 DEFDBL X,Y,Z,D,C,K,P,F,W,T

160 INPUT "DIMENSÃO DAS MATRIZES", N

170 FOR I = 1 TO N

180 FOR J = 1 TO N

190 READ K(I,J)

200 NEXT J

210 NEXT I

220 FOR I = 1 TO N

230 FOR J = 1 TO N

240 READ C(I,J)

250 NEXT I

260 NEXT J

270 T = 0.01

280 FOR I = 1 TO N:FOR J = 1 TO N

290 P(I,J) = (2./T)*C(I,J):A(I,J) = K(I,J)+P(I,J)

300 NEXT J:NEXT I

310 NM 1 = N-1

320 FOR I = 1 TO N

```
330 DT = A(I,J):DD = ABS(DT)
340 IF DD <= 0.000001 THEN GO TO 700
350 FOR J=1 TO NM1:J1 = J+1
360 A(I,J) = A(I,J1)/DT:NEXT J
370 A(I,N) = 1./DT
380 FOR L=1 TO N
390 IF I=L THEN GO TO 450
400 W = A(L,1)
410 FOR J=1 TO NM1:J1 = J+1
420 A(L,J) = A(L,J1) - W*A(I,J)
430 NEXT J
440 A(L,N) = -W/DT
450 NEXT L
460 NEXT I
470 LPRINT "MATRIZ INVERSA"
480 FOR I=1 TO N: FOR J=1 TO N
490 LPRINT A(I,J);
500 NEXT J:LPRINT NEXT I
510 FOR J=1 TO N
520 X=0:W=24:D=0.01
530 READ F(J)
540 NEXT J
550 FOR M=1 TO 2405
555 Y=INT(X)+1
560 X=X+D
570 F(1)=6.00*SIN((2*3.1459/W)*(X))+28.00
580 FOR I=1 TO N:Z(J)=0:NEXT I
590 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
600 Z(I) = Z(I)+P(I,J)*F(J)
```

```
610 NEXT J:NEXT I
620 FOR I=1 TO N:F(J)=0:NEXT J
630 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
640 F(I) = F(I) + A(I,J) * Z(J)
650 NEXT J:NEXT I
652 Z = INT(X)
653 PRINT M, "Y", Y, "Z", Z
655 IF Y > < Z THEN GO TO 690 ELSE GO TO 660
660 LPRINT :LPRINT "TEMPERATURA"
670 FOR I=1 TO N:LPRINT F(I);
675 NEXT I
680 LPRINT :LPRINT "TIME STEP:",X
685 LPRINT USING "##.##";X
690 NEXT M
695 GO TO 710
700 LPRINT :LPRINT "A MATRIZ NÃO TEM INVERSA"
710 END
```

APENDICE A.3

```
5' PROGRAMA ERRO STANDARD - SE
10 DIM TEX(24), TMA(24), MEF(24), X(24)
20 DATA
30 DATA
40 DATA
50 FOR I=1 TO 24:READ TEX(I):NEXT I
60 FOR I=1 TO 24:READ TMA(I):NEXT I
70 FOR I=1 TO 24:READ MEF(I):NEXT I
75 XM=0:SOMA = 0
80 FOR I=1 TO 24:X(I) = TEX(I) - TMA(I):XM=XM + X(I)
85 NEXT I
90 XM = XM/24
95 FOR I=1 TO 24
100 X(I) = (X(I)- XM) * (X(I) - XM)
105 SOMA = SOMA + X(I)
110 NEXT I
115 SE = SQR(SOMA/23)
120 LPRINT "ERRO STANDARD =";SE
130 FOR I=1 TO 24:TMA(I) = MEF(I):NEXT I
140 INPUT "CONTINUA? (S/N) ";S$
150 IF S$ = "S" THEN GO TO 75 ELSE 160
160 END
```

APÊNDICE B

DADOS EXPERIMENTAIS E

TEÓRICOS ESPERADOS

ERROS PERCENTUAIS

ERROS MÁXIMOS

ERROS MÉDIOS

ERROS STANDARD

DADOS RELATIVOS AO PERÍODO 15/16 - AGOSTO - 1983

INÍCIO : 17:00 Horas 15/08
FIM : 17:00 Horas 16/08
TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE: 34,0°C (15:00 - 15/08)
TEMPERATURA MÍNIMA NA SUPERFÍCIE: 22,0°C (06:00 - 16/08)
TEMPERATURA MÉDIA NA SUPERFÍCIE : 28,0°C
AMPLITUDE TÉRMICA NA SUPERFÍCIE : 6,0°C

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 0 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	31,0	33,2	7,10	33,2	7,10
18	29,5	32,2	9,15	32,2	9,15
19	28,5	31,0	8,77	31,0	8,77
20	28,0	29,6	5,71	29,6	5,71
21	26,5	28,0	5,66	28,0	5,66
22	26,0	26,5	1,92	26,5	1,92
23	25,5	25,0	-1,96	25,0	-1,96
24	25,0	23,8	-4,80	23,8	-4,80
01	25,0	22,8	-8,80	22,9	-8,40
02	24,5	22,2	-9,39	22,3	-8,98
03	23,5	22,0	-6,38	22,1	-5,96
04	23,0	22,2	-3,48	22,3	-3,04
05	22,5	22,8	1,33	22,8	1,33
06	22,0	23,8	8,18	23,8	8,18
07	23,5	25,0	6,38	25,0	6,38
08	24,0	26,5	10,42	26,4	10,00
09	26,0	28,0	7,69	28,0	7,69
10	27,5	29,6	7,64	29,5	7,27
11	29,0	31,0	6,90	31,0	6,90
12	30,5	32,2	5,57	32,2	5,57
13	32,0	33,2	3,75	33,1	3,44
14	33,5	33,8	0,90	33,7	0,60
15	34,0	34,0	0,00	34,0	0,00
16	33,5	33,8	0,90	33,8	0,90
			ANALÍTICO	NUMÉRICO	
			$e_{\max} = 10,42\%$	$e_{\max} = 10,00\%$	
			$\bar{e} = 5,53\%$	$\bar{e} = 5,40\%$	
			$s_e = 1,5^{\circ}\text{C}$	$s_e = 1,5^{\circ}\text{C}$	

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 3 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	31,0	32,4	4,52	32,0	3,23
18	30,0	32,0	6,67	31,6	5,33
19	29,0	31,3	7,93	31,0	6,90
20	28,5	30,4	6,67	30,2	5,96
21	28,5	29,3	2,81	29,3	2,81
22	27,5	28,1	2,18	28,2	2,55
23	27,0	26,9	-0,37	27,2	0,74
24	26,0	25,8	-0,77	26,2	0,77
01	26,0	24,9	-4,23	25,3	-2,69
02	25,5	24,2	-5,10	24,7	-3,14
03	25,5	23,7	-7,06	24,2	-5,10
04	25,0	23,5	-6,00	24,0	-4,00
05	25,0	23,6	-5,60	24,1	-3,60
06	24,5	24,0	-2,04	24,4	-0,41
07	24,5	24,7	0,82	25,0	2,04
08	24,5	24,7	4,90	25,8	5,31
09	25,5	26,7	4,71	26,8	5,10
10	26,0	27,9	7,31	27,8	6,92
11	27,0	29,1	7,78	28,9	7,04
12	28,0	30,2	7,86	29,9	6,79
13	29,0	31,1	7,24	30,7	5,86
14	30,5	31,9	4,59	31,4	2,95
15	31,5	32,3	2,54	31,9	1,27
16	32,0	32,5	1,56	32,1	0,31
	ANALÍTICO			NUMÉRICO	
	$e_{\max} = 7,93\%$			$e_{\max} = 7,04\%$	
	$\bar{e} = 4,64\%$			$\bar{e} = 3,78\%$	
	$S_e = 1,3^{\circ}\text{C}$			$S_e = 1,0^{\circ}\text{C}$	

15/16 AGOSTO - 1983

PTOFUNDIDADE 6 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	31,0	31,4	1,29	31,0	0,00
18	31,0	31,3	0,97	31,0	0,00
19	30,0	31,0	3,33	30,8	2,67
20	29,5	30,5	3,39	30,4	3,05
21	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
22	28,5	29,0	1,75	29,1	2,11
23	28,0	28,2	0,71	28,4	1,43
24	27,5	27,3	-0,73	27,6	0,36
01	27,5	26,5	-3,64	26,8	-2,55
02	27,0	25,7	-4,81	26,2	-2,96
03	27,0	25,2	-6,67	25,6	-5,19
04	26,0	24,8	-4,62	25,3	-2,69
05	26,0	24,6	-5,38	25,1	-3,46
06	25,5	24,7	-3,14	25,1	-1,57
07	25,0	25,0	0,00	25,3	1,20
08	25,0	25,5	2,00	25,8	3,20
09	25,5	26,2	2,75	26,3	3,14
10	26,0	27,0	3,85	27,0	3,85
11	26,5	27,8	4,91	27,8	4,91
12	27,0	28,7	6,30	28,6	5,93
13	27,5	29,6	7,64	29,3	6,55
14	28,5	30,3	6,32	30,0	5,26
15	29,5	30,9	4,75	30,5	3,39
16	31,0	31,2	0,65	30,8	-0,65
			ANALÍTICO	NUMÉRICO	
			$e_{máx} = 7,64\%$	$e_{máx} = 6,55\%$	
			$\bar{e} = 3,43\%$	$\bar{e} = 2,87\%$	
			$s_e = 1,1^{\circ}\text{C}$	$s_e = 0,9^{\circ}\text{C}$	

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 10 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TFE °C	e %
17	30,5	30,1	-1,31	30,1	-1,31
18	30,5	30,3	-0,66	30,2	-0,98
19	30,0	30,3	1,00	30,2	0,67
20	29,5	30,2	2,37	30,1	2,03
21	29,5	29,9	1,36	29,9	1,36
22	29,0	29,5	1,72	29,5	1,72
23	28,5	29,0	1,75	29,0	1,75
24	28,5	28,4	-0,35	28,5	0,00
01	28,0	27,8	-0,71	27,9	-0,36
02	27,5	27,2	-1,09	27,3	-0,73
03	27,5	26,7	-2,91	26,8	-2,55
04	27,0	26,2	-2,96	26,4	-2,22
05	27,0	25,9	-4,07	26,1	-3,33
06	26,5	25,7	-3,02	26,0	-1,89
07	26,0	25,7	-1,15	25,9	-0,38
08	26,0	25,8	-0,77	26,1	0,38
09	26,0	26,1	0,38	26,3	1,15
10	26,0	26,5	1,92	26,7	2,69
11	26,5	27,0	1,89	27,2	2,64
12	26,5	27,6	4,15	27,7	4,53
13	27,0	28,2	4,44	28,3	4,81
14	27,5	28,8	4,73	28,8	4,73
15	28,5	29,3	2,81	29,3	2,81
16	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 4,73\%$			$e_{\max} = 4,81\%$		
$\bar{e} = 2,09\%$			$\bar{e} = 1,99\%$		
$s_e = 0,7^{\circ}\text{C}$			$s_e = 0,6^{\circ}\text{C}$		

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 18 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TFE °C	e %
17	28,5	28,4	-0,35	28,5	0,00
18	28,5	28,6	0,35	28,8	1,05
19	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
20	28,0	29,0	3,57	29,1	3,93
21	28,0	29,1	3,93	29,2	4,29
22	28,0	29,1	3,93	29,2	4,29
23	28,0	29,0	3,57	29,1	3,93
24	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
01	28,0	28,7	2,50	28,8	2,86
02	28,0	28,4	1,43	28,5	1,79
03	28,0	28,2	0,71	28,3	1,07
04	27,5	27,9	1,45	28,0	1,82
05	27,5	27,6	0,36	27,7	0,73
06	27,5	27,4	-0,36	27,5	0,00
07	27,0	27,2	0,74	27,3	1,11
08	26,5	27,0	1,89	27,2	2,64
09	26,5	26,9	1,51	27,1	2,26
10	27,0	26,9	-0,37	27,2	0,74
11	27,0	27,0	0,00	27,2	0,74
12	27,0	27,1	0,37	27,4	1,48
13	27,0	27,3	1,11	27,5	1,85
14	27,0	27,6	2,22	27,8	2,96
15	27,5	27,8	1,09	28,0	1,82
16	28,0	28,1	0,36	28,3	1,07
ANALÍTICO			NUMÉRICO "		
$e_{\max} = 3,93\%$			$e_{\max} = 4,29\%$		
$\bar{e} = 1,61\%$			$\bar{e} = 2,07\%$		
$S_e = 0,4^{\circ}\text{C}$			$S_e = 0,4^{\circ}\text{C}$		

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 28 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	26,5	37,8	4,91	28,0	5,66
18	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
19	27,0	28,0	3,70	28,2	4,44
20	27,0	28,1	4,07	28,3	4,81
21	27,0	28,2	4,44	28,4	5,19
22	27,0	28,3	4,81	28,5	5,56
23	27,0	28,4	5,19	28,6	5,93
24	27,0	28,4	5,19	28,6	5,93
01	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
02	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
03	27,0	28,4	5,19	28,5	5,56
04	27,0	28,3	4,81	28,5	5,56
05	27,0	28,2	4,44	28,4	5,19
06	26,5	28,1	6,04	28,2	6,42
07	26,5	28,0	5,66	28,1	6,04
08	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
09	26,5	27,8	4,91	27,9	5,28
10	26,5	27,7	4,53	27,9	5,28
11	26,5	27,7	4,53	27,8	4,91
12	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
13	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
14	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
15	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
16	26,5	27,7	4,53	27,9	5,28
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 6,04\%$	$\bar{e} = 4,61\%$	$e_{\max} = 6,42\%$	$\bar{e} = 5,27\%$	$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 38 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
18	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
19	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
20	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
21	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
22	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
23	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
24	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
01	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
02	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
03	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
04	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
05	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
06	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
07	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
08	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
09	26,5	28,1	6,04	28,2	6,42
10	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
11	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
12	26,5	28,0	5,66	28,1	6,04
13	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
14	26,5	27,9	5,28	28,0	5,06
15	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
16	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
			ANALÍTICO	NUMÉRICO	
			$e_{\text{máx}} = 6,42\%$	$e_{\text{máx}} = 7,17\%$	
			$\bar{e} = 5,69\%$	$\bar{e} = 6,45\%$	
			$S_e = 0,1^{\circ}\text{C}$	$S_e = 0,2^{\circ}\text{C}$	

15/16 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 58 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
17	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
18	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
19	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
20	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
21	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
22	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
23	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
24	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
01	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
02	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
03	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
04	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
05	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
06	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
07	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
08	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
09	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
10	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
11	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
12	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
13	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
14	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
15	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
16	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
			ANALÍTICO		NUMÉRICO
			$e_{\max} = 7,69\%$		$e_{\max} = 9,23\%$
			$\bar{e} = 7,69\%$		$\bar{e} = 8,58\%$
			$s_e = - {}^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,1 {}^{\circ}\text{C}$

DADOS RELATIVOS AO PERÍODO 18/19 - AGOSTO - 1983

INÍCIO : 12:00 Horas (18/08)
FIM : 12:00 Horas (19/08)
TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE: 34,0°C (15:00 - 18/08)
TEMPERATURA MÍNIMA NA SUPERFÍCIE: 22,0°C (07:00 - 19/08)
TEMPERATURA MÉDIA NA SUPERFÍCIE : 28,0°C
AMPLITUDE TÉRMICA NA SUPERFÍCIE : 6,0°C

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 0 cm					
HORAS	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	31,0	32,2	3,87	32,2	3,87
13	33,0	33,2	0,61	33,1	0,30
14	34,0	33,8	-0,59	33,7	-0,88
15	34,0	34,0	0,00	34,0	0,00
16	32,5	33,8	4,00	33,8	4,00
17	32,0	33,2	3,75	33,2	3,75
18	30,5	32,2	5,57	32,2	5,57
19	29,5	31,0	5,08	31,0	5,08
20	29,0	29,6	2,07	29,6	2,07
21	27,0	28,0	3,70	28,0	3,70
22	26,5	26,5	0,00	26,5	0,00
23	26,0	25,0	-3,85	25,0	-3,85
24	25,0	23,8	-4,80	23,8	-4,80
01	24,0	22,8	-5,00	22,9	-4,58
02	24,0	22,2	-7,50	22,3	-6,96
03	23,0	22,0	-4,35	22,1	-3,91
04	22,5	22,2	-1,33	22,3	-0,89
05	22,5	22,8	1,33	22,8	1,33
06	22,5	23,8	5,78	23,8	5,78
07	22,0	25,0	13,64	25,0	13,64
08	24,0	26,5	10,42	26,4	10,00
09	26,0	28,0	7,69	28,0	7,69
10	28,0	29,6	5,71	29,5	5,36
11	29,0	31,0	6,90	31,0	6,90
	ANALÍTICO		NÚMÉRICO		
	$e_{máx} = 13,64\%$		$e_{máx} = 13,64\%$		
	$\bar{e} = 4,48\%$		$\bar{e} = 4,37\%$		
	$s_e = 1,2^{\circ}\text{C}$		$s_e = 1,3^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 3 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	28,5	30,2	5,96	29,9	4,91
13	29,5	31,1	5,42	30,7	4,07
14	31,5	31,9	1,27	31,4	-0,32
15	32,0	32,3	0,94	31,9	-0,31
16	31,5	32,5	3,17	32,1	1,90
17	31,0	32,4	4,52	32,0	3,23
18	30,5	32,0	4,92	31,6	3,61
19	29,5	31,3	6,10	31,0	5,08
20	29,5	30,3	2,71	30,2	2,37
21	29,0	29,3	1,03	29,3	1,03
22	28,0	28,1	0,36	28,2	0,71
23	27,0	26,9	-0,37	27,2	0,74
24	27,0	25,8	-4,44	26,2	-2,96
01	26,0	24,9	-4,23	25,3	-2,69
02	26,0	24,2	-6,92	24,7	-5,00
03	25,0	23,7	-5,20	24,2	-3,20
04	24,5	23,5	-4,08	24,0	-2,04
05	24,0	23,6	-1,67	24,1	0,42
06	24,0	24,0	0,00	24,4	1,67
07	23,5	24,7	5,11	25,0	6,38
08	24,0	25,7	7,08	25,8	7,50
09	25,0	26,7	6,80	26,8	7,20
10	26,5	27,9	5,28	27,8	4,91
11	27,5	29,1	5,82	28,9	5,09
	ANALÍTICO		NÚMÉRICO		
	$e_{\max} = 7,08\%$		$e_{\max} = 7,50\%$		
	$\bar{e} = 3,89\%$		$\bar{e} = 3,22\%$		
	$s_e = 1,1^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,9^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 6 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	27,5	28,7	4,36	28,6	4,00
13	29,0	29,6	2,07	29,3	1,03
14	30,0	30,3	1,00	30,0	0,00
15	31,0	30,9	-0,32	30,5	-1,61
16	31,0	31,2	0,65	30,9	-0,32
17	31,5	31,4	-0,32	31,0	-1,59
18	30,5	31,3	2,62	31,0	1,64
19	30,0	31,0	3,33	30,8	2,67
20	29,5	30,5	3,39	30,4	3,05
21	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
22	28,5	29,0	1,75	29,1	2,11
23	27,5	28,2	2,55	28,4	3,27
24	27,0	27,3	1,11	27,6	2,22
01	26,5	26,5	0,00	26,8	1,13
02	26,5	25,7	-3,02	26,2	-1,13
03	25,5	25,2	-1,18	25,6	0,39
04	25,0	24,8	-0,80	25,3	1,20
05	25,0	24,6	-1,60	25,1	0,40
06	24,5	24,7	0,82	25,1	2,45
07	24,5	25,0	2,04	25,4	3,67
08	24,5	25,5	4,08	25,8	5,31
09	25,0	26,2	4,80	26,3	5,20
10	26,0	27,0	3,85	27,0	3,85
11	27,0	27,8	2,96	27,8	2,96
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 4,80\%$		$e_{\max} = 5,31\%$		
	$\bar{e} = 2,14\%$		$\bar{e} = 2,25\%$		
	$s_e = 0,6^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,5^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 10 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	27,0	27,6	2,22	27,7	2,59
13	27,0	28,2	4,44	28,3	4,81
14	28,0	28,8	2,86	28,8	2,86
15	29,0	29,3	1,03	29,3	1,03
16	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
17	29,5	30,1	2,03	30,1	2,03
18	29,5	30,3	2,71	30,2	2,37
19	29,5	30,3	2,71	30,2	2,37
20	29,0	30,2	4,14	30,1	3,79
21	29,0	29,9	3,10	29,9	3,10
22	28,5	29,5	3,51	29,5	3,51
23	28,5	29,0	1,75	29,0	1,75
24	28,5	28,4	-0,35	28,5	0,00
01	27,5	27,8	1,09	27,9	1,45
02	27,5	27,2	-1,09	27,3	-0,73
03	27,0	26,7	-1,11	26,8	-0,74
04	26,5	26,2	-1,13	26,4	-0,38
05	26,5	25,9	-2,26	26,1	-1,51
06	25,5	25,7	0,78	26,0	1,96
07	25,5	25,7	0,78	25,9	1,57
08	26,0	25,8	-0,77	26,1	0,38
09	26,0	26,1	0,38	26,3	1,15
10	26,0	26,5	1,92	26,7	2,69
11	26,0	27,0	3,85	27,2	4,62
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{máx} = 4,44\%$		$e_{máx} = 4,81\%$		
	$\bar{e} = 2,03\%$		$\bar{e} = 2,09\%$		
	$s_e = 0,5^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,5^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 18 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	26,5	27,1	2,26	27,4	3,40
13	27,0	27,3	1,11	27,5	1,85
14	27,0	27,6	2,22	27,8	2,96
15	27,5	27,8	1,09	28,0	1,82
16	27,5	28,1	2,18	28,3	2,91
17	27,5	28,4	3,27	28,5	3,64
18	27,5	28,6	4,00	28,8	4,73
19	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
20	28,0	29,0	3,57	29,1	3,93
21	28,0	29,1	3,93	29,2	4,29
22	28,5	29,1	2,11	29,2	2,46
23	28,0	29,0	3,57	29,1	3,93
24	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
01	28,0	28,7	2,50	28,8	2,86
02	28,0	28,4	1,43	28,5	1,79
03	27,5	28,2	2,55	28,3	2,91
04	27,5	27,9	1,45	28,0	1,82
05	27,0	27,6	2,22	27,7	2,59
06	27,0	27,4	1,48	27,5	1,85
07	27,0	27,2	0,74	27,3	1,11
08	26,5	27,0	1,89	27,2	2,64
09	26,5	26,9	1,51	27,1	2,26
10	26,5	26,9	1,51	27,2	2,64
11	26,5	27,0	1,89	27,2	2,64
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 4,00\%$		$e_{\max} = 4,73\%$		
	$\bar{e} = 2,27\%$		$\bar{e} = 2,84\%$		
	$S_e = 0,3^{\circ}\text{C}$		$S_e = 0,3^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 28 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
13	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
14	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
15	26,5	27,6	4,15	27,8	4,91
16	26,5	27,7	4,53	27,9	5,28
17	27,0	27,8	2,96	28,0	3,70
18	27,0	27,9	3,33	28,1	4,07
19	27,0	28,0	3,70	28,2	4,44
20	27,0	28,1	4,07	28,3	4,81
21	27,5	28,2	2,55	28,4	3,27
22	27,5	28,3	2,91	28,5	3,64
23	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
24	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
01	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
02	27,5	28,4	3,27	28,6	4,00
03	27,0	28,4	5,19	28,5	5,56
04	27,0	28,3	4,81	28,5	5,56
05	27,0	28,2	4,44	28,4	5,19
06	27,0	28,1	4,07	28,2	4,44
07	27,0	28,0	3,70	28,1	4,07
08	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
09	26,5	27,8	4,91	27,9	5,28
10	26,5	27,7	4,53	27,9	5,28
11	26,5	27,7	4,53	27,8	4,91
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 5,28\%$			$e_{\max} = 5,66\%$		
$\bar{e} = 3,97\%$			$\bar{e} = 4,62\%$		
$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$			$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$		

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 38 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	26,5	28,0	5,66	28,1	6,04
13	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
14	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
15	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
16	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
17	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
18	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
19	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
20	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
21	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
22	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
23	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
24	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
01	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
02	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
03	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
04	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
05	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
06	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
07	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
08	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
09	26,5	28,1	6,04	28,2	6,42
10	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
11	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
			ANALÍTICO		NUMÉRICO
			$e_{\max} = 6,42\%$		$e_{\max} = 7,17\%$
			$\bar{e} = 5,69\%$		$\bar{e} = 6,45\%$
			$S_e = 0,1^{\circ}\text{C}$		$S_e = 0,2^{\circ}\text{C}$

18/19 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 58 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
12	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
13	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
14	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
15	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
16	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
17	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
18	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
19	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
20	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
21	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
22	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
23	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
24	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
01	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
02	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
03	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
04	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
05	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
06	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
07	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
08	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
09	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
10	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
11	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 7,69\%$		$e_{\max} = 9,23\%$		
	$\bar{e} = 7,69\%$		$\bar{e} = 8,56\%$		
	$S_e = -^{\circ}\text{C}$		$S_e = 0,1^{\circ}\text{C}$		

DADOS RELATIVOS AO PERÍODO 29/30 - AGOSTO - 1983

INÍCIO	:	9:00 Horas	(29/08)
FIM	:	9:00 Horas	(30/08)
TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE:	36.,0 ^o C	(15:00 - 29/08)	
TEMPERATURA MÍNIMA NA SUPERFÍCIE:	20,0 ^o C	(06:00 - 30/08)	
TEMPERATURA MÉDIA NA SUPERFÍCIE :	28,0 ^o C		
AMPLITUDE TÉRMICA NA SUPERFÍCIE :	8.0 ^o C		

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 0 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	28,5	30,1	5,61	30,0	5,26
11	30,5	32,0	4,92	31,9	4,59
12	33,5	33,7	0,60	33,6	0,30
13	35,0	34,9	-0,29	34,9	-0,29
14	36,0	35,7	-0,83	35,7	-0,83
15	36,0	36,0	0,00	35,9	-0,28
16	36,0	35,7	-0,83	35,7	-0,83
17	35,5	34,9	-1,69	34,9	-1,69
18	33,5	33,7	0,60	33,6	0,30
19	31,0	32,0	3,23	32,0	3,23
20	30,0	30,1	0,33	30,1	0,33
21	27,0	28,0	3,70	28,0	3,70
22	25,5	25,9	1,57	26,0	1,96
23	25,0	24,0	-4,00	24,1	-3,60
24	24,0	22,3	-7,08	22,4	-6,67
01	23,5	21,1	-10,21	21,2	-9,79
02	23,0	20,3	-11,74	20,4	-11,30
03	22,0	20,0	-9,09	20,1	-8,64
04	21,5	20,3	-5,58	20,3	-5,58
05	21,0	21,1	0,48	21,1	0,48
06	20,0	22,3	11,50	22,4	12,00
07	23,0	24,0	4,35	24,0	4,35
08	23,0	25,9	12,61	25,9	12,61
09	27,0	28,0	3,70	38,0	3,70
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 12,61\%$		$e_{\max} = 12,61\%$		
	$\bar{e} = 4,36\%$		$\bar{e} = 4,26\%$		
	$S_e = 1,4^{\circ}\text{C}$		$S_e = 1,4^{\circ}\text{C}$		

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 3 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	27,0	27,9	3,33	27,8	2,96
11	29,0	29,4	1,38	29,2	0,69
12	30,5	30,9	1,31	30,5	0,00
13	32,0	32,2	0,63	31,7	-0,94
14	32,5	33,1	1,85	32,6	0,31
15	33,0	33,8	2,42	33,2	0,61
16	33,5	34,0	1,49	33,4	-0,30
17	33,0	33,8	2,42	33,3	0,91
18	31,5	33,3	5,71	32,8	4,13
19	30,0	32,4	8,00	32,0	6,67
20	29,0	31,1	7,24	31,0	6,90
21	28,0	29,7	6,07	29,7	6,07
22	27,5	28,2	2,55	28,3	2,91
23	27,0	26,6	-1,48	26,9	-0,37
24	26,0	25,1	-3,46	25,6	-1,54
01	25,5	23,9	-6,27	24,5	-3,92
02	24,5	22,9	-6,53	23,5	-4,08
03	24,0	22,2	-7,50	22,9	-4,58
04	23,5	22,0	-6,38	22,7	-3,40
05	22,5	22,2	-1,33	22,8	1,33
06	23,0	22,7	-1,30	23,3	1,30
07	23,5	23,7	0,85	24,1	2,55
08	24,0	24,9	3,75	25,1	4,58
09	25,5	26,3	3,14	26,4	3,53
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 8,00\%$		$e_{\max} = 6,90\%$		
	$\bar{e} = 3,60\%$		$\bar{e} = 2,69\%$		
	$s_e = 1,2^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,9^{\circ}\text{C}$		

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 6 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	25,5	26,6	4,31	26,7	4,71
11	27,0	27,8	2,96	27,7	2,59
12	28,5	29,0	1,75	28,7	0,70
13	30,0	30,1	0,33	29,7	-1,00
14	31,5	31,0	-1,59	30,6	-2,86
15	31,5	31,8	0,95	31,3	-0,63
16	32,0	32,3	0,94	31,8	-0,63
17	32,0	32,5	1,56	32,0	0,00
18	32,5	32,4	-0,31	32,0	-1,54
19	31,5	32,0	1,59	31,7	0,63
20	31,0	31,3	0,97	31,2	0,65
21	30,0	30,4	1,33	30,4	1,33
22	28,5	29,4	3,16	29,5	3,51
23	28,5	28,2	-1,05	28,5	0,00
24	27,5	27,1	-1,45	27,4	-0,36
01	27,0	25,9	-4,07	26,5	-1,85
02	26,0	25,0	-3,85	25,6	-1,54
03	25,0	24,2	-3,20	24,9	-0,40
04	24,5	23,7	-3,27	24,4	-0,41
05	24,0	23,5	-2,08	24,1	0,42
06	23,0	23,6	2,61	24,2	5,22
07	24,0	24,0	0,00	24,5	2,08
08	24,5	24,7	0,82	25,0	2,04
09	24,5	25,6	4,49	25,8	5,31
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\text{máx}} = 4,49\%$			$e_{\text{máx}} = 5,31\%$		
$\bar{e} = 2,03\%$			$\bar{e} = 1,68\%$		
$s_e = 0,6^{\circ}\text{C}$			$s_e = 0,6^{\circ}\text{C}$		

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 10 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	25,0	26,0	4,00	26,3	5,20
11	25,5	26,7	4,71	27,0	5,88
12	26,0	27,5	5,77	27,7	6,54
13	27,5	28,3	2,91	28,4	3,27
14	28,0	29,1	3,93	29,1	3,93
15	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
16	29,5	30,4	3,05	30,3	2,71
17	30,0	30,8	2,67	30,7	2,33
18	30,5	31,0	1,64	31,0	1,64
19	31,0	31,1	0,32	31,0	0,00
20	30,0	30,9	3,00	30,8	2,67
21	30,0	30,5	1,67	30,5	1,67
22	29,5	30,0	1,69	30,0	1,69
23	28,5	29,3	2,81	29,3	2,81
24	28,5	28,5	0,00	28,6	0,35
01	28,0	27,7	-1,07	27,9	-0,36
02	27,5	27,0	-1,82	27,1	-1,45
03	26,5	26,2	-1,13	26,5	0,00
04	26,0	25,6	-1,54	25,9	-0,38
05	25,5	25,2	-1,18	25,5	0,00
06	25,0	25,0	0,00	25,3	1,20
07	24,0	24,9	3,75	25,2	5,00
08	24,5	25,1	2,45	25,4	3,67
09	25,0	25,5	2,00	25,7	2,80
			ANALÍTICO	NUMÉRICO	
			$e_{\max} = 5,77\%$	$e_{\max} = 6,54\%$	
			$\bar{e} = 2,33\%$	$\bar{e} = 2,43\%$	
			$s_e = 0,6^{\circ}\text{C}$	$s_e = 0,5^{\circ}\text{C}$	

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 18 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	26,5	26,6	0,38	26,9	1,51
11	26,5	26,7	0,75	27,0	1,89
12	27,0	26,9	-0,37	27,1	0,37
13	27,0	27,1	0,37	27,4	1,48
14	27,0	27,4	1,48	27,7	2,59
15	27,5	27,8	1,09	28,0	1,82
16	27,5	28,2	2,55	28,4	3,27
17	28,0	28,5	1,79	28,7	2,50
18	28,5	28,9	1,40	29,0	1,75
19	28,5	29,1	2,11	29,3	2,81
20	28,5	29,3	2,81	29,5	3,51
21	29,0	29,4	1,38	29,6	2,07
22	28,5	29,4	3,16	29,6	3,86
23	28,5	29,3	2,81	29,5	3,51
24	28,5	29,2	2,46	29,3	2,81
01	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
02	28,0	28,6	2,14	28,7	2,50
03	28,0	28,2	0,71	28,4	1,43
04	27,5	27,8	1,09	28,0	1,82
05	27,5	27,5	0,00	27,6	0,36
06	27,5	27,1	-1,45	27,3	-0,73
07	27,5	26,9	-2,18	27,1	-1,45
08	27,0	26,7	-1,11	26,9	-0,37
09	26,5	26,6	0,38	26,8	1,13
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 3,21\%$			$e_{\max} = 3,86\%$		
$\bar{e} = 1,55\%$			$\bar{e} = 2,05\%$		
$s_e = 0,4^{\circ}\text{C}$			$s_e = 0,4^{\circ}\text{C}$		

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 28 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	26,5	27,6	4,15	27,9	5,28
11	26,5	27,5	3,77	27,8	4,91
12	26,5	27,5	3,77	27,7	4,53
13	26,5	27,5	3,77	27,7	4,53
14	26,5	27,5	3,77	27,7	4,53
15	26,5	27,5	3,77	27,8	4,91
16	26,0	27,6	6,15	27,9	7,31
17	26,0	27,7	6,54	28,0	7,69
18	26,5	27,8	4,91	28,1	6,04
19	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
20	27,0	28,1	4,07	28,4	5,19
21	27,0	28,3	4,81	28,6	5,93
22	27,0	28,4	5,19	28,7	6,30
23	27,0	28,5	5,56	28,8	6,67
24	27,5	28,5	3,64	28,8	4,73
01	27,5	28,6	4,00	28,8	4,73
02	27,0	28,5	5,56	28,8	6,67
03	27,0	28,5	5,56	38,7	6,30
04	27,0	28,4	5,19	28,6	5,93
05	27,0	28,3	4,81	28,5	5,56
06	27,0	28,2	4,44	28,3	4,81
07	27,0	28,0	3,70	28,2	4,44
08	27,0	27,9	3,33	28,0	3,70
09	26,5	27,8	4,91	27,9	5,28
			ANALÍTICO		NUMÉRICO
			$e_{\max} = 6,54\%$		$e_{\max} = 7,69\%$
			$\bar{e} = 4,63\%$		$\bar{e} = 5,53\%$
			$S_e = 0,2^{\circ}\text{C}$		$S_e = 0,3^{\circ}\text{C}$

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 38 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
11	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
12	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
13	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
14	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
15	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
16	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
17	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
18	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
19	26,5	27,8	4,91	28,1	6,04
20	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
21	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
22	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
23	26,5	28,0	5,66	28,4	7,17
24	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
01	26,5	28,1	6,04	28,5	7,55
02	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
03	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
04	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
05	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
06	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
07	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
08	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
09	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
	ANALÍTICO			NUMÉRICO	
	$e_{\max} = 6,42\%$	$\bar{e} = 5,68\%$	$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$	$e_{\max} = 7,55\%$	$\bar{e} = 6,67\%$

29/30 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 58 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
10	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
11	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
12	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
13	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
14	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
15	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
16	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
17	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
18	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
19	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
20	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
21	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
22	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
23	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
24	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
01	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
02	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
03	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
04	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
05	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
06	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
07	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
08	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
09	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
			ANALÍTICO		NUMÉRICO
			$e_{máx} = 7,69\%$		$e_{máx} = 9,62\%$
			$\bar{e} = 7,69\%$		$\bar{e} = 8,83\%$
			$s_e = - {}^0\text{C}$		$s_e = 0,2 {}^0\text{C}$

DADOS RELATIVOS AO PERÍODO 30/31 - AGOSTO - 1983

INÍCIO	:	16:00 Horas	(30/08)
FIM	:	16:00 Horas	(31/08)
TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE:	36,0 ^o C	(15:00 - 31/08)	
TEMPERATURA MÍNIMA NA SUPERFÍCIE:	20,0 ^o C	(05:00 - 31/08)	
TEMPERATURA MÉDIA NA SUPERFÍCIE:	28,0 ^o C		
AMPLITUDE TÉRMICA NA SUPERFÍCIE :	8,0 ^o C		

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 0 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	34,5	35,7	3,48	35,7	3,48
17	34,0	34,9	2,65	34,9	2,65
18	33,0	33,7	2,12	33,6	1,82
19	32,0	32,0	0,00	32,0	0,00
20	30,5	30,1	-1,31	30,1	-1,31
21	28,5	28,0	-1,75	28,0	-1,75
22	27,0	25,9	-4,97	26,0	-3,70
23	25,0	24,0	-4,00	24,1	-3,60
24	24,0	22,3	-7,08	22,4	-6,67
01	22,5	21,2	-5,78	21,2	-5,78
02	22,0	20,3	-7,73	20,4	-7,27
03	21,5	20,0	-6,98	20,1	-6,51
04	21,0	20,3	-3,33	20,3	-3,33
05	20,0	21,1	5,50	21,1	5,50
06	20,5	22,3	8,78	22,4	9,27
07	23,5	24,0	2,13	24,0	2,13
08	24,5	25,9	5,71	25,9	5,71
09	27,5	28,0	1,82	28,0	1,82
10	28,5	30,1	5,61	30,0	5,26
11	29,5	32,0	8,47	31,9	8,14
12	32,5	33,7	3,69	33,6	3,38
13	34,0	34,9	2,65	34,9	2,65
14	35,0	35,7	2,00	35,7	2,00
15	36,0	36,0	0,00	35,9	-0,28
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 8,78\%$			$e_{\max} = 9,27\%$		
$\bar{e} = 4,03\%$			$\bar{e} = 3,92\%$		
$S_e = 1,2^{\circ}\text{C}$			$S_e = 1,2^{\circ}\text{C}$		

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 3 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	33,0	34,0	3,03	33,4	1,21
17	33,5	33,8	0,90	33,3	-0,60
18	32,0	33,3	4,06	33,8	2,50
19	31,5	32,4	2,86	32,0	1,59
20	30,0	31,1	3,67	21,0	3,33
21	28,0	29,7	6,07	29,7	6,07
22	27,0	28,1	4,07	28,3	4,81
23	26,5	26,6	0,38	26,9	1,51
24	25,0	25,1	0,40	25,6	2,40
01	25,0	23,9	-4,40	24,5	-2,00
02	24,5	22,9	-6,53	23m5	-4,08
03	23,5	22,2	-5,53	22,9	-2,55
04	23,0	22,0	-4,35	22,7	-1,30
05	22,0	22,2	0,91	22,8	3,64
06	23,5	22,7	-3,40	23,3	-0,85
07	24,0	23,7	-1,25	24,1	0,42
08	24,5	24,9	1,63	25,1	2,45
09	26,0	26,3	1,15	26,4	1,54
10	27,0	27,9	3,33	27,8	2,96
11	27,5	29,4	6,91	29,2	6,18
12	28,5	30,9	8,42	30,5	7,02
13	30,5	32,2	5,57	31,7	3,93
14	32,0	33,1	3,44	32,7	2,19
15	32,0	33,8	5,63	33,2	3,75
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\text{máx}} = 8,42\%$		$e_{\text{máx}} = 7,02\%$		
	$\bar{e} = 3,66\%$		$\bar{e} = 2,87\%$		
	$S_e = 1,1^{\circ}\text{C}$		$S_e = 0,8^{\circ}\text{C}$		

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 6 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	32,0	32,3	0,94	31,8	-0,63
17	32,5	32,5	0,00	32,0	-1,54
18	33,0	32,4	-1,82	32,0	-3,03
19	32,0	32,0	0,00	31,7	-0,94
20	31,0	31,3	0,97	31,2	0,65
21	30,0	30,4	1,33	30,4	1,33
22	28,0	29,4	5,00	29,5	5,36
23	28,0	28,2	0,71	28,5	1,79
24	27,0	27,0	0,00	27,4	1,48
01	26,5	25,9	-2,26	26,5	0,00
02	25,5	25,0	-1,96	25,6	0,39
03	25,0	24,2	-3,20	24,9	-0,40
04	24,5	23,7	-3,27	24,4	-0,41
05	23,5	23,5	0,00	24,1	2,55
06	23,5	23,6	0,43	24,2	2,98
07	23,0	24,0	4,35	24,5	6,52
08	24,0	24,7	2,92	25,0	4,17
09	24,0	25,6	6,67	25,8	7,50
10	26,0	26,6	2,31	26,7	2,69
11	26,5	27,8	4,91	27,7	4,53
12	27,5	29,0	5,45	28,7	4,36
13	29,0	30,1	3,79	29,7	2,41
14	30,5	31,0	1,64	30,6	0,33
15	32,0	31,8	-0,63	31,3	-2,19
ANALÍTICO				NUMÉRICO	
$e_{máx} = 6,67\%$				$e_{máx} = 7,50\%$	
$\bar{e} = 2,27\%$				$\bar{e} = 2,42\%$	
$s_e = 0,7^{\circ}\text{C}$				$s_e = 0,7^{\circ}\text{C}$	

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 10 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	30,0	30,4	1,33	30,3	1,00
17	30,0	30,8	2,67	30,7	2,33
18	30,5	31,0	1,64	31,0	1,64
19	31,0	31,1	0,32	31,0	0,00
20	30,5	30,9	1,31	30,8	0,98
21	29,5	30,5	3,39	30,5	3,39
22	29,0	30,0	3,45	30,0	3,45
23	28,5	29,3	2,81	29,3	2,81
24	27,5	28,5	3,64	28,6	4,00
01	27,0	27,7	2,59	27,9	3,33
02	26,5	26,9	1,51	27,1	2,26
03	26,0	26,2	0,77	26,5	1,92
04	26,0	25,6	-1,54	25,9	-0,38
05	25,5	25,2	-1,18	25,5	0,00
06	25,0	25,0	0,00	25,3	1,20
07	25,0	24,9	-0,40	25,2	0,80
08	24,0	25,1	4,58	25,4	5,83
09	25,0	25,5	2,00	25,7	2,80
10	25,5	26,0	1,96	26,3	3,14
11	26,5	26,7	0,75	26,9	1,51
12	26,5	27,5	3,77	27,7	4,53
13	27,0	28,3	4,81	28,4	5,19
14	28,0	29,1	3,93	29,1	3,93
15	29,0	29,8	2,76	29,8	2,76
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 4,81\%$		$e_{\max} = 5,83\%$		
	$\bar{e} = 2,21\%$		$\bar{e} = 2,47\%$		
	$s_e = 0,5^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,4^{\circ}\text{C}$		

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 18 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	27,0	28,2	4,44	28,4	5,19
17	27,5	28,5	3,64	28,7	4,36
18	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
19	28,5	29,1	2,11	29,3	2,81
20	28,5	29,3	2,81	29,5	3,51
21	28,5	29,4	3,16	29,6	3,86
22	29,0	29,4	1,38	29,5	1,72
23	29,0	29,3	1,03	29,5	1,72
24	28,5	29,8	2,46	29,3	2,81
01	28,0	28,9	3,21	29,0	3,57
02	28,0	28,6	2,14	28,7	2,50
03	27,5	28,2	2,55	28,4	3,27
04	28,0	27,8	-0,71	28,0	0,00
05	27,5	27,5	0,00	27,6	0,36
06	27,0	27,1	0,37	27,3	1,11
07	27,0	26,9	-0,37	27,1	0,37
08	27,0	26,7	-1,11	26,9	-0,37
09	26,5	26,6	0,38	26,8	1,13
10	26,5	26,6	0,38	26,9	1,51
11	26,5	26,7	0,75	27,0	1,89
12	26,5	26,9	1,51	27,1	2,26
13	26,5	27,1	2,26	27,4	3,40
14	27,0	27,4	1,48	27,7	2,59
15	27,0	27,8	2,96	28,0	3,70
			ANALÍTICO	NUMÉRICO	
			$e_{\max} = 4,44\%$	$e_{\max} = 5,19\%$	
			$\bar{e} = 1,85\%$	$\bar{e} = 2,40\%$	
			$s_e = 0,4^{\circ}\text{C}$	$s_e = 0,4^{\circ}\text{C}$	

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 28 cm.					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	26,5	27,6	4,15	27,9	5,28
17	26,5	27,7	4,53	28,0	5,66
18	26,5	27,8	4,91	28,1	6,04
19	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
20	27,0	28,1	4,07	28,4	5,19
21	27,0	28,3	4,81	28,6	5,93
22	27,0	28,4	5,19	28,7	6,30
23	27,0	28,5	5,56	28,8	6,67
24	27,5	28,5	3,64	28,8	4,73
01	27,5	28,6	4,00	28,8	4,73
02	27,5	28,5	3,64	28,8	4,73
03	27,0	28,5	5,56	28,7	6,30
04	27,0	28,4	5,19	28,6	5,93
05	27,0	28,3	4,81	28,5	5,56
06	27,0	28,2	4,44	28,3	4,81
07	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
08	26,5	27,9	5,28	28,0	5,66
09	26,5	27,8	4,91	27,9	5,28
10	26,5	27,6	4,15	27,9	5,28
11	26,5	27,5	3,77	27,8	4,91
12	26,0	27,5	5,77	27,7	6,54
13	26,0	27,5	5,77	27,7	6,54
14	26,0	27,5	5,77	27,7	6,54
15	26,0	27,5	5,77	27,8	6,92
	ANALÍTICO		NUMÉRICO		
	$e_{\max} = 5,77\%$		$e_{\max} = 6,92\%$		
	$\bar{e} = 4,88\%$		$\bar{e} = 5,78\%$		
	$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$		$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$		

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 38 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
17	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
18	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
19	26,5	27,8	4,91	28,1	6,04
20	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
21	26,5	27,9	5,28	28,2	6,42
22	26,5	28,0	5,66	28,3	6,79
23	26,5	28,0	5,66	28,4	7,17
24	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
01	26,5	28,1	6,04	28,5	7,55
02	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
03	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
04	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
05	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
06	26,5	28,2	6,42	28,5	7,55
07	26,5	28,2	6,42	28,4	7,17
08	26,5	28,1	6,04	28,4	7,17
09	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
10	26,5	28,1	6,04	28,3	6,79
11	26,5	28,0	5,66	28,2	6,42
12	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
13	26,5	27,9	5,28	28,1	6,04
14	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
15	26,5	27,8	4,91	28,0	5,66
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 6,42\%$	$\bar{e} = 5,68\%$	$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$	$e_{\max} = 7,55\%$	$\bar{e} = 6,67\%$	$s_e = 0,2^{\circ}\text{C}$

30/31 AGOSTO - 1983

PROFUNDIDADE 58 cm					
HORA	TEX °C	TMA °C	e %	TEF °C	e %
16	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
17	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
18	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
19	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
20	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
21	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
22	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
23	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
24	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
01	26,0	28,0	7,69	28,1	8,08
02	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
03	26,0	28,0	7,69	28,2	8,46
04	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
05	26,0	28,0	7,69	28,3	8,85
06	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
07	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
08	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
09	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
10	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
11	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
12	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
13	26,0	28,0	7,69	28,5	9,62
14	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
15	26,0	28,0	7,69	28,4	9,23
ANALÍTICO			NUMÉRICO		
$e_{\max} = 7,69\%$			$e_{\max} = 9,62\%$		
$\bar{e} = 7,69\%$			$\bar{e} = 8,83\%$		
$s_e = - {}^{\circ}\text{C}$			$s_e = 0,2 {}^{\circ}\text{C}$		

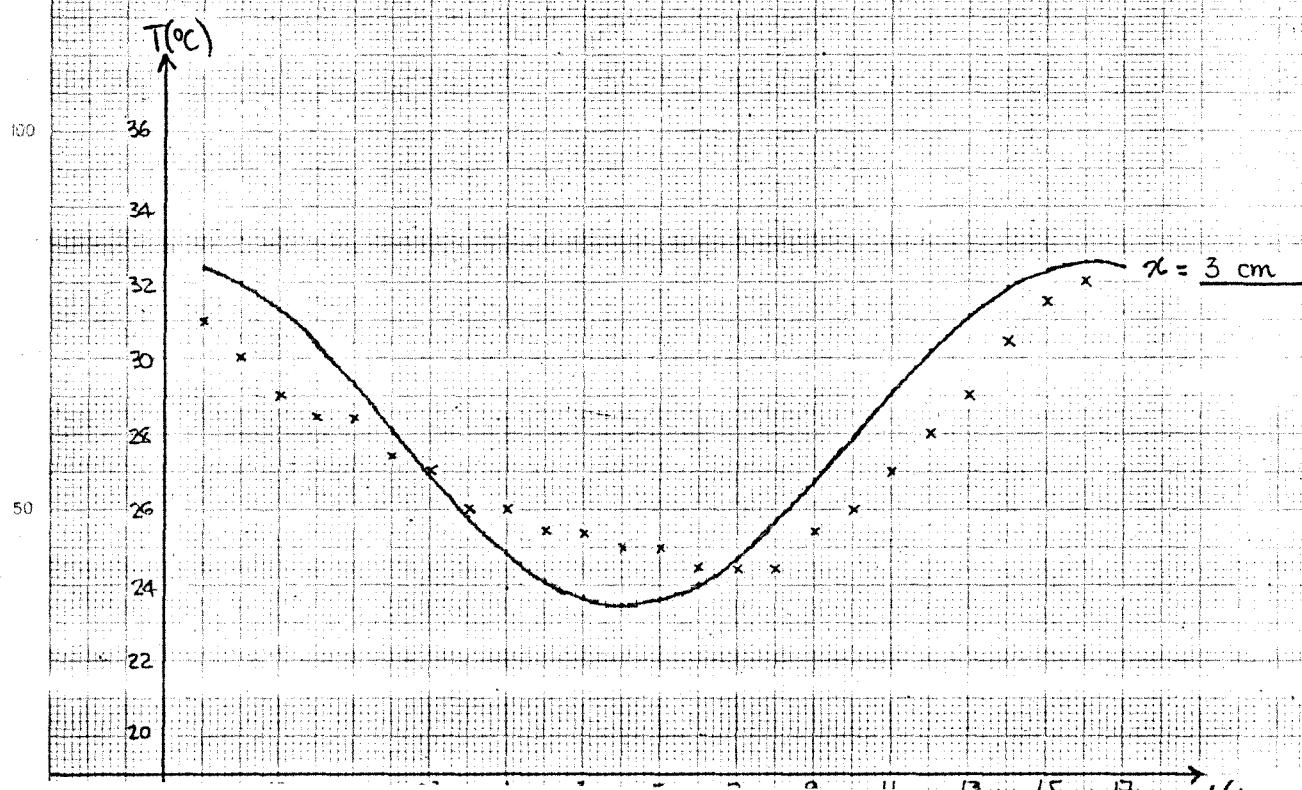
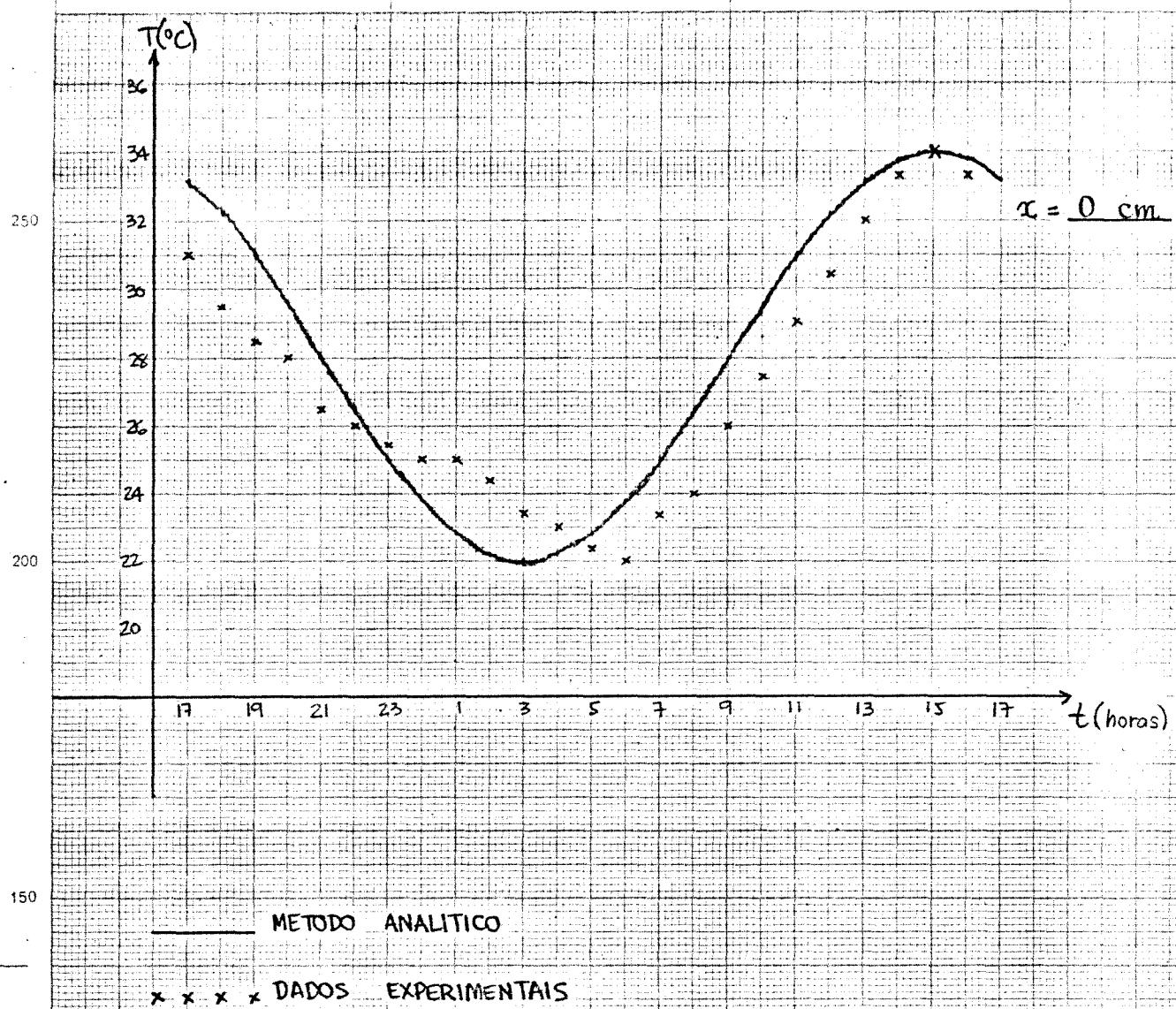
APÉNDICE C

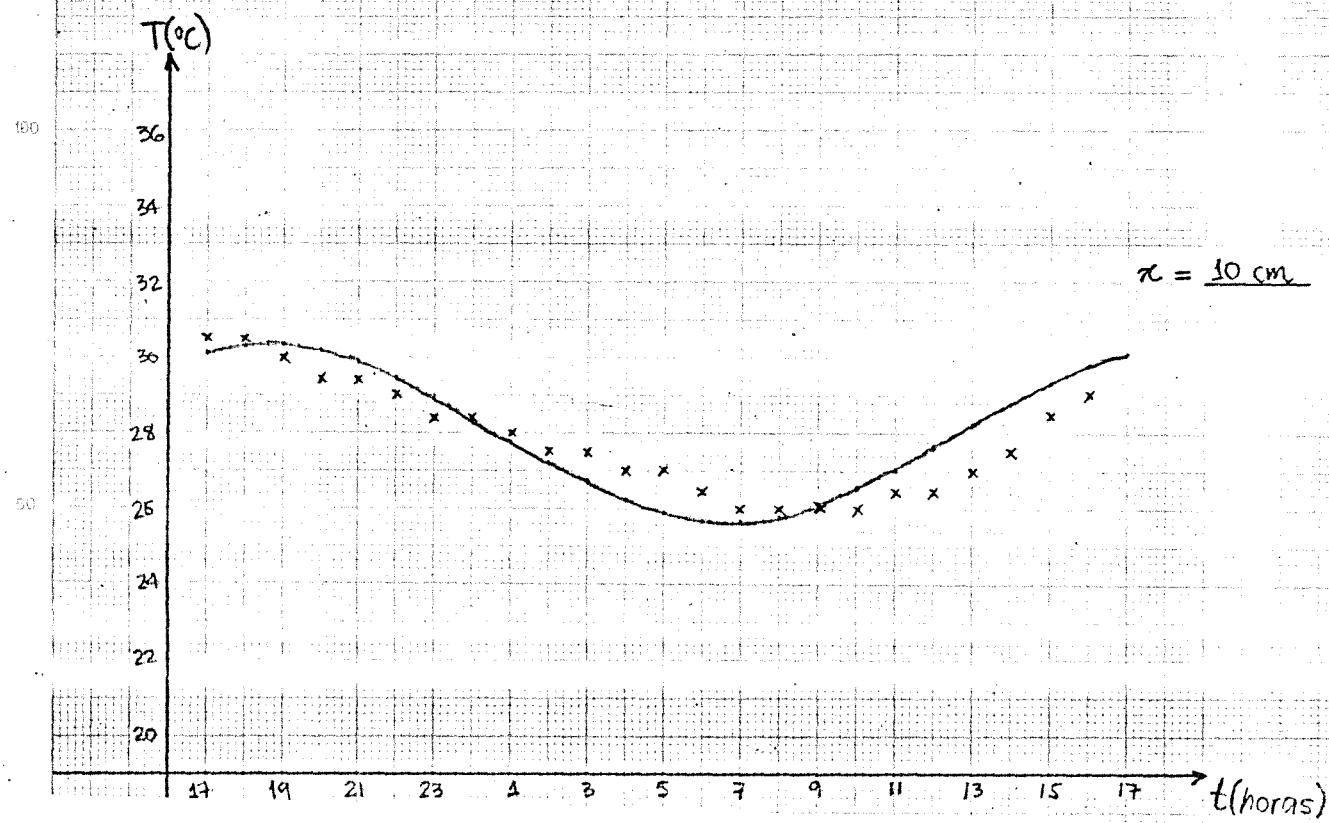
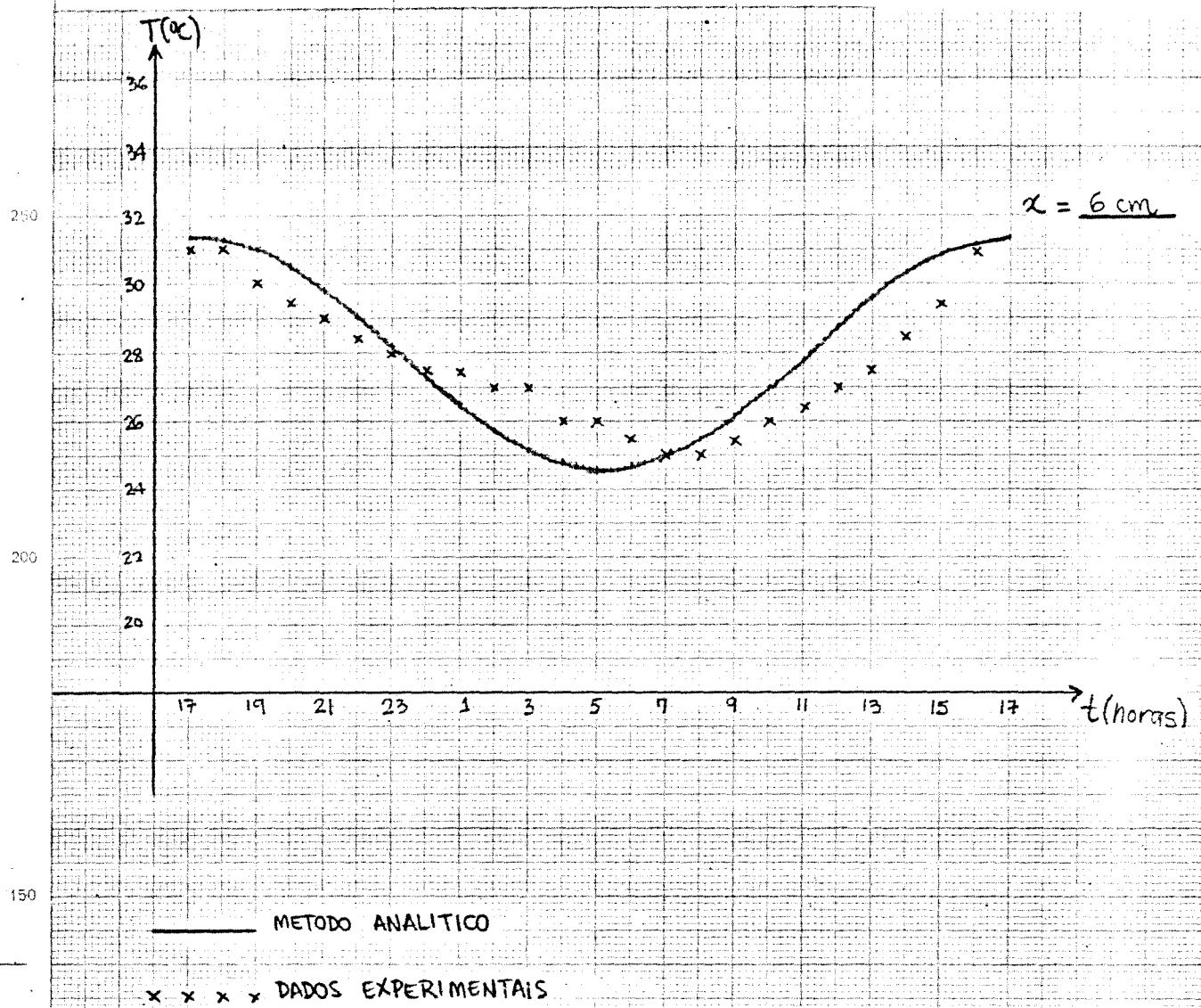
GRÁFICOS

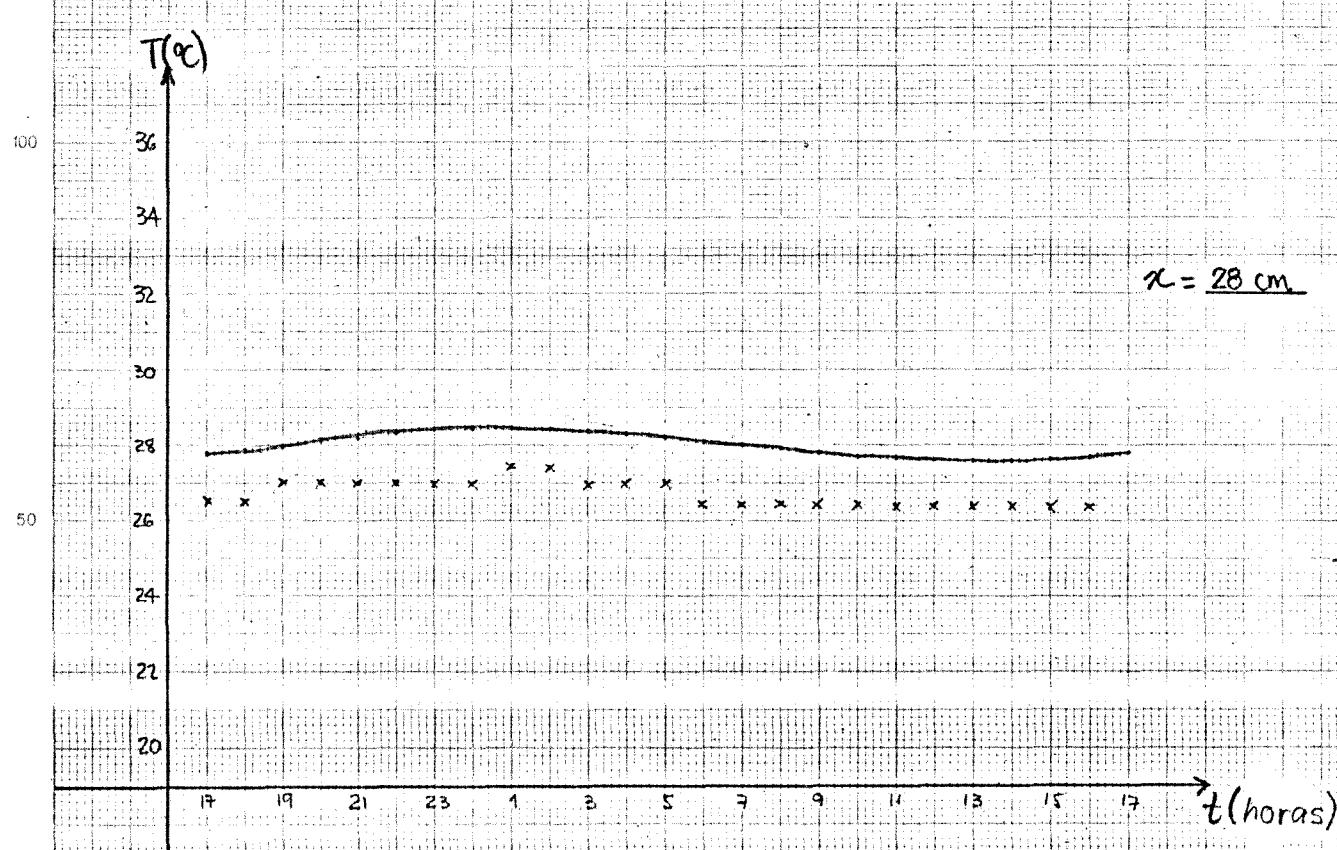
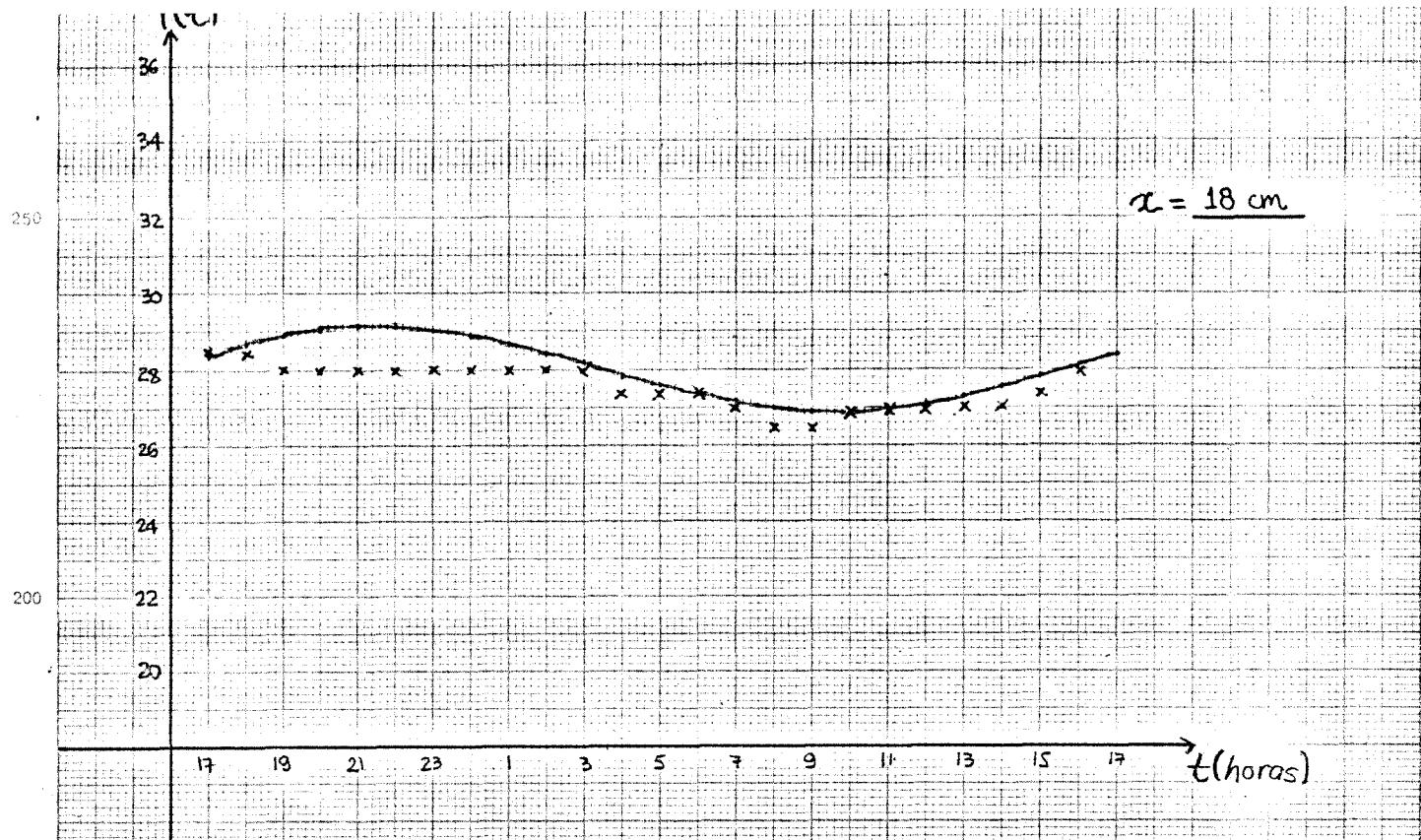
GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

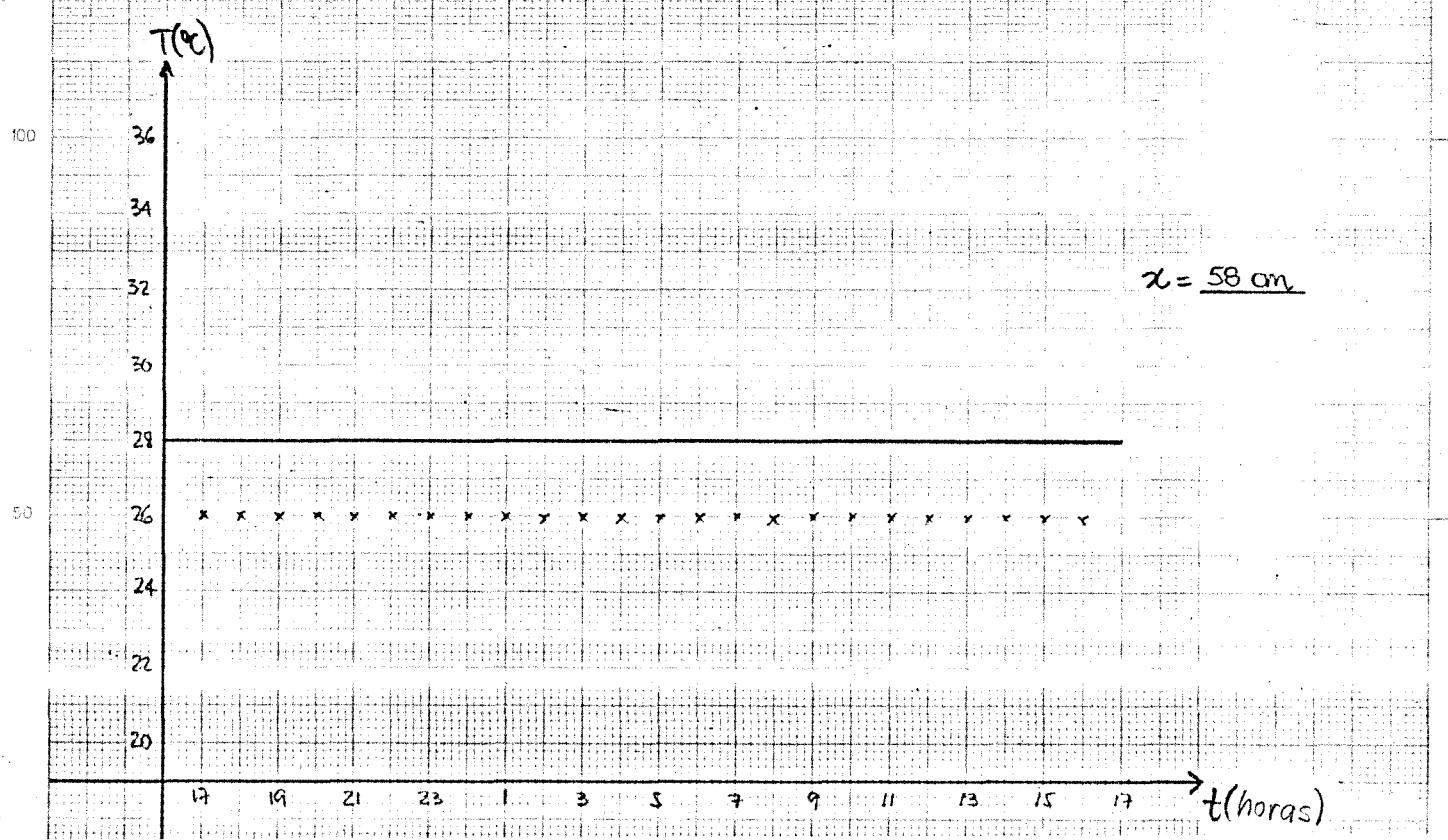
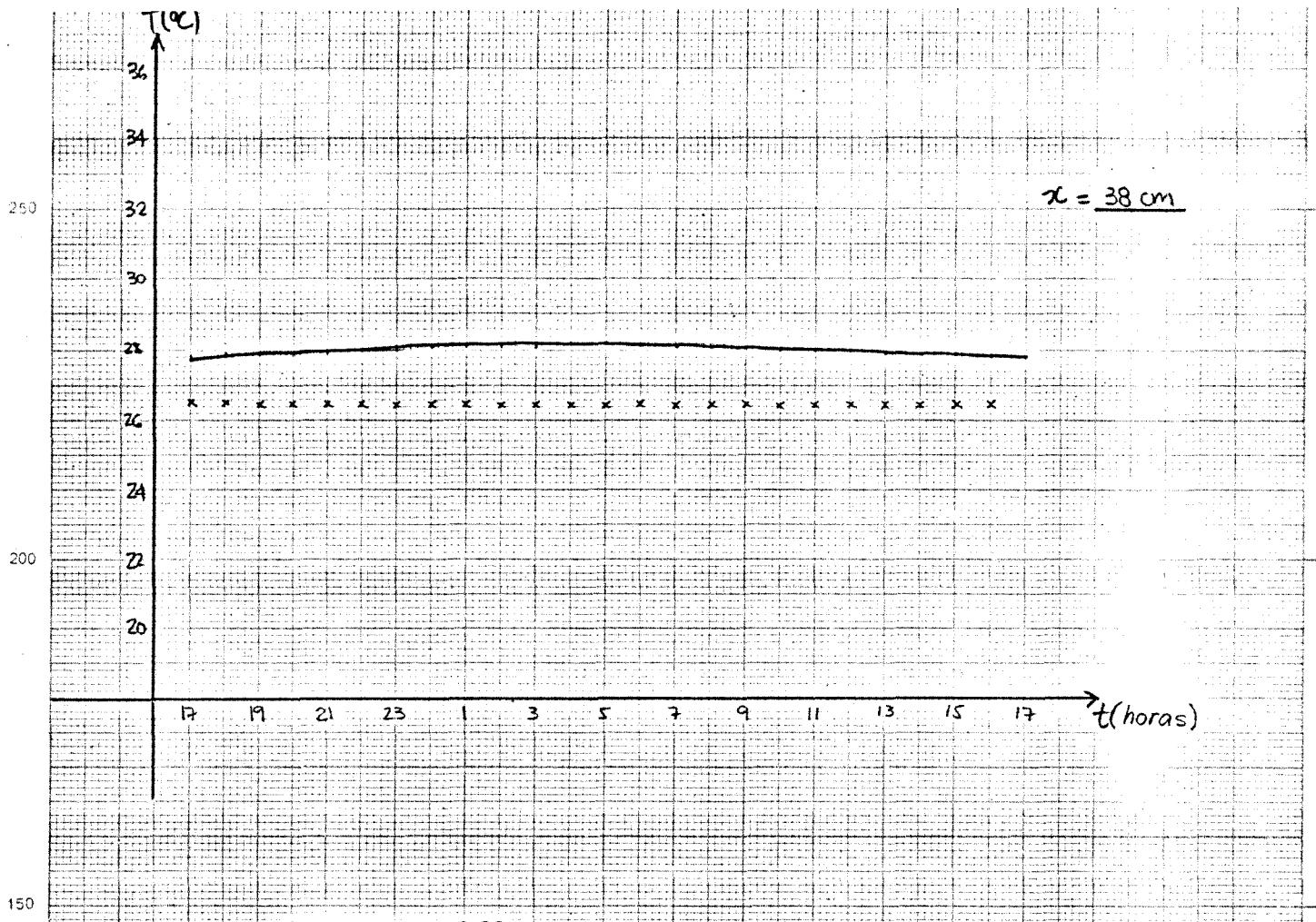
15-16 DE AGOSTO DE 1983

Curvas Temperatura versus Tempo esperadas pelo método analítico e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.





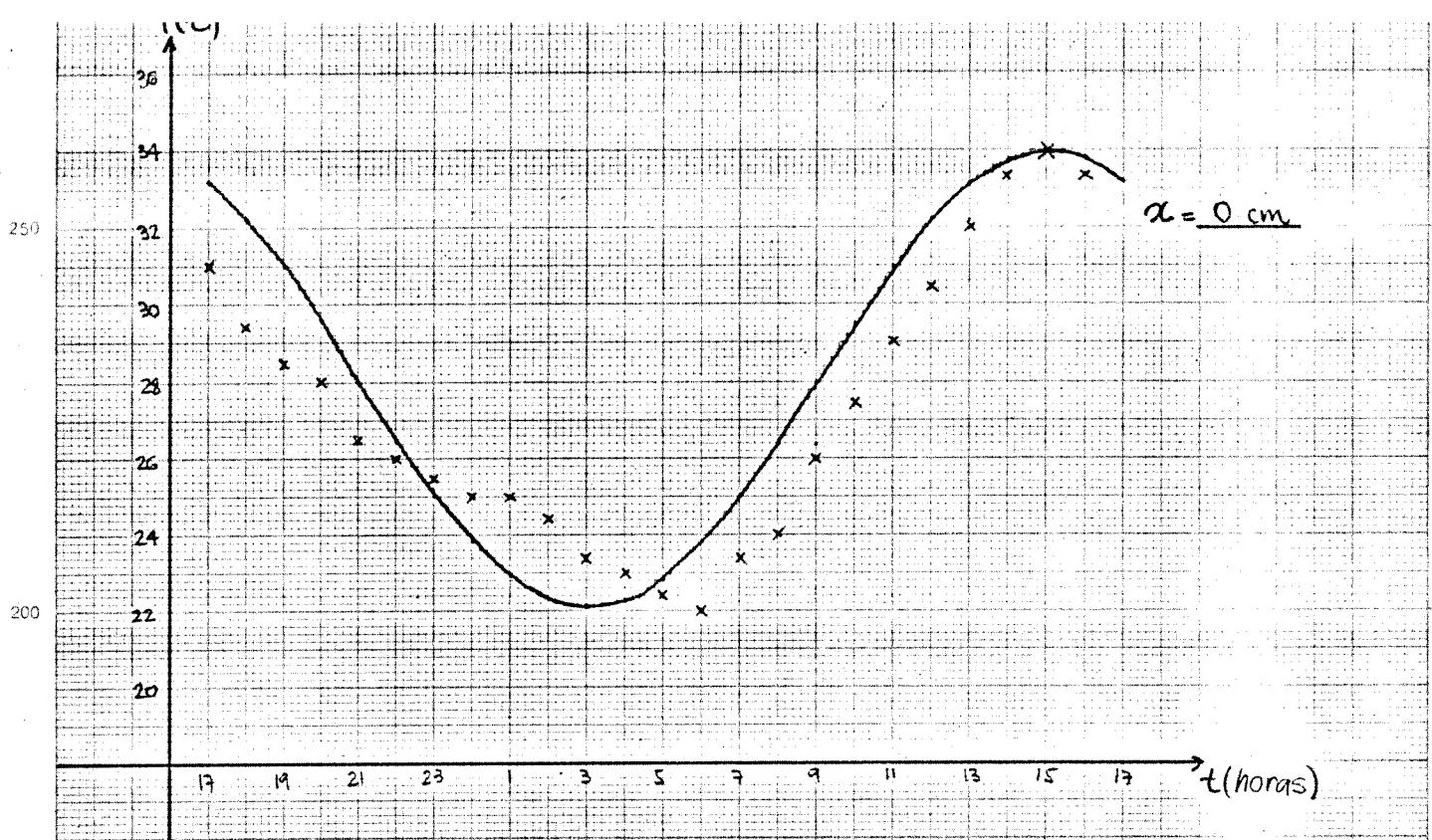




GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

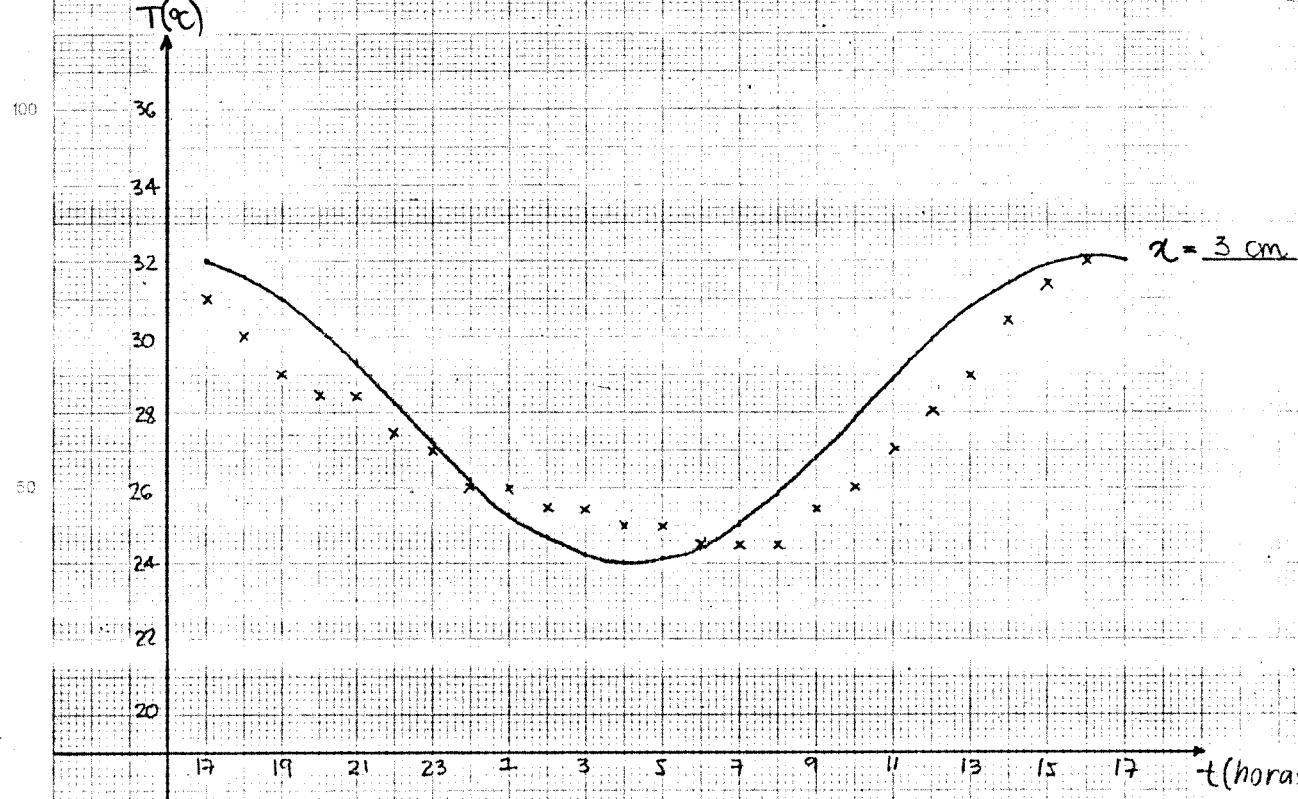
15-16 DE AGOSTO DE 1983

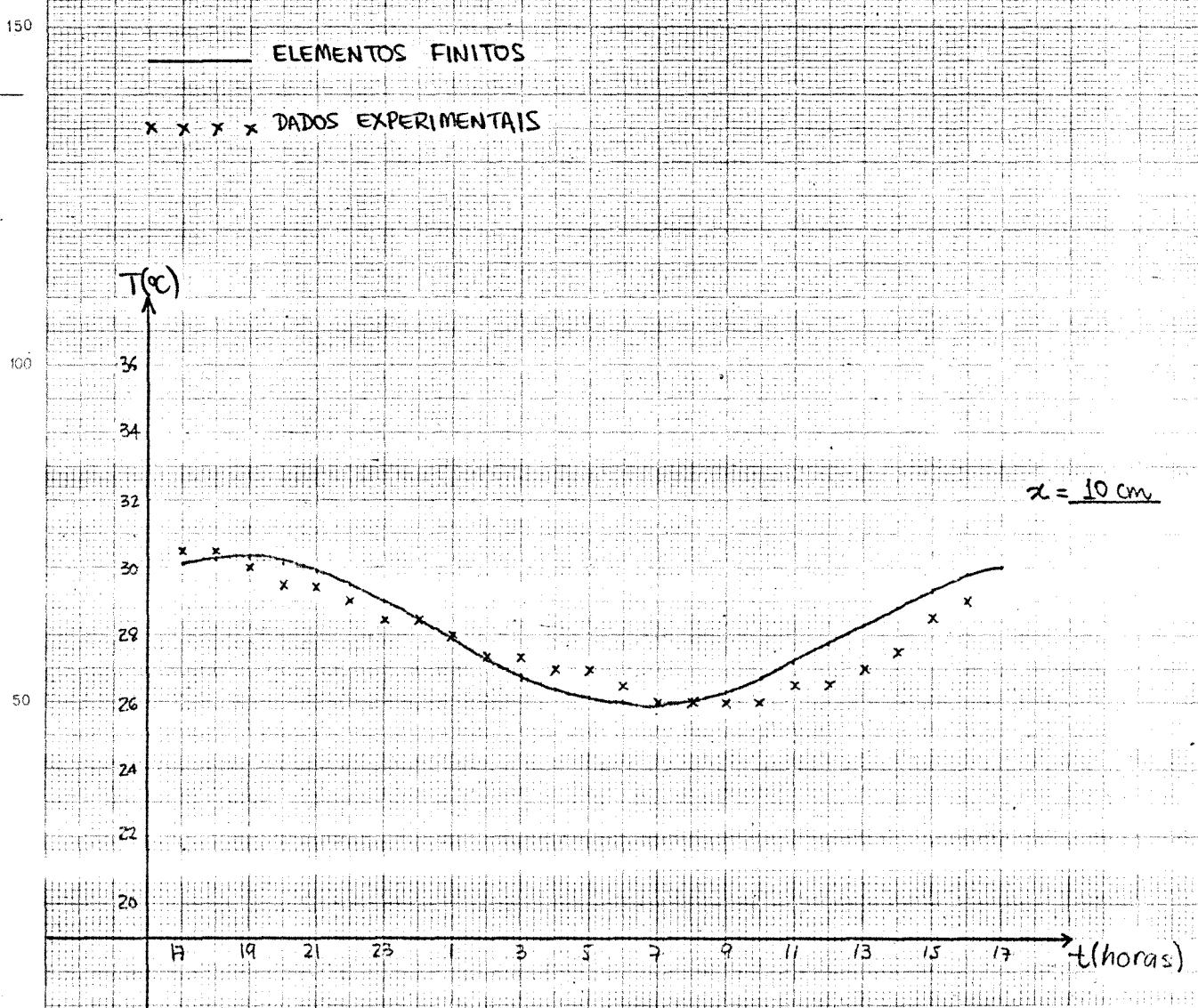
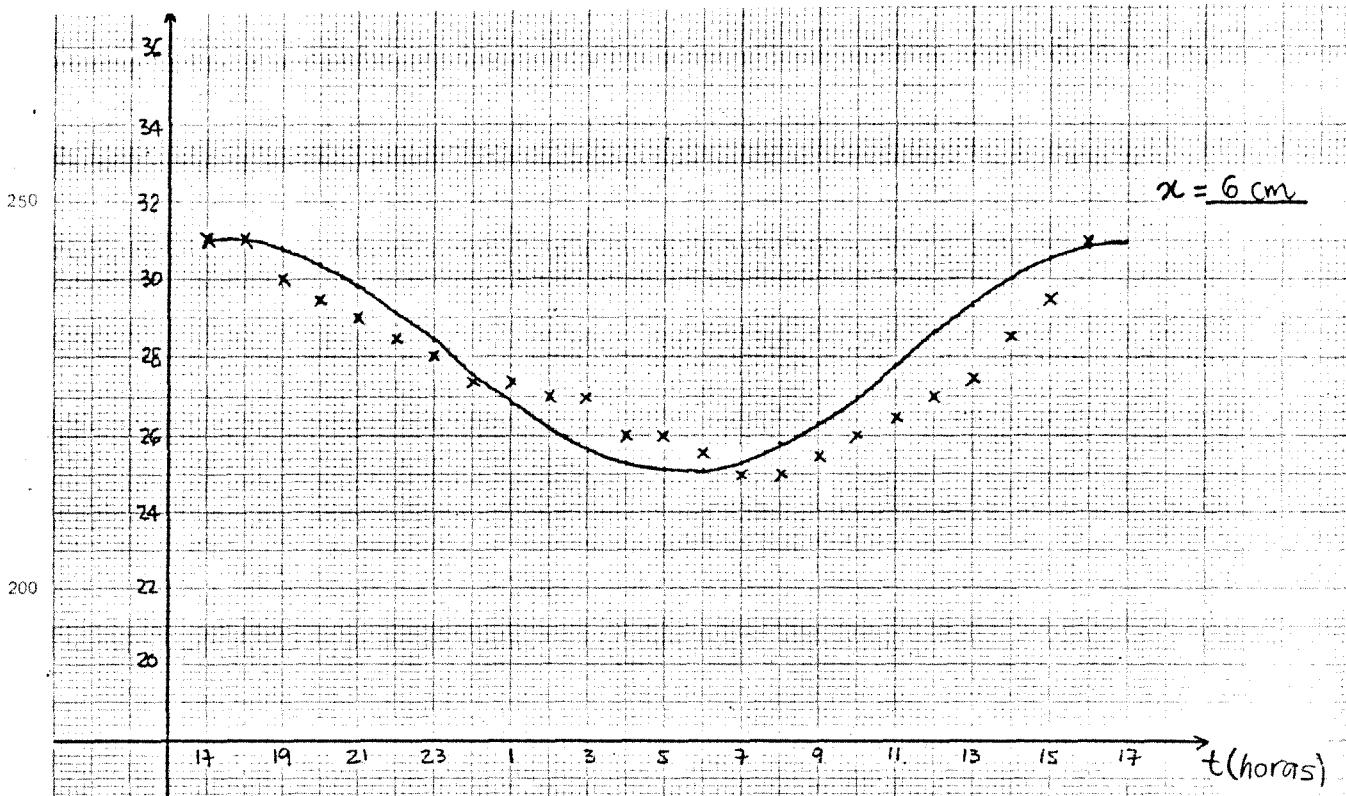
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas por elementos finitos e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.

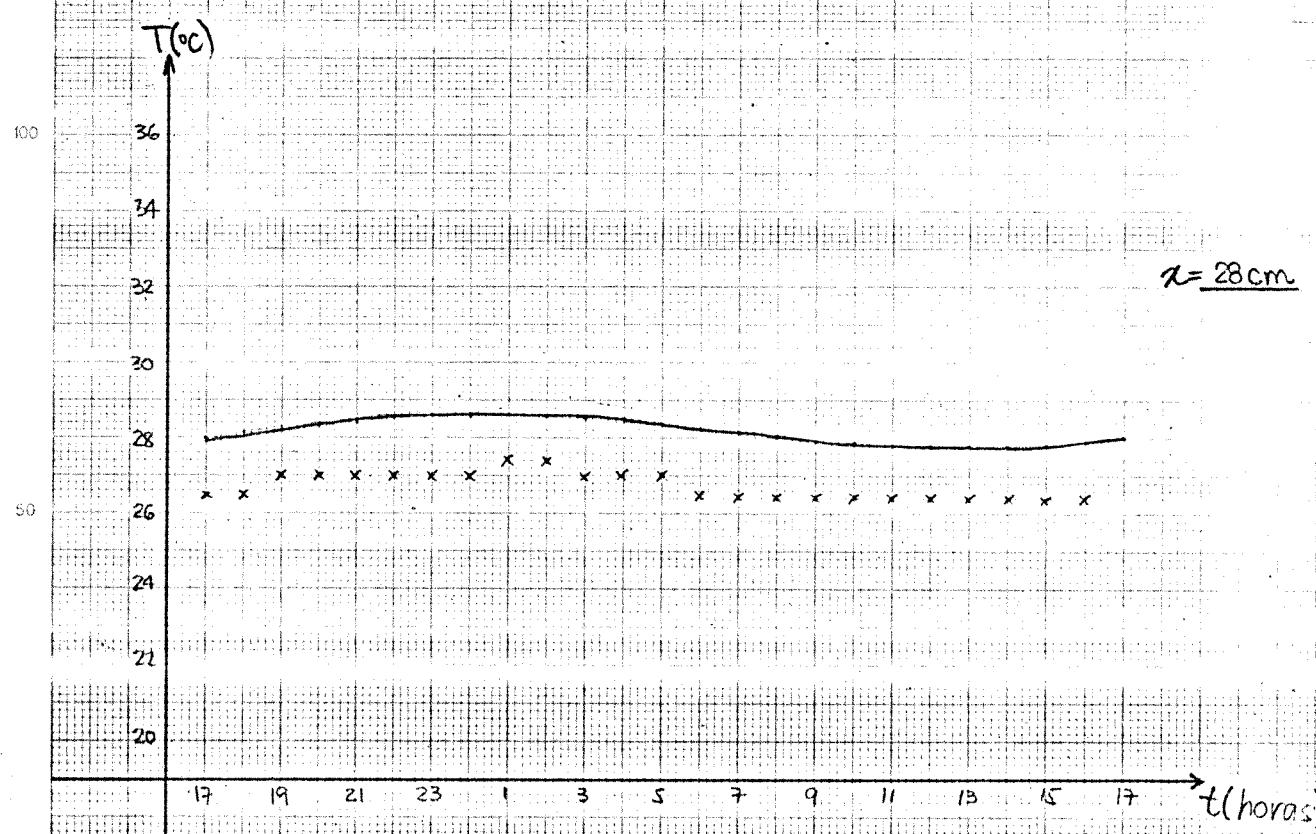
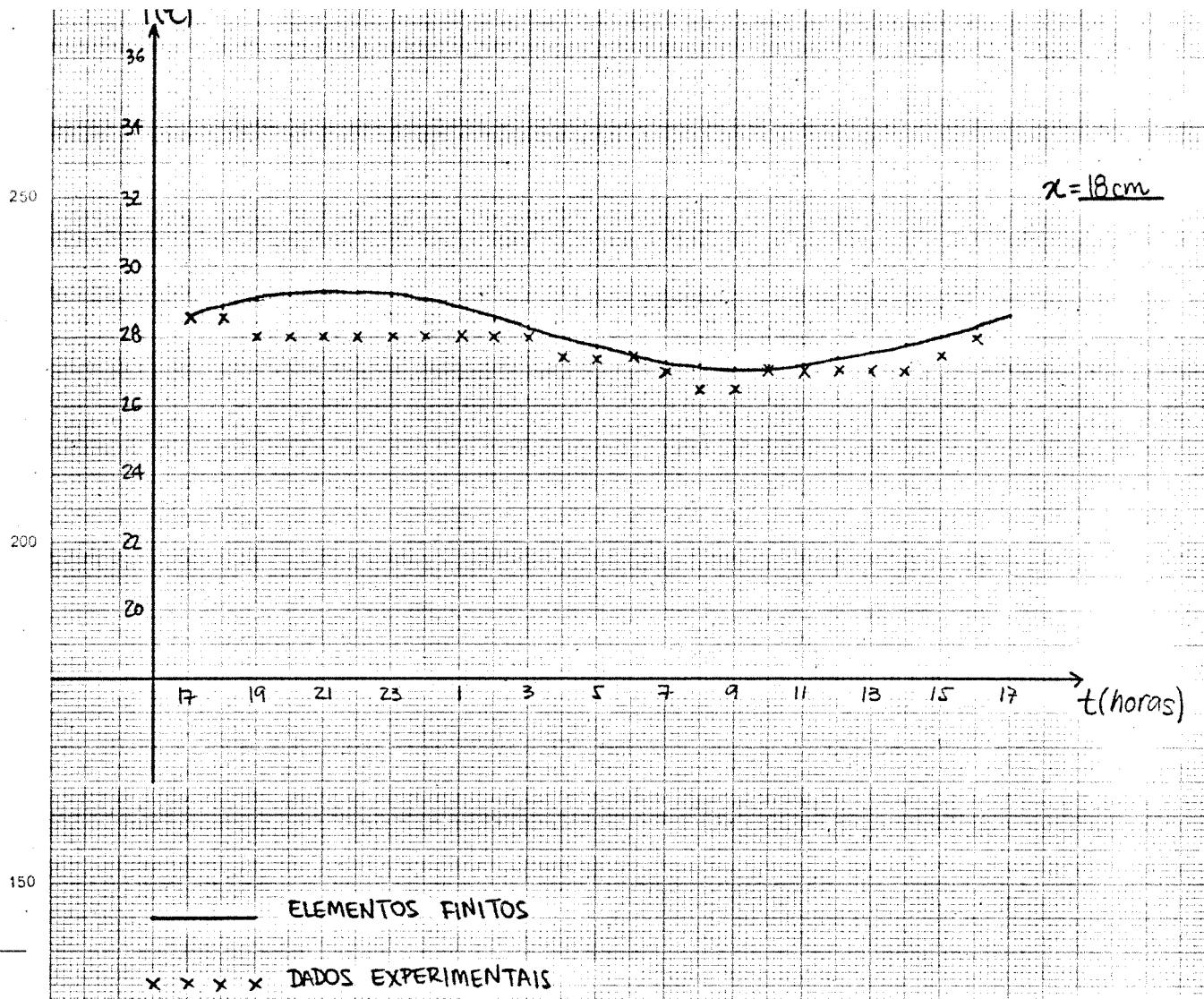


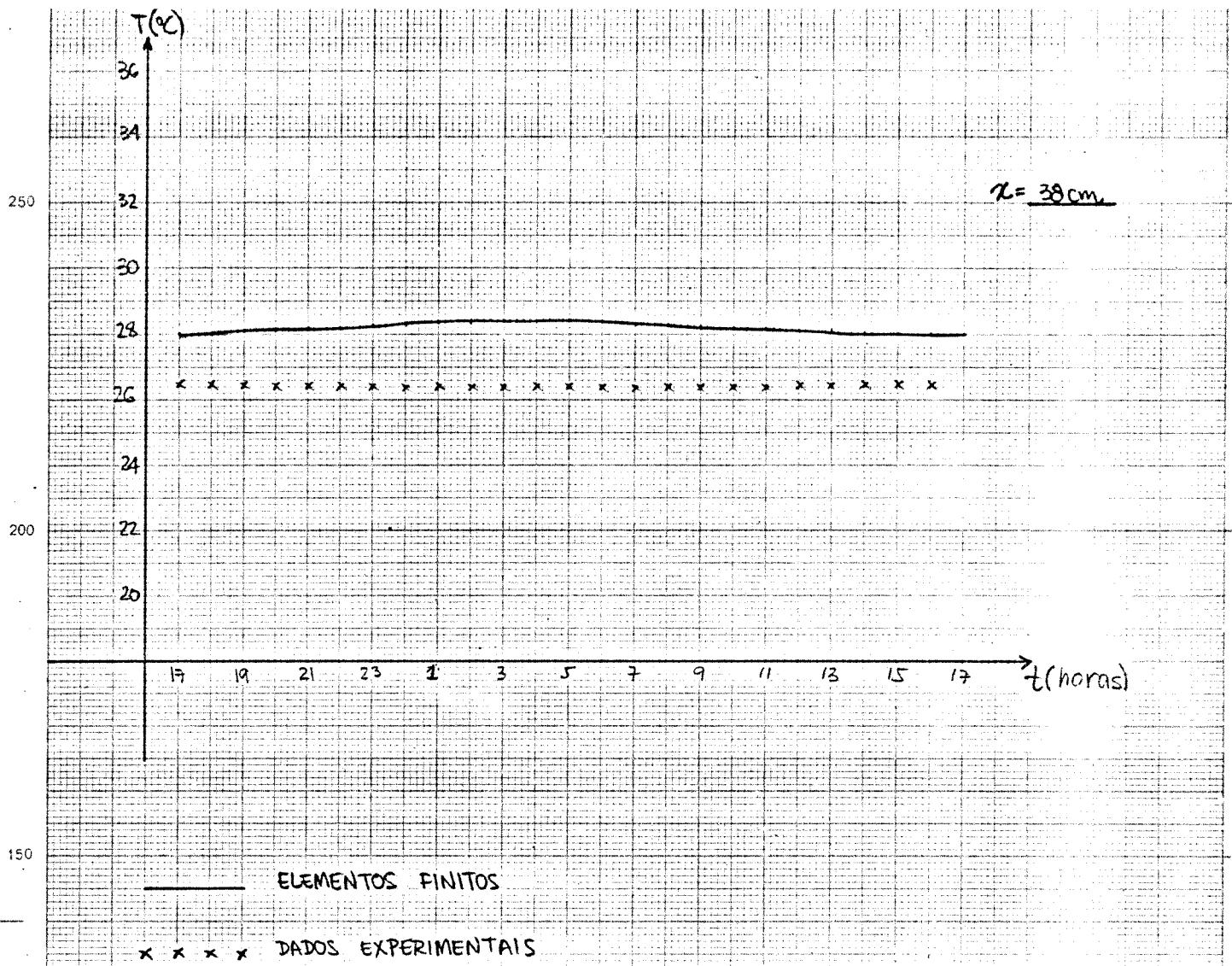
ELEMENTOS FINITOS

× × × × DADOS EXPERIMENTAIS





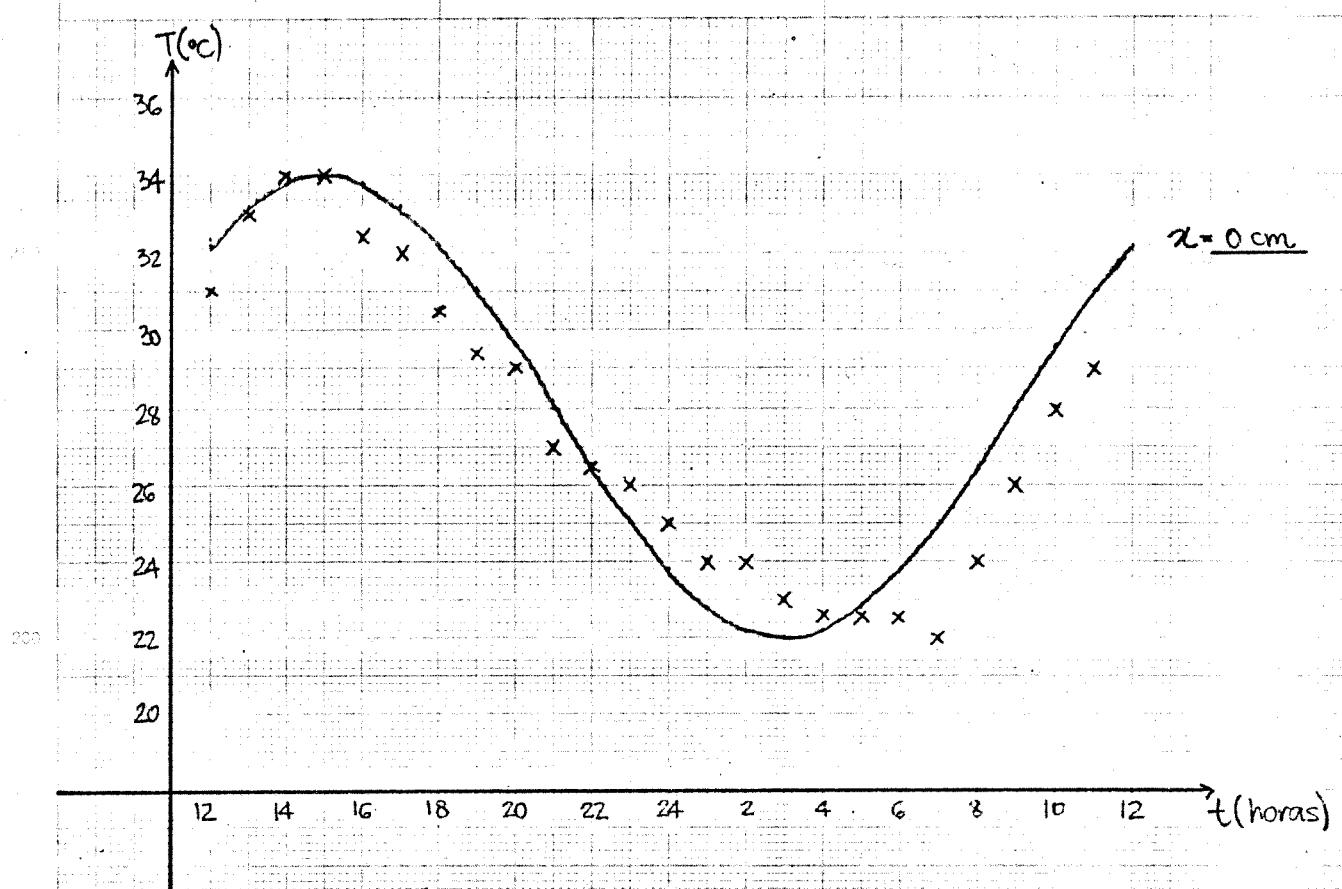




GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

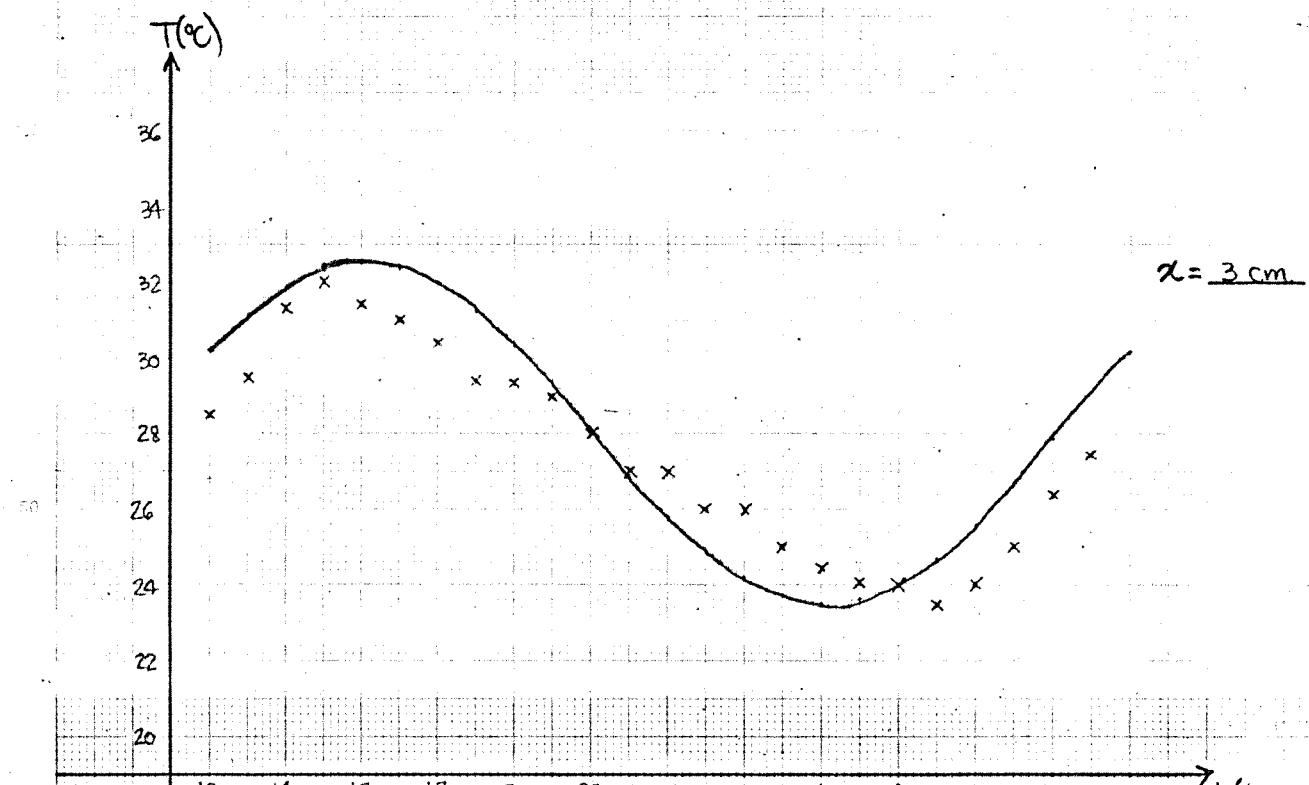
18-19 DE AGOSTO DE 1983

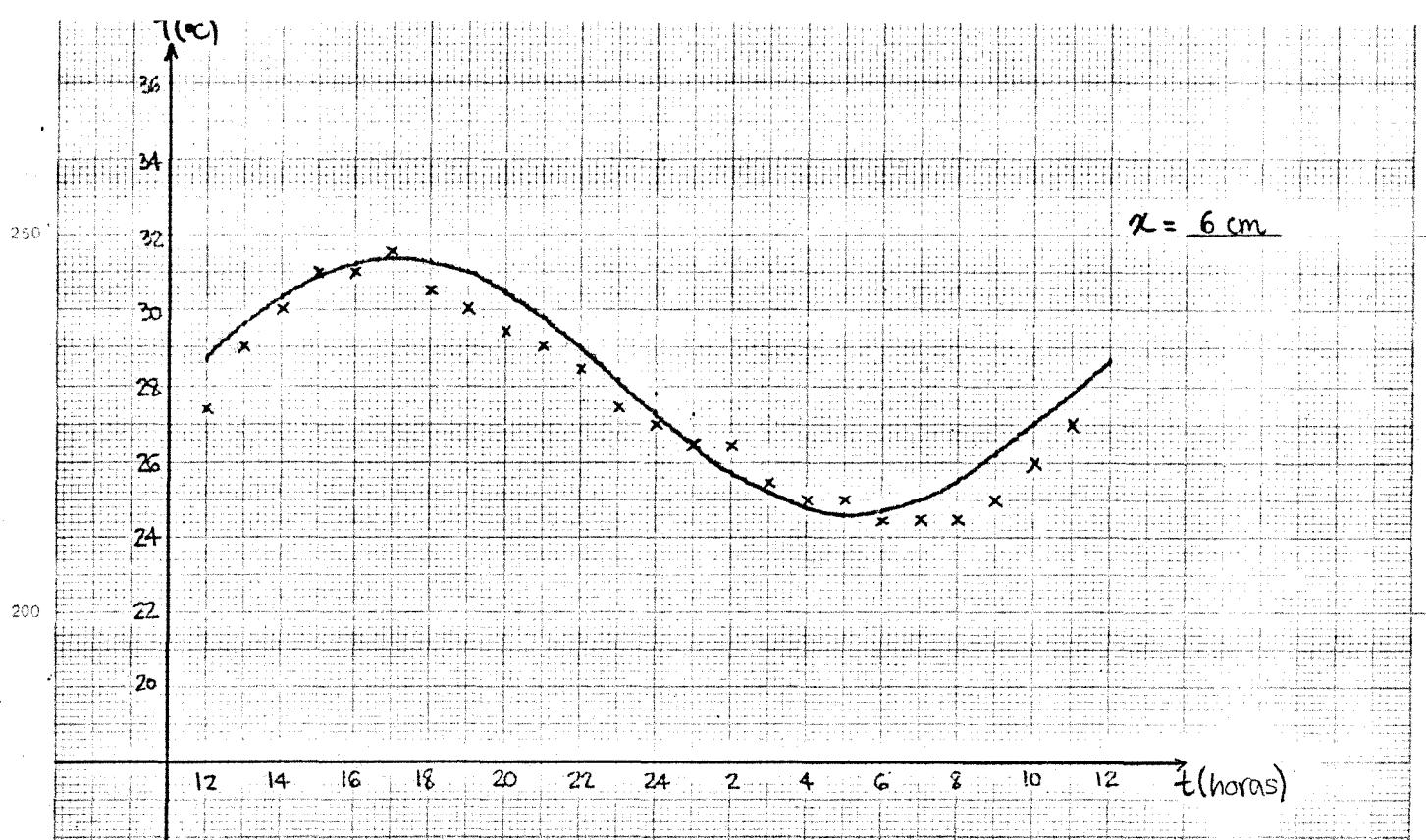
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas pelo método analítico e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.



METODO ANALITICO

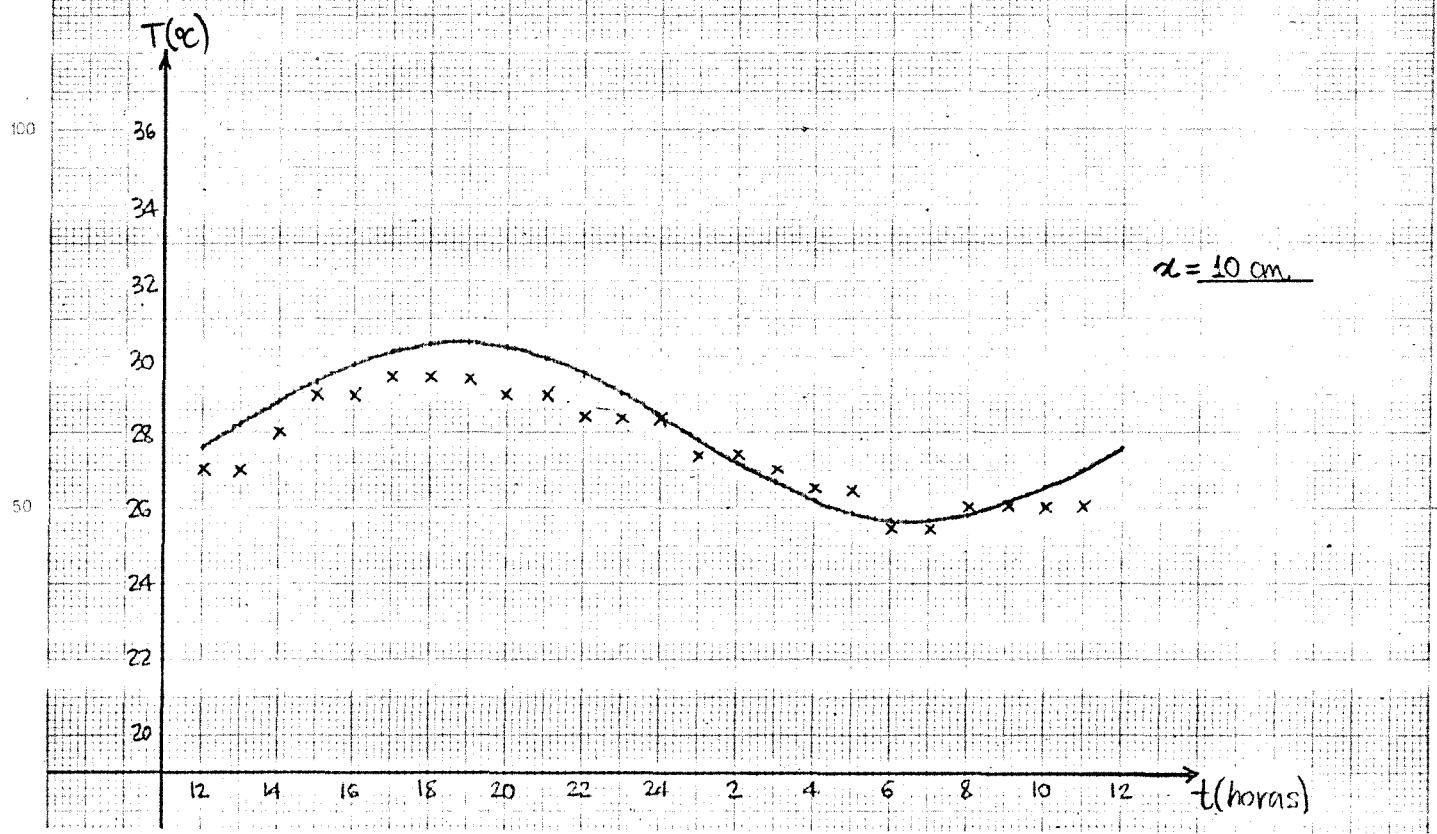
XX X Y DADOS EXPERIMENTAIS

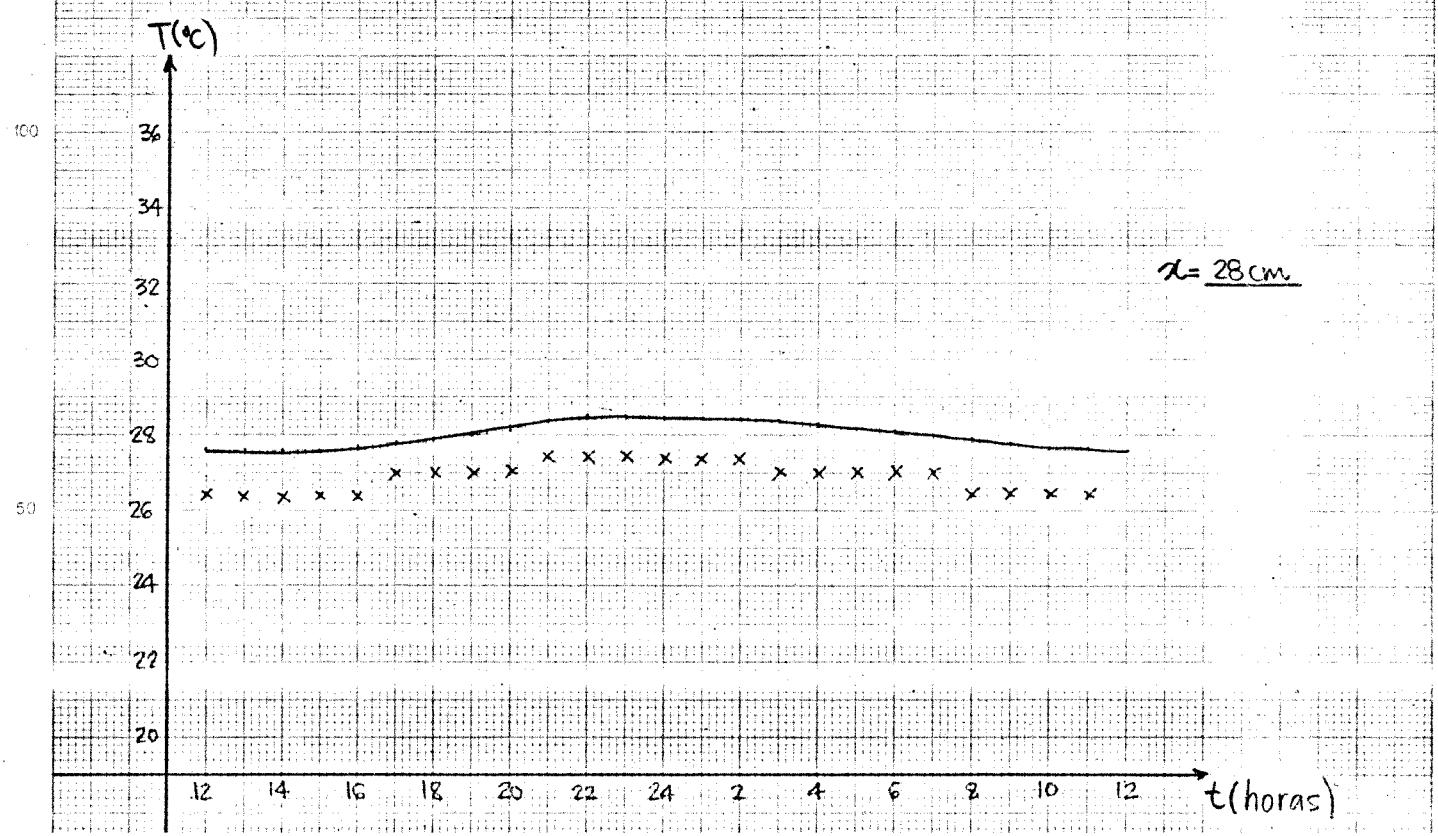
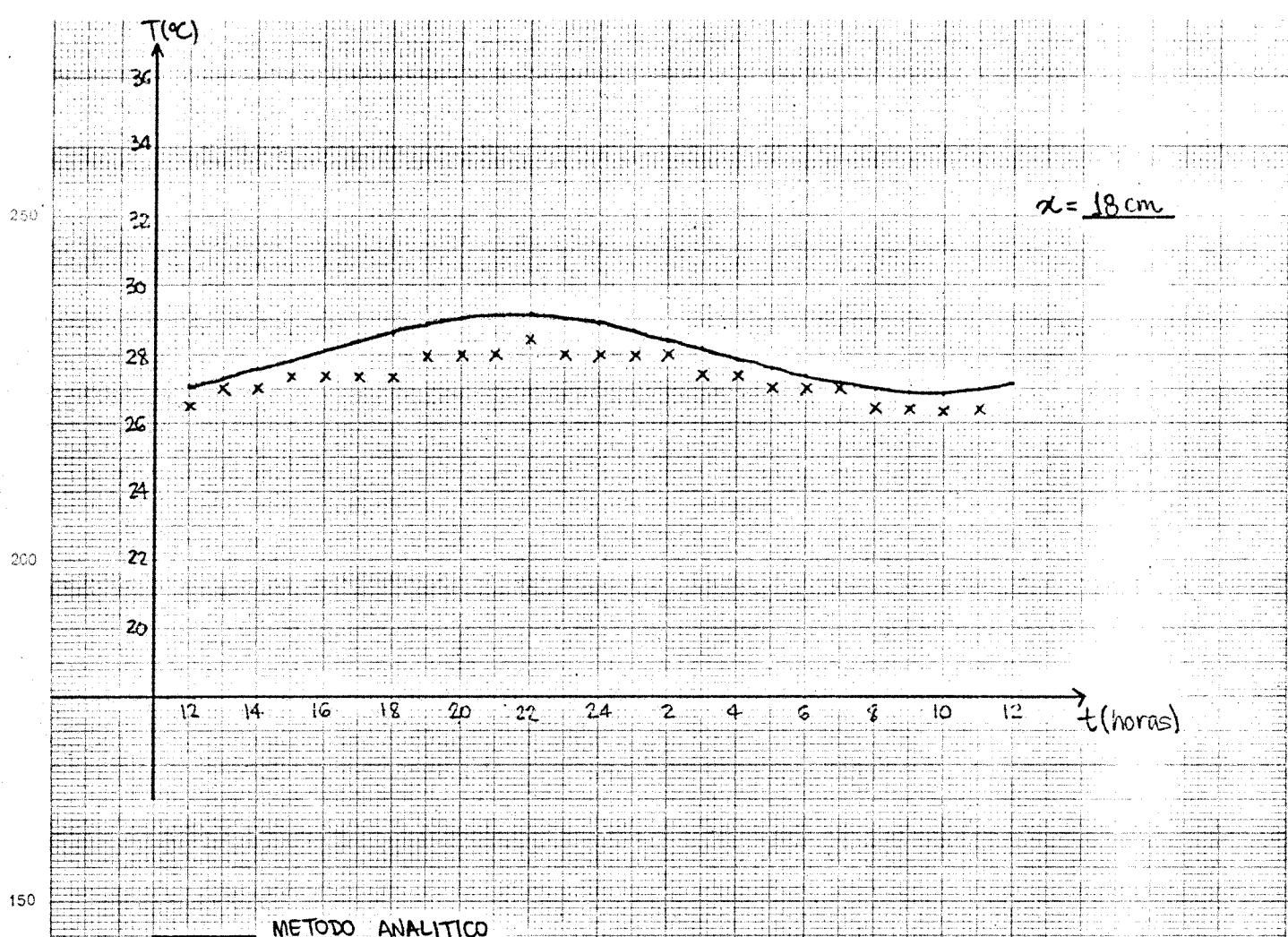




METODO ANALITICO

$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS

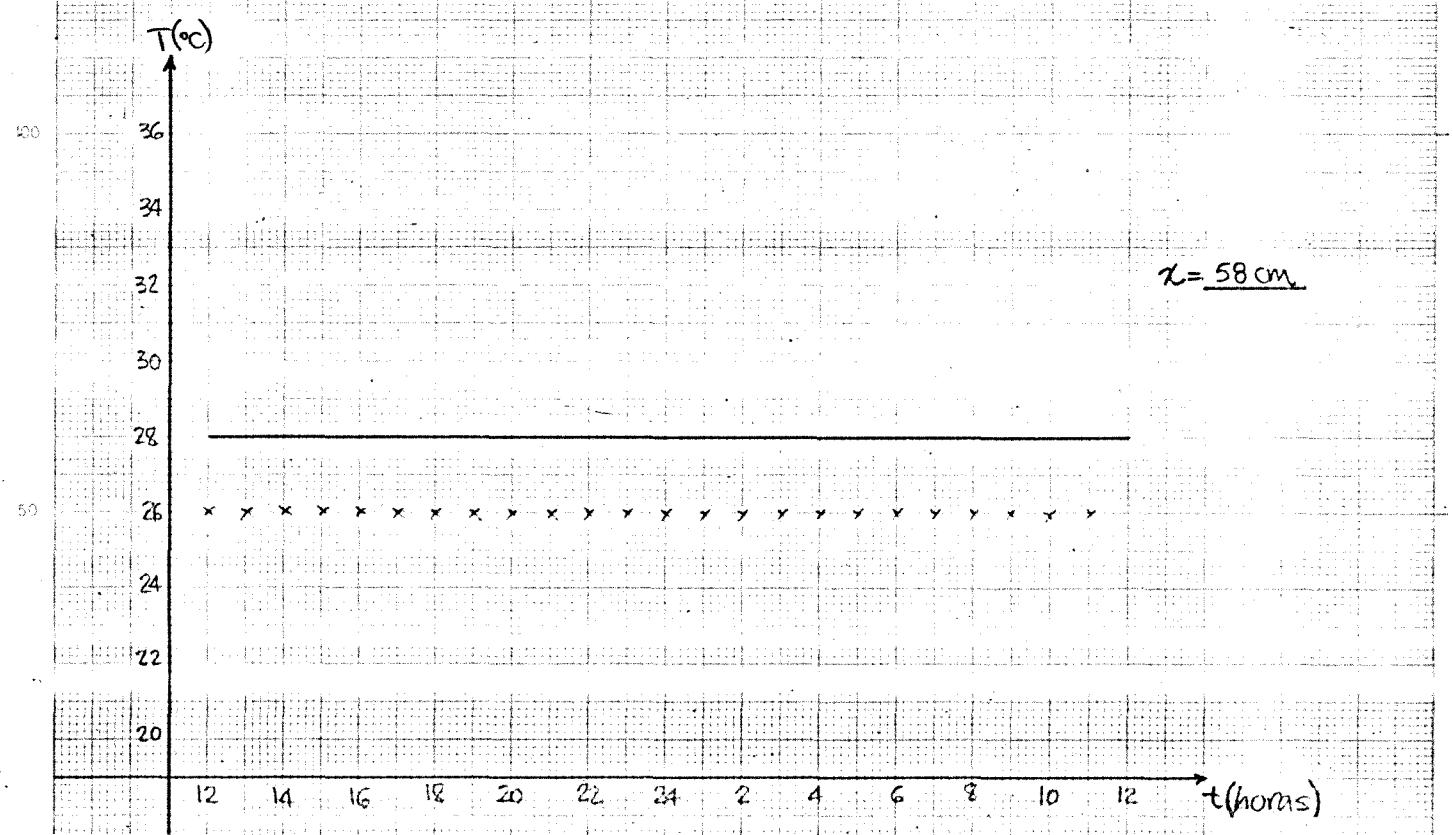






METODO ANALITICO

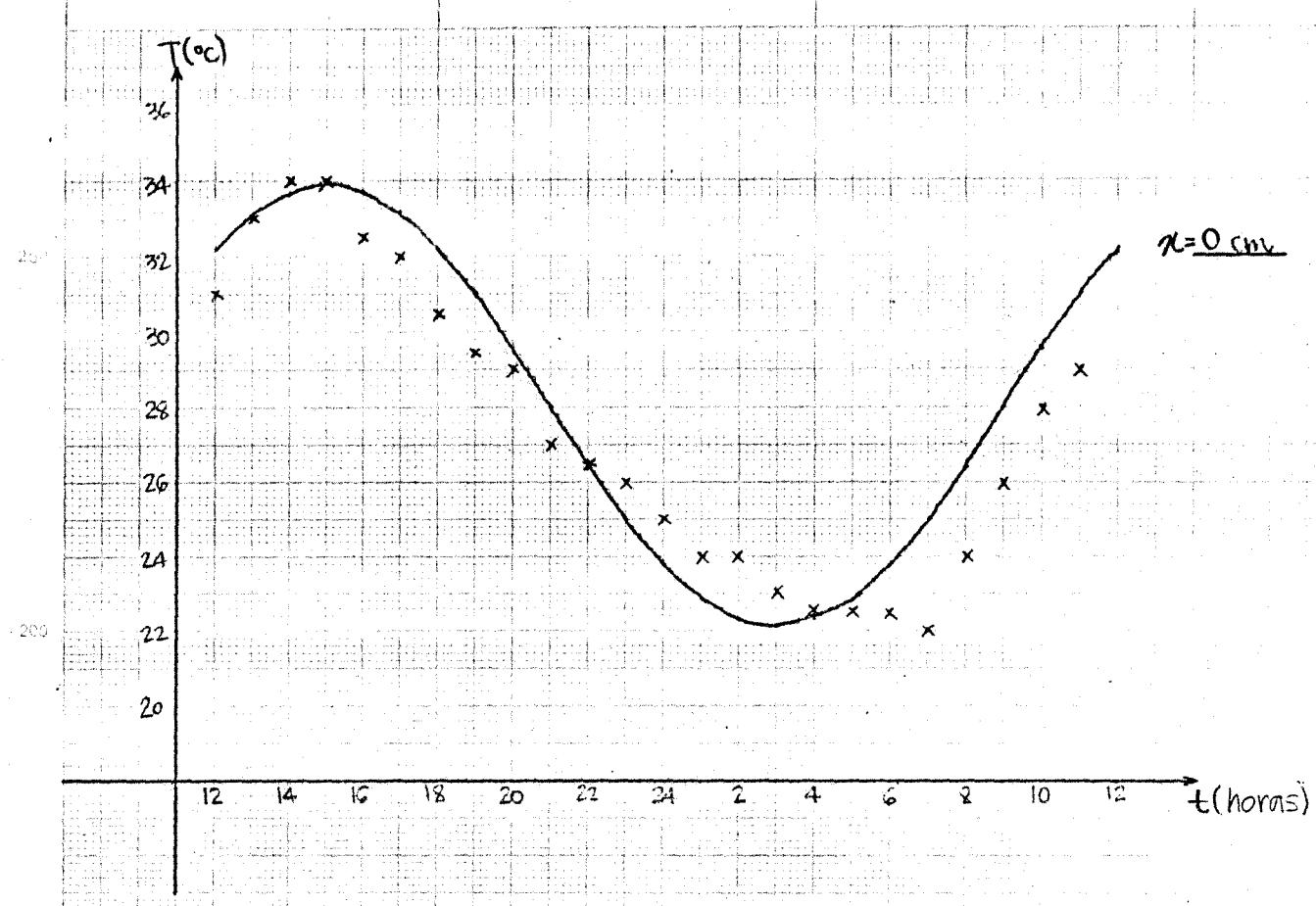
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS



GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

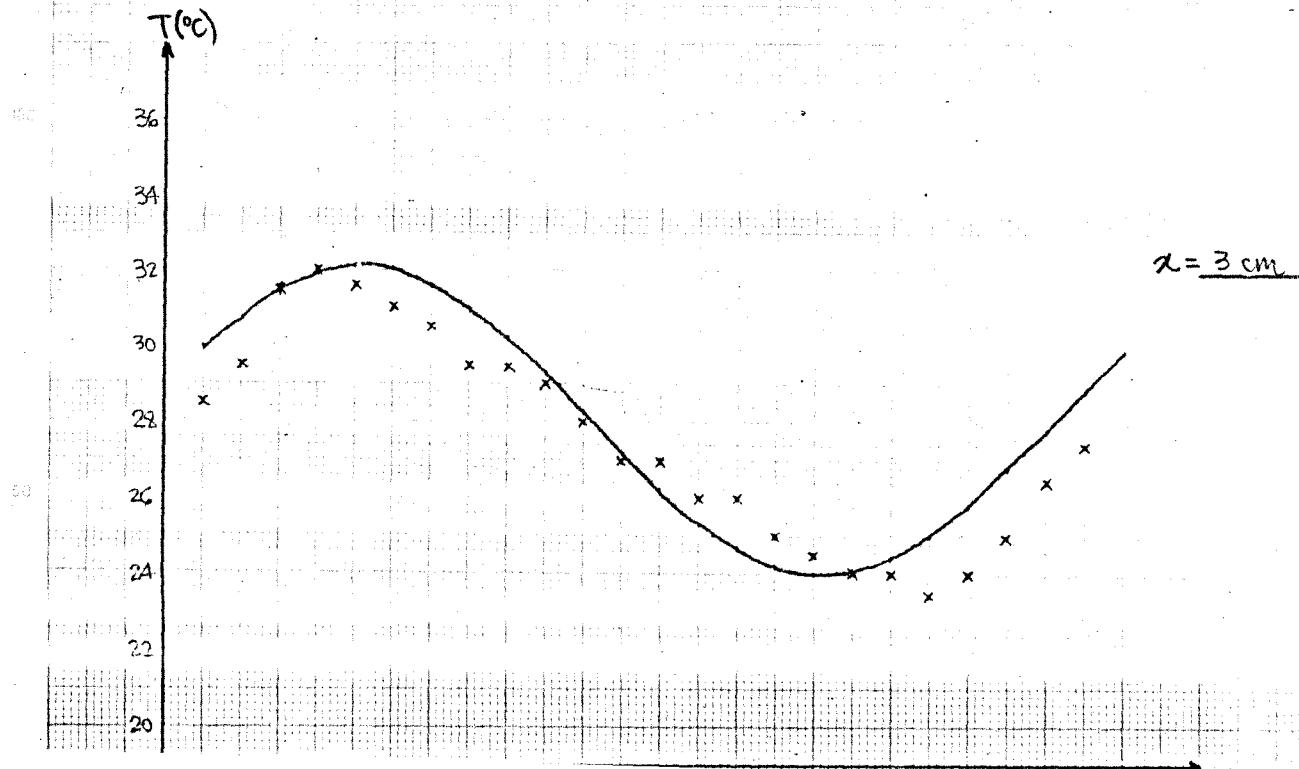
18-19 DE AGOSTO DE 1983

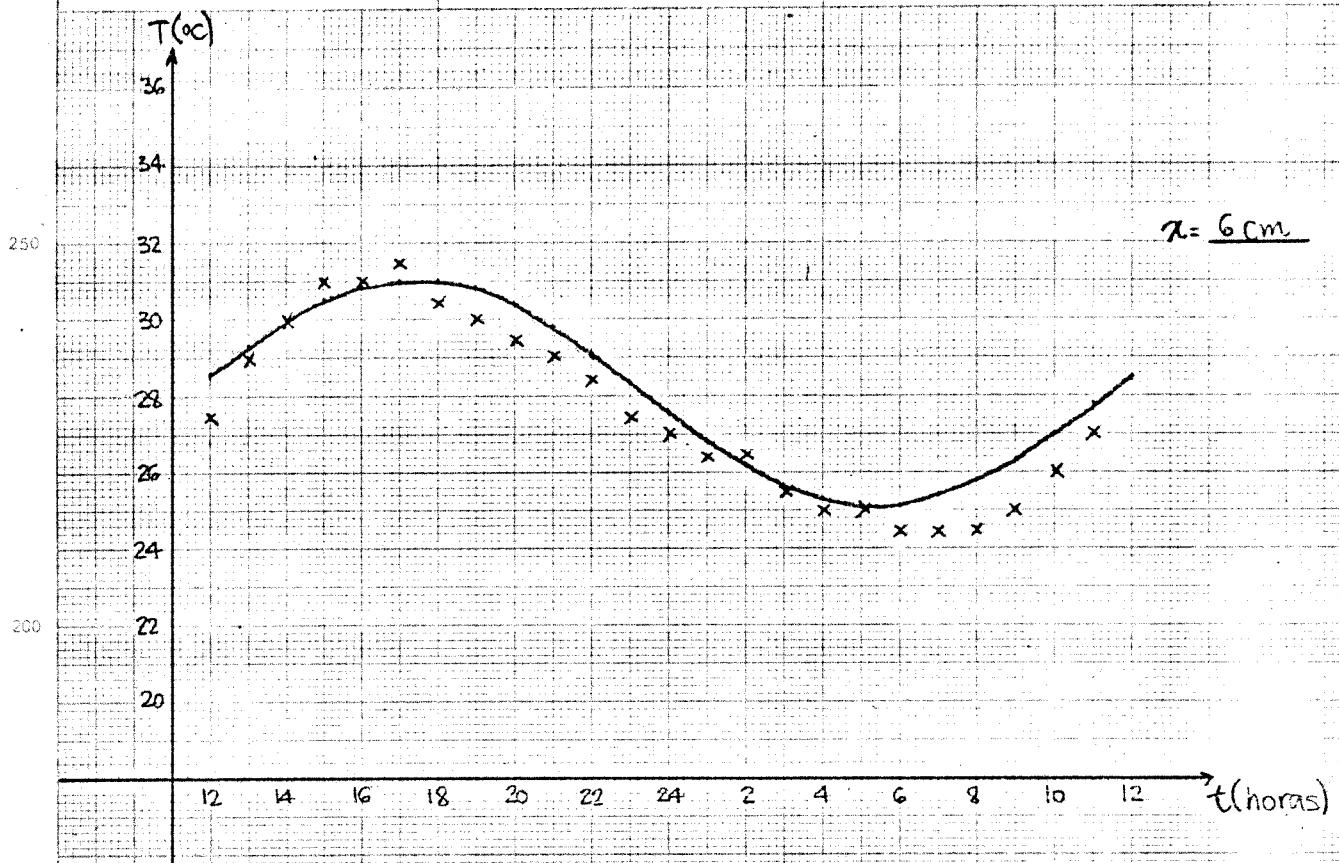
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas por elemen
tos finitos e dados experimentais para as profundida
des 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.



ELEMENTOS FINITOS

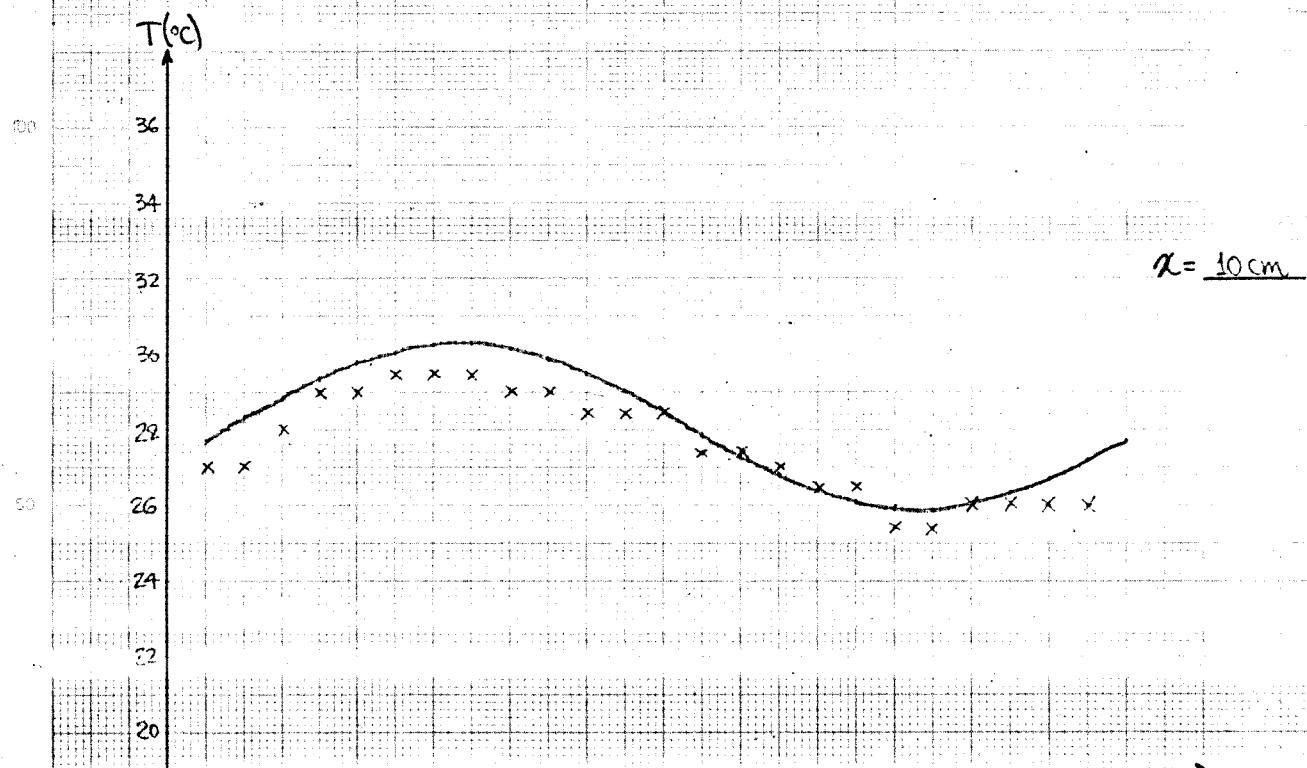
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS

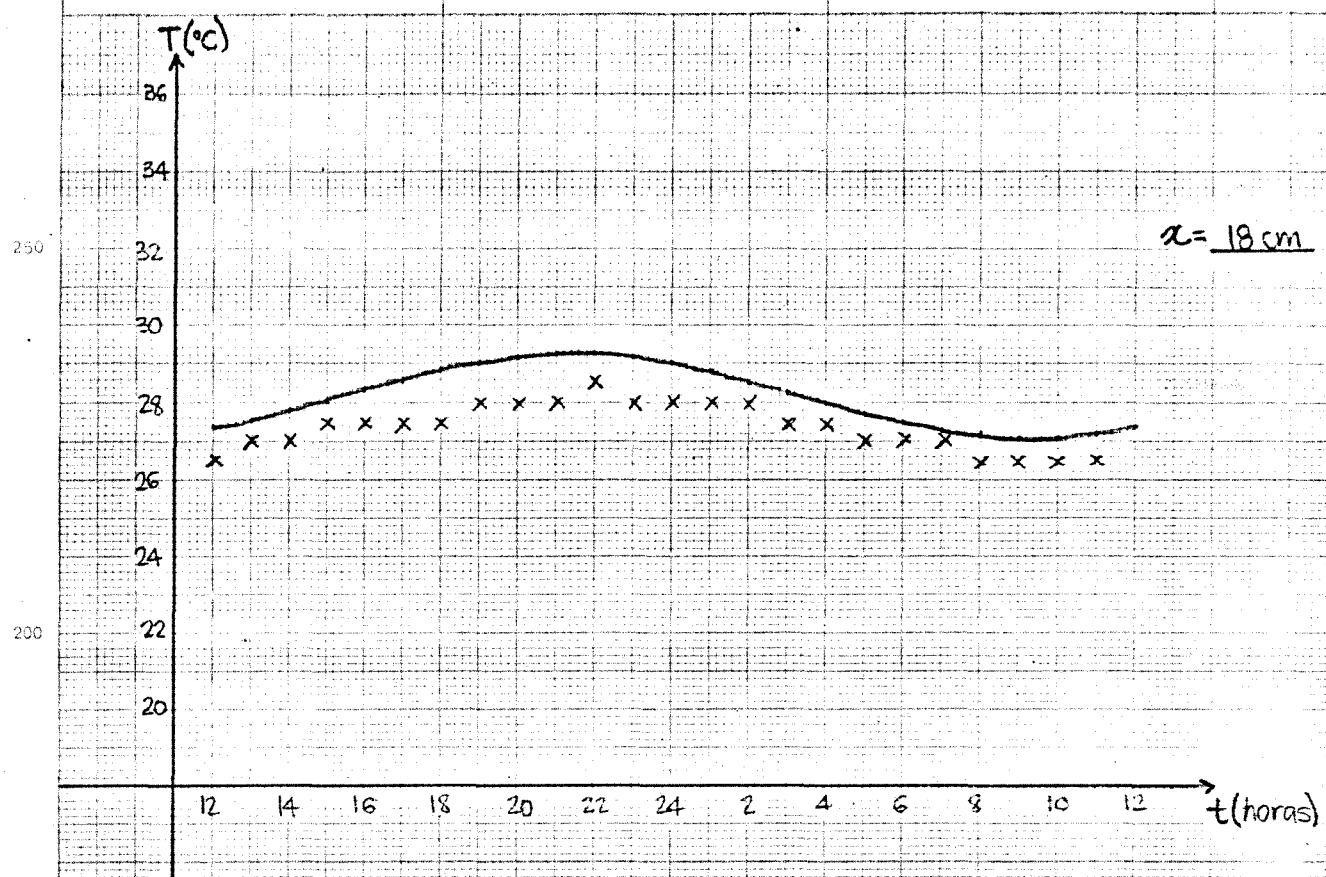




ELEMENTOS FINITOS

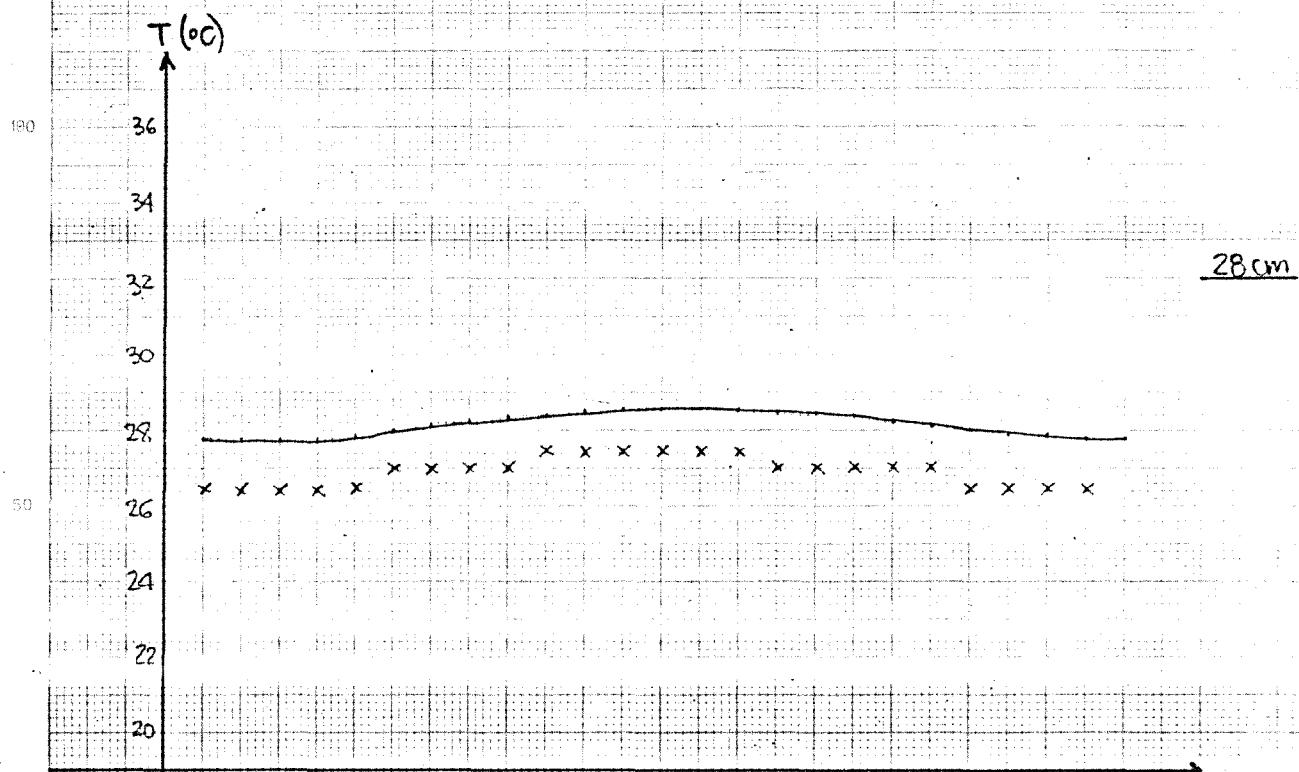
× × × × DADOS EXPERIMENTAIS

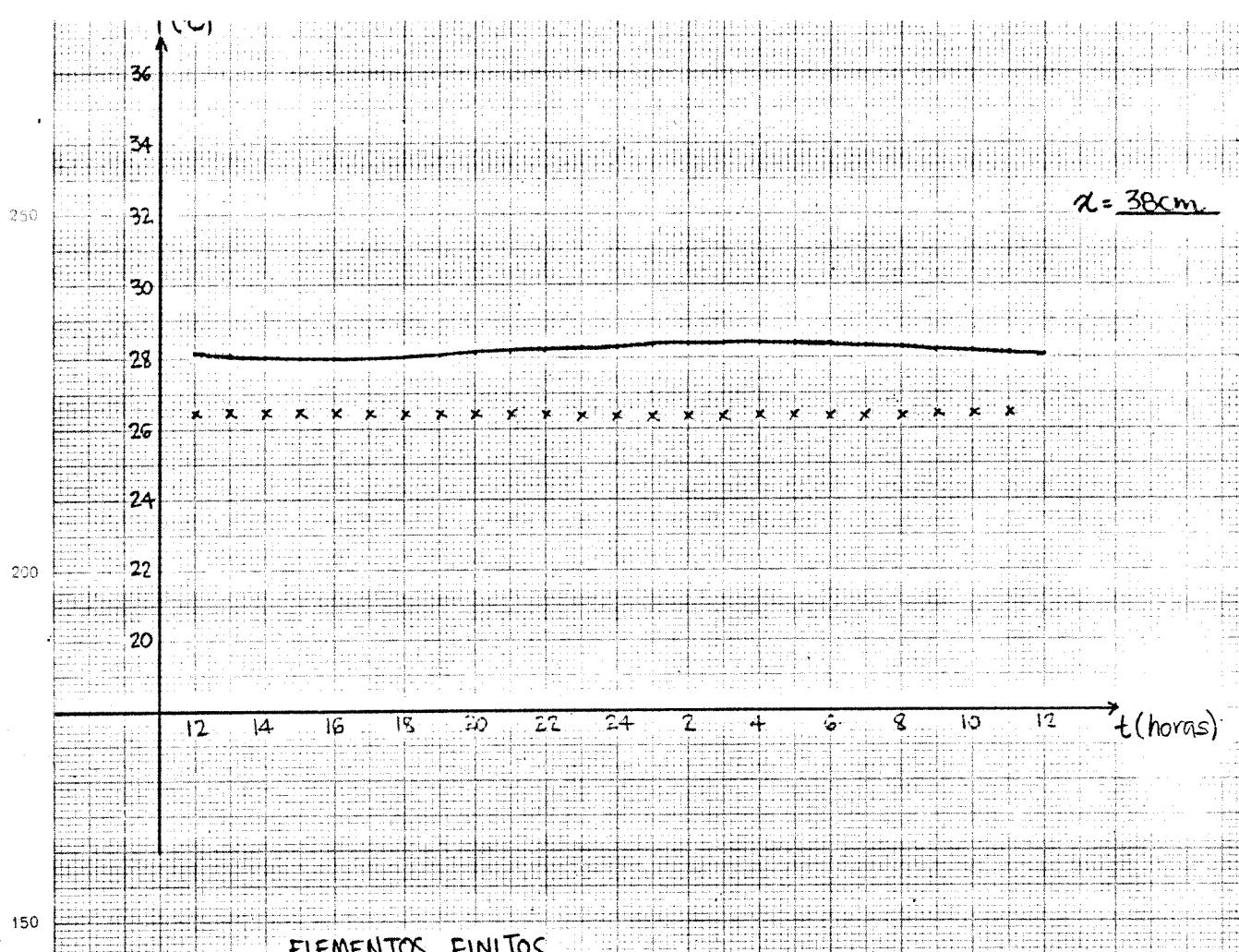




ELEMENTOS FINITOS

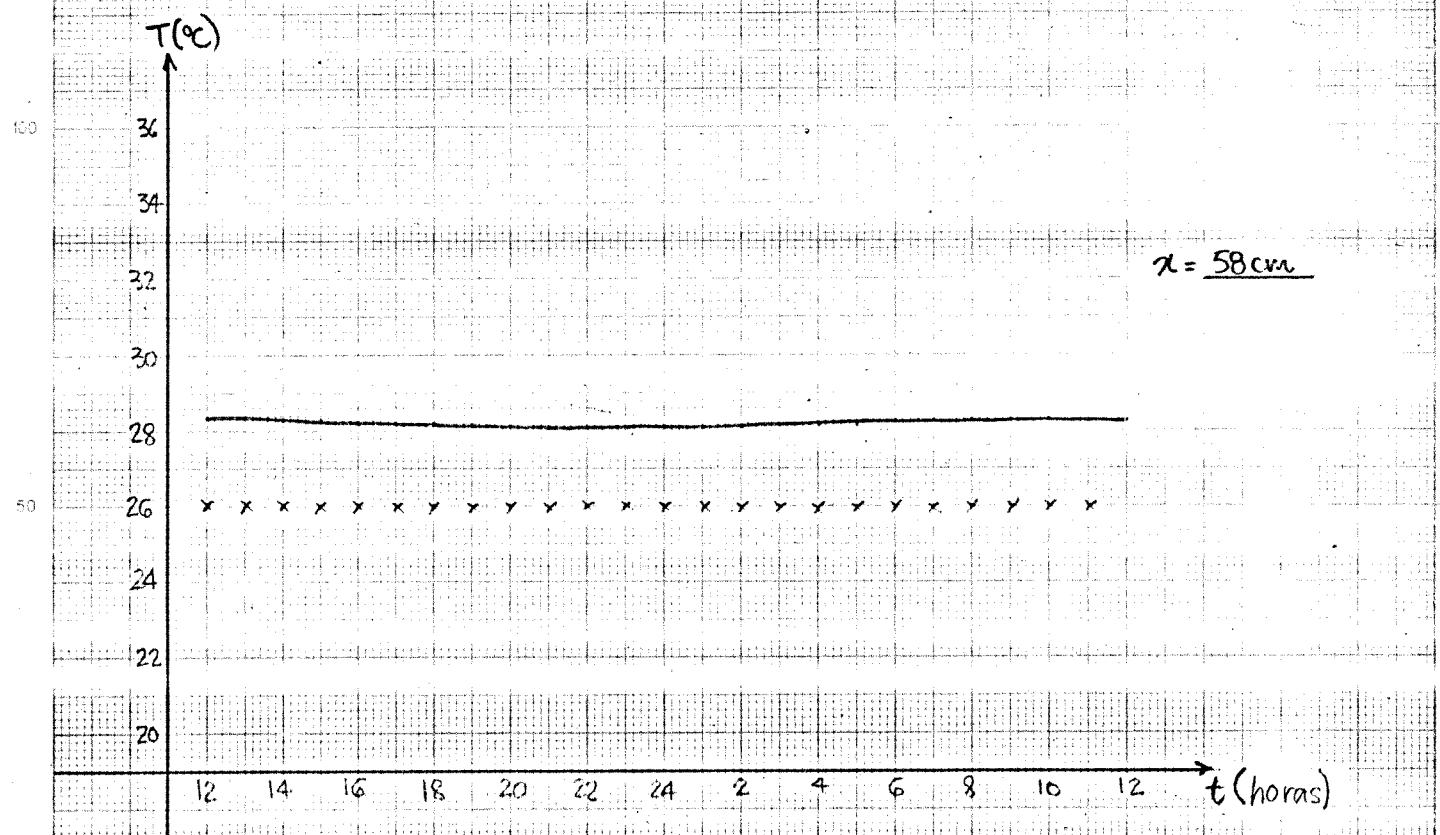
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS





ELEMENTOS FINITOS

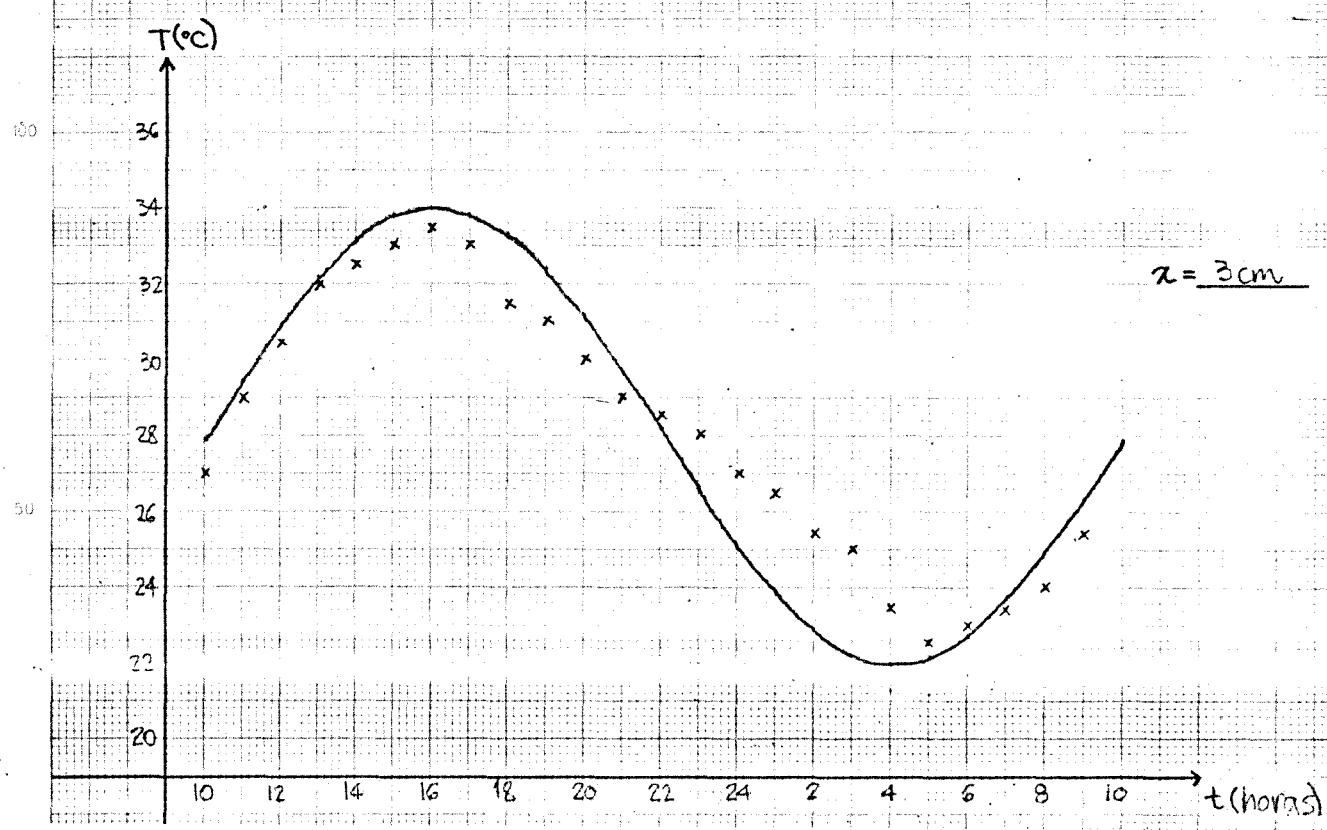
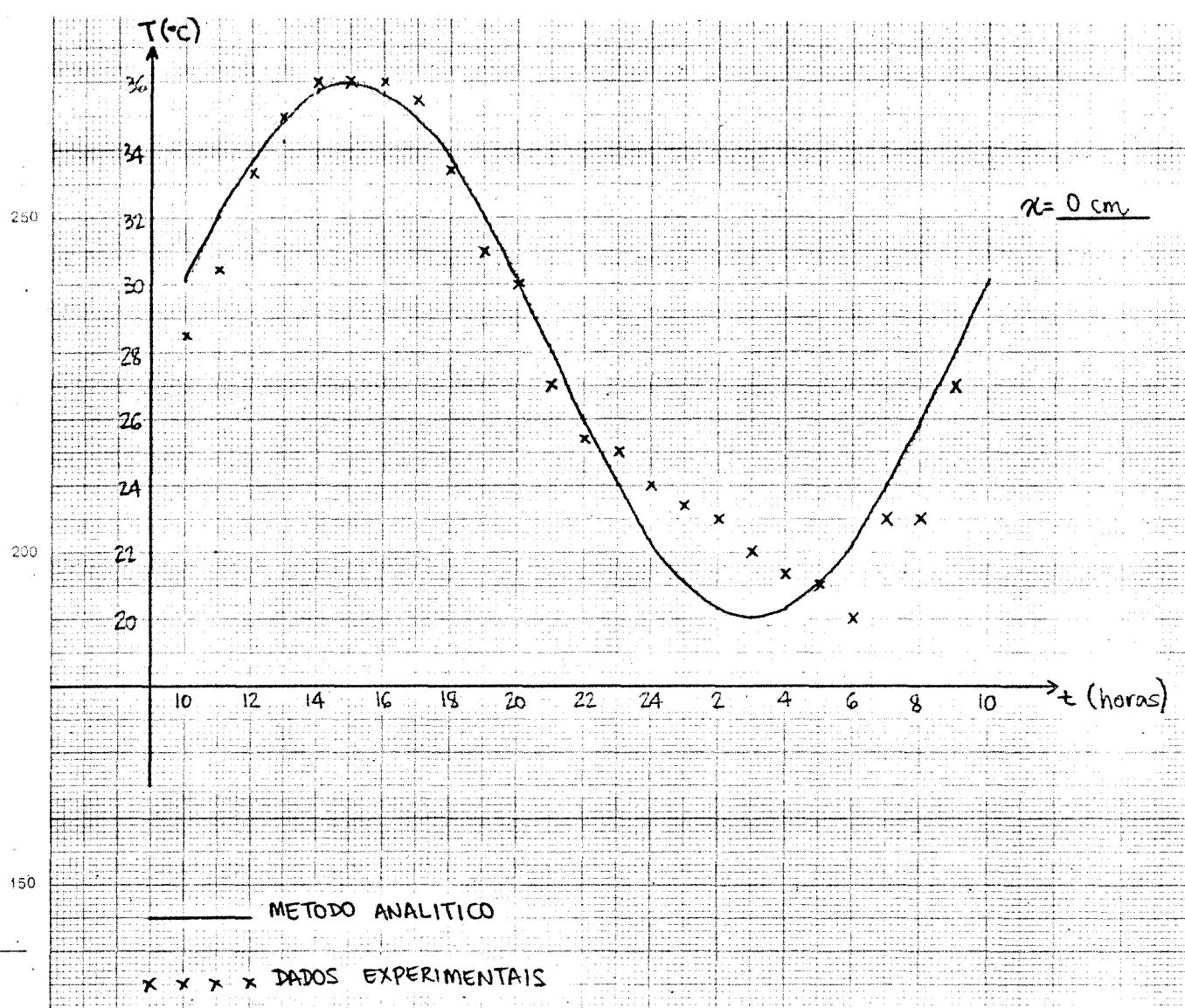
× × × × DADOS EXPERIMENTAIS

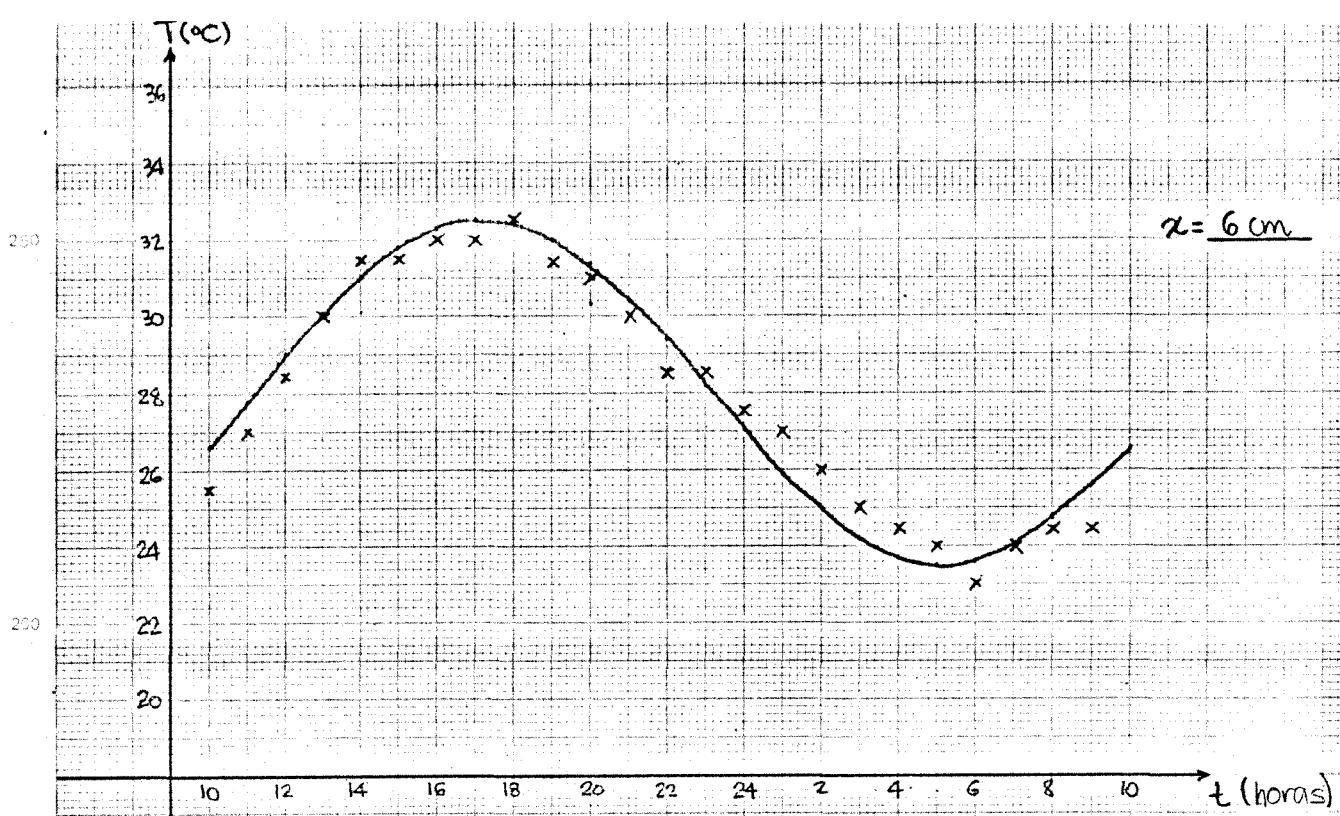


GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

29-30 DE AGOSTO DE 1983

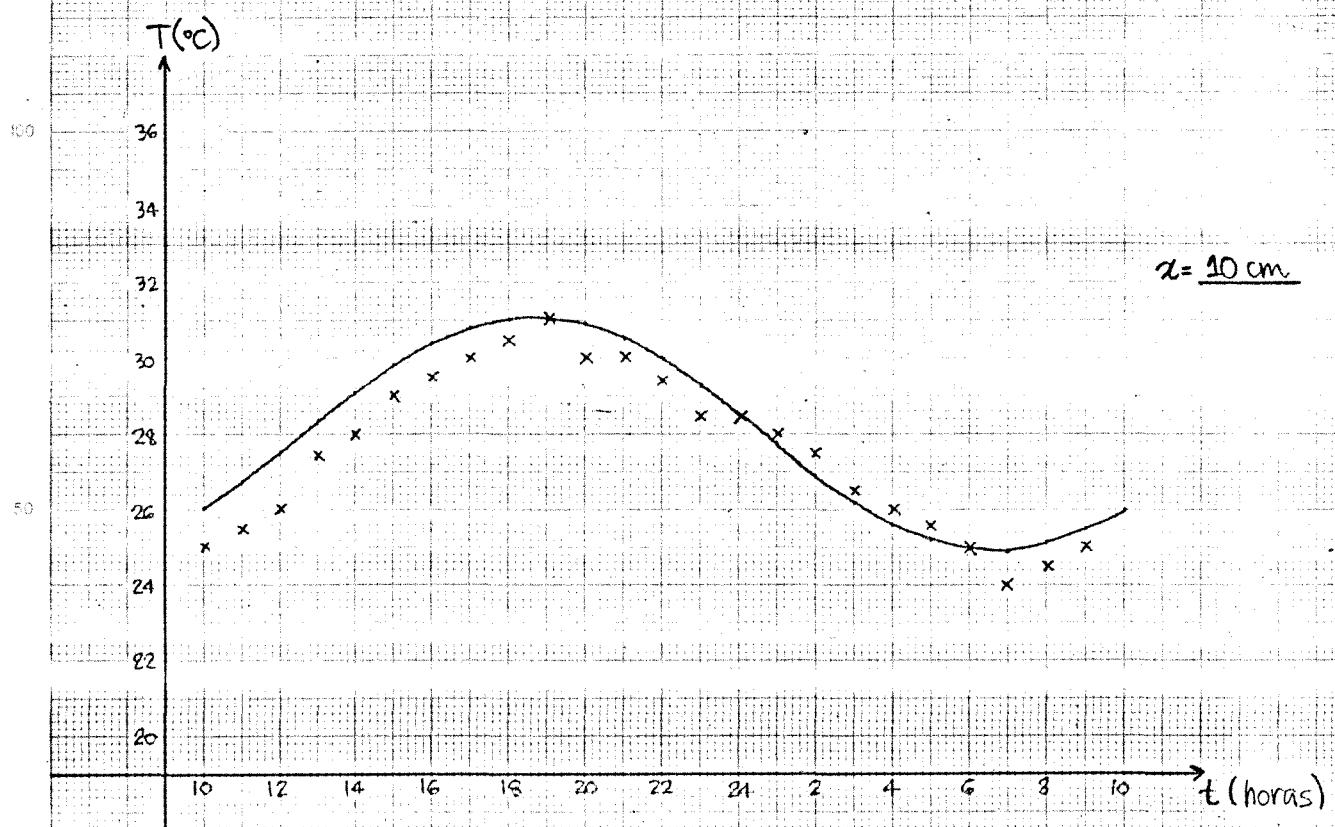
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas pelo método analítico e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.

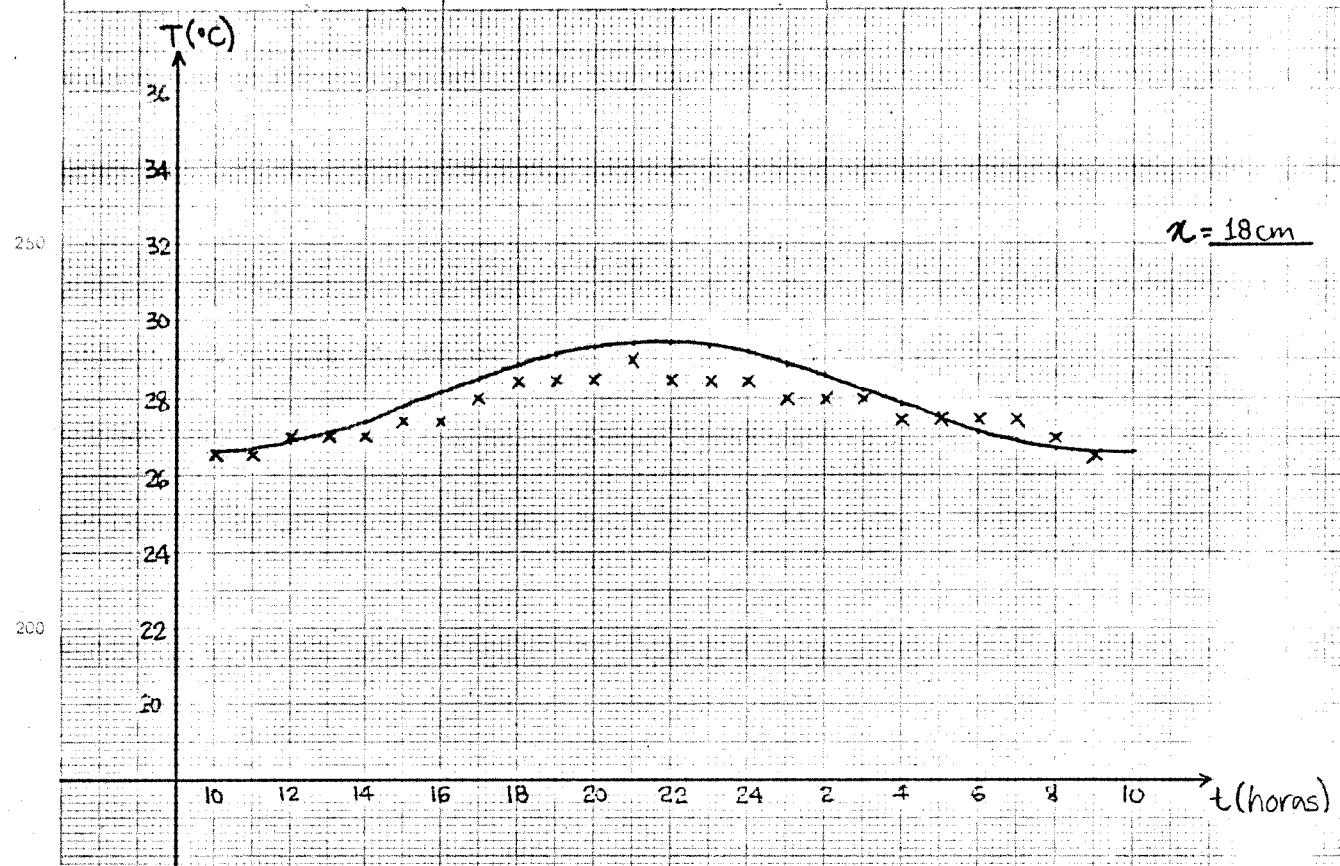




METODO ANALITICO

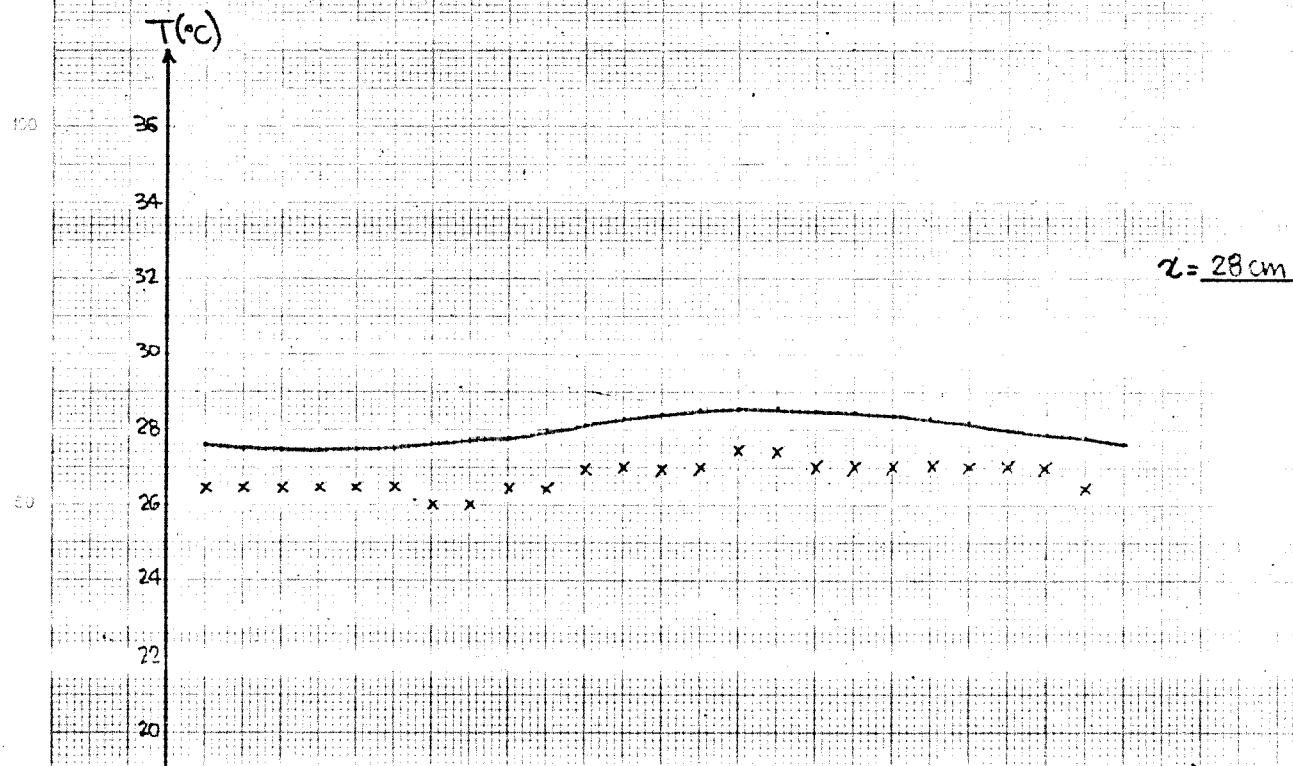
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS

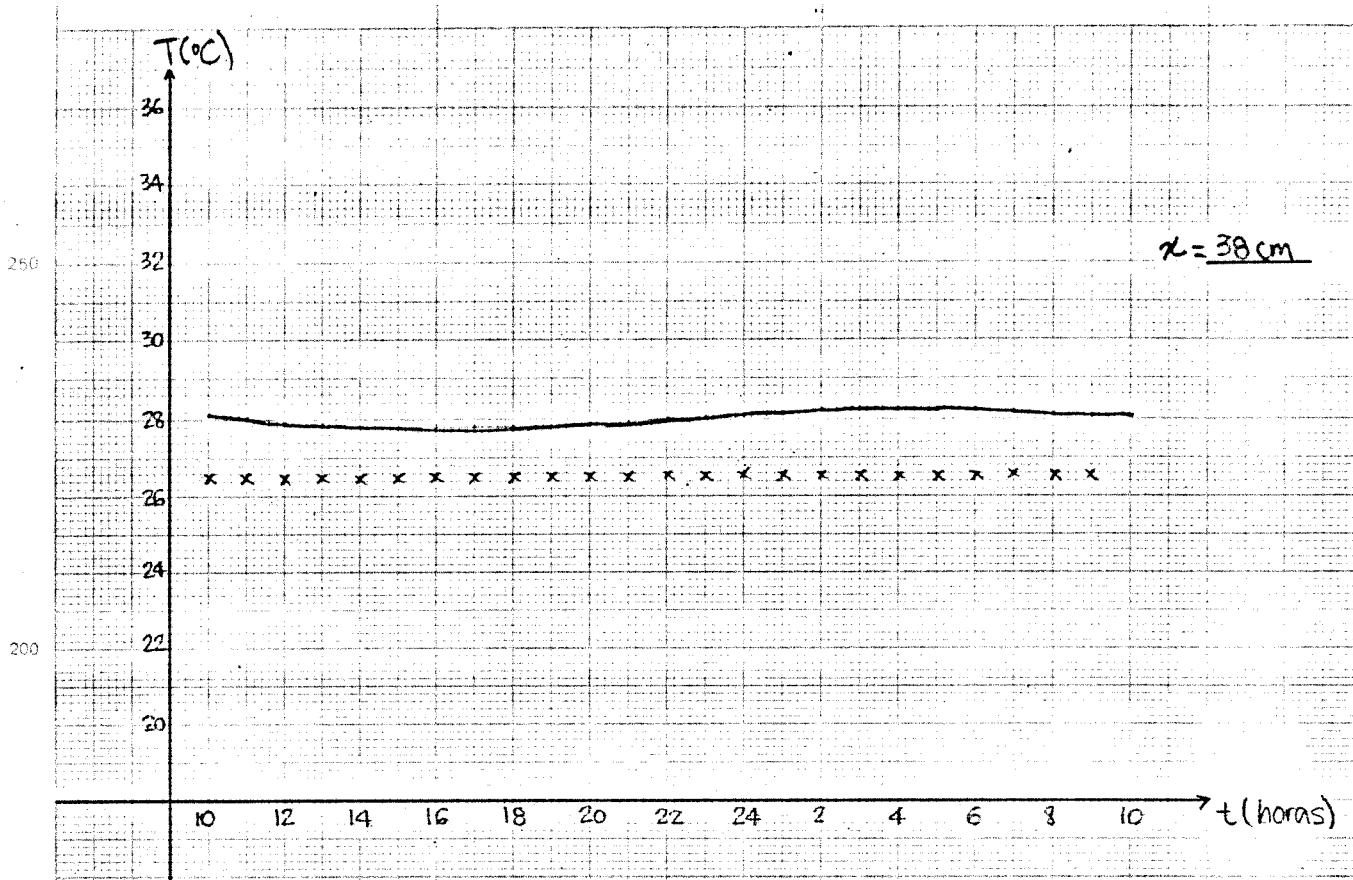




METODO ANALITICO

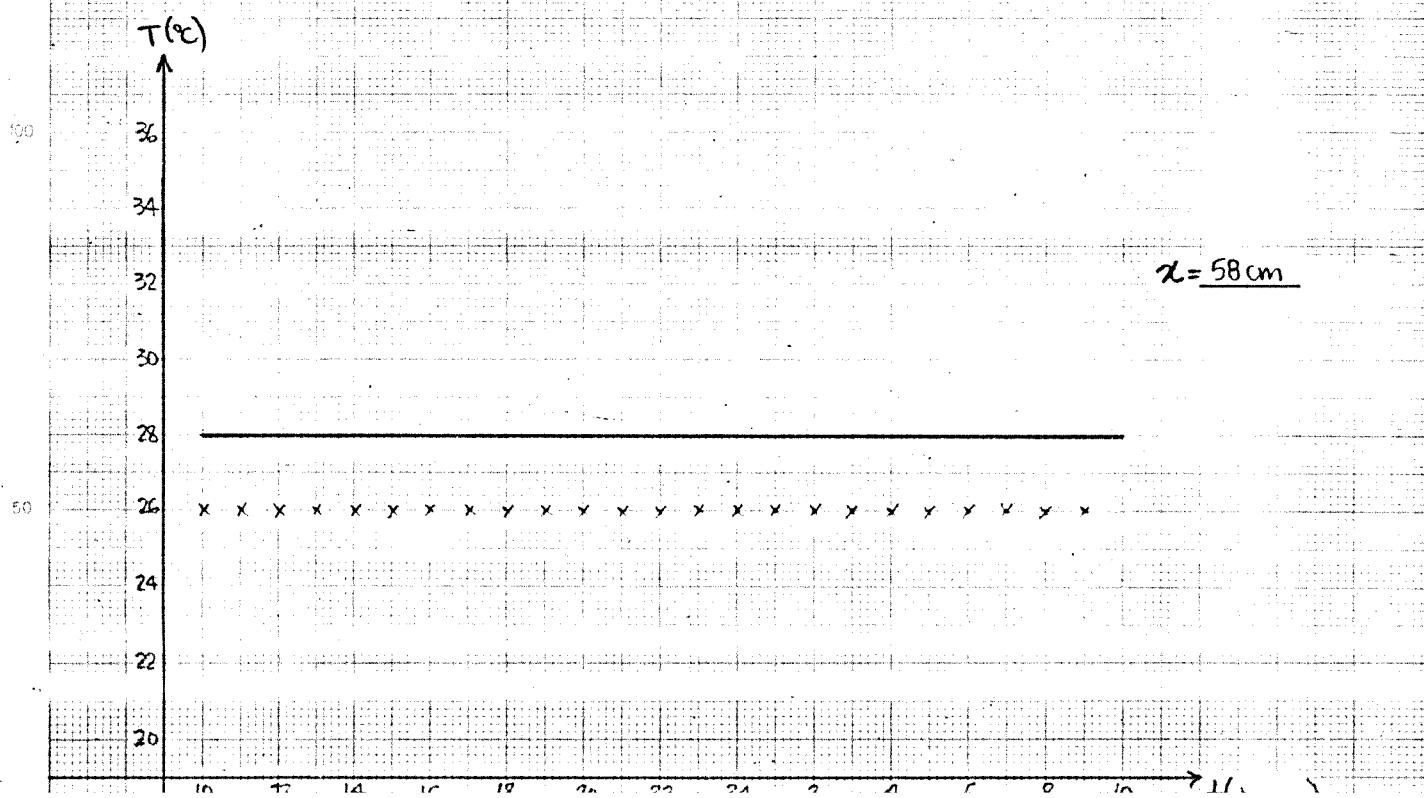
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS





METODO ANALITICO

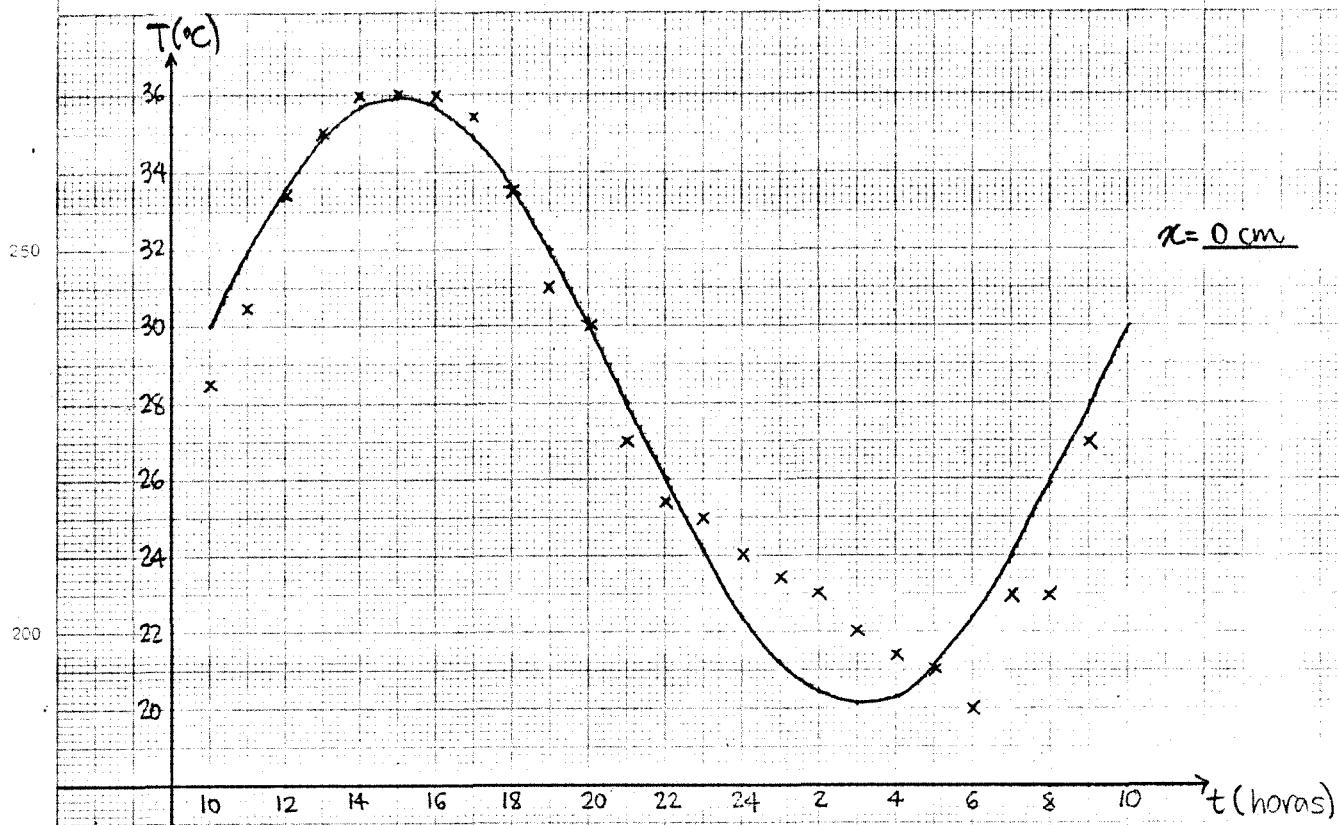
X X X DADOS EXPERIMENTAIS



GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

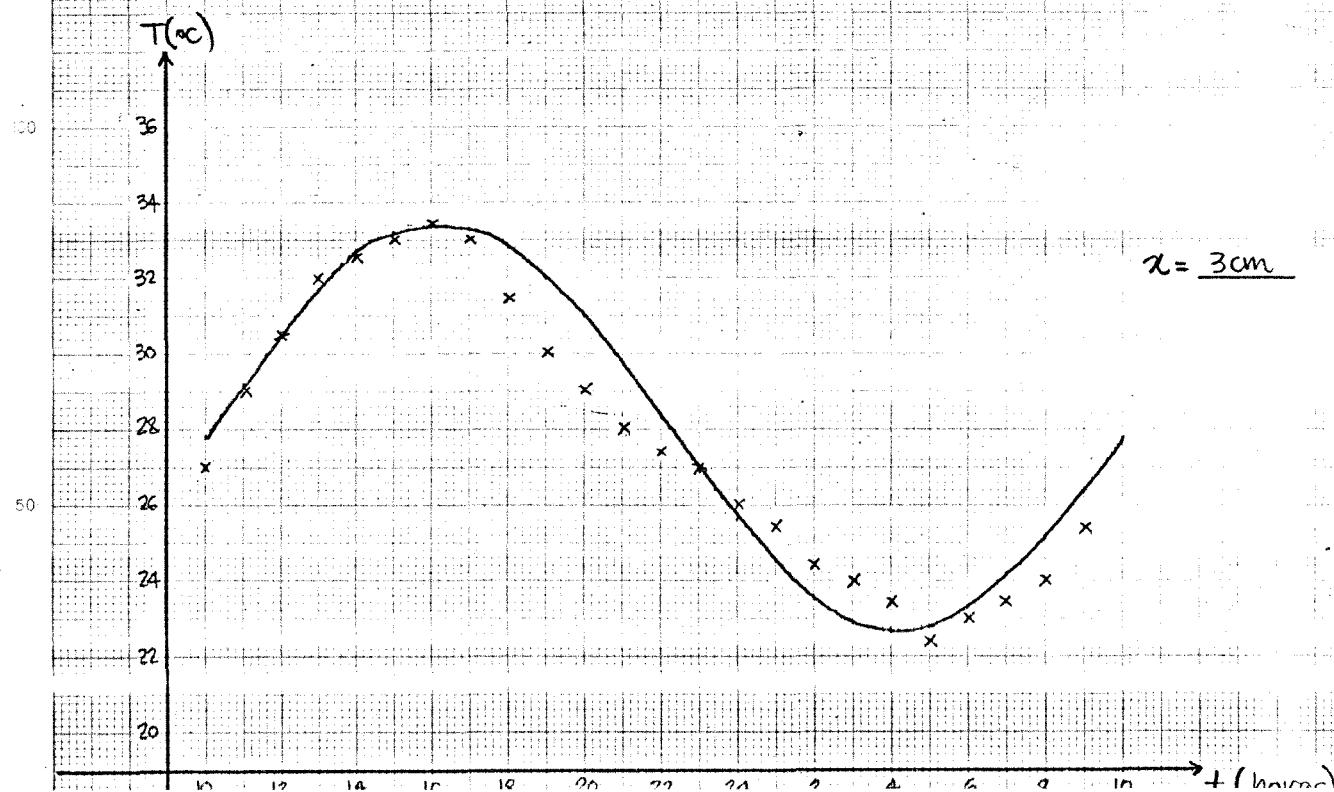
29-30 DE AGOSTO DE 1983

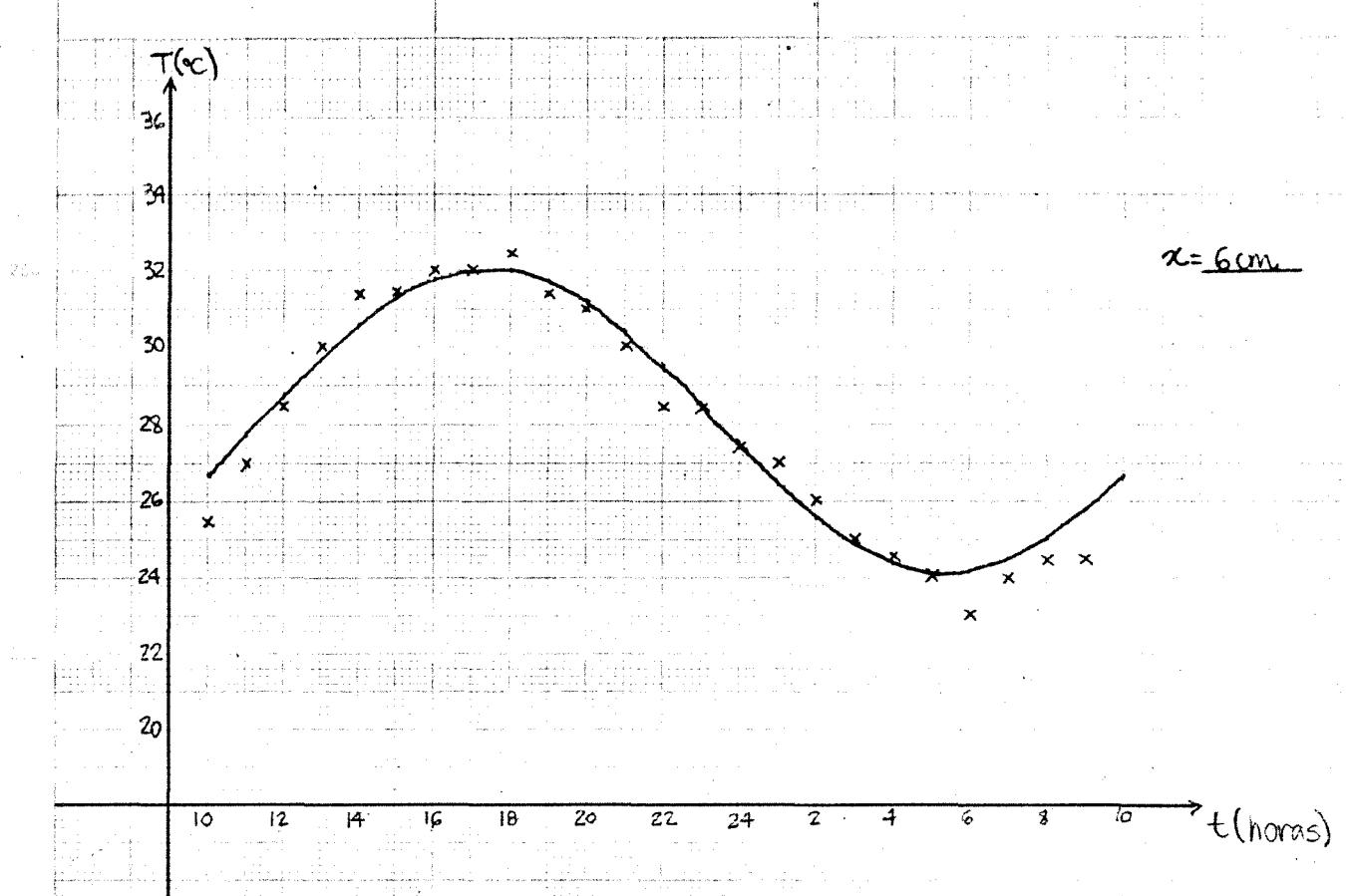
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas por elementos finitos e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.



ELEMENTOS FINITOS

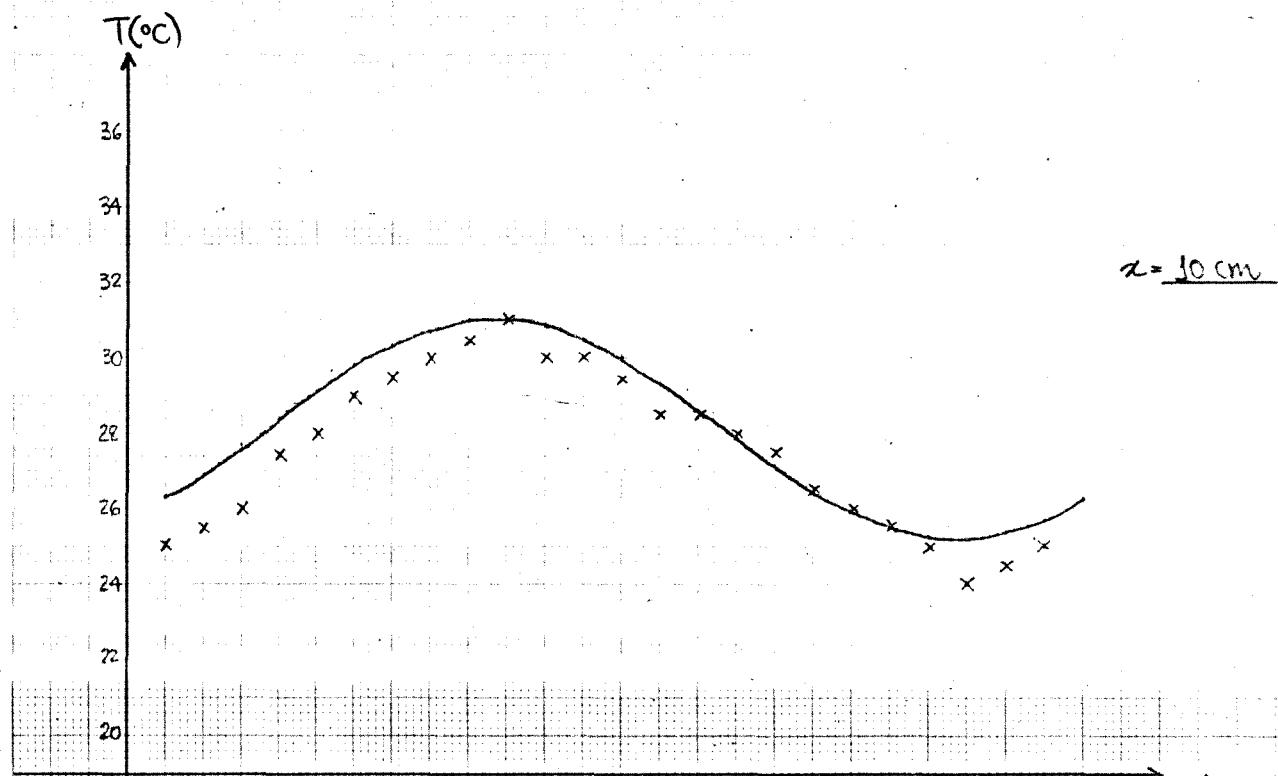
x-x-x DADOS EXPERIMENTAIS

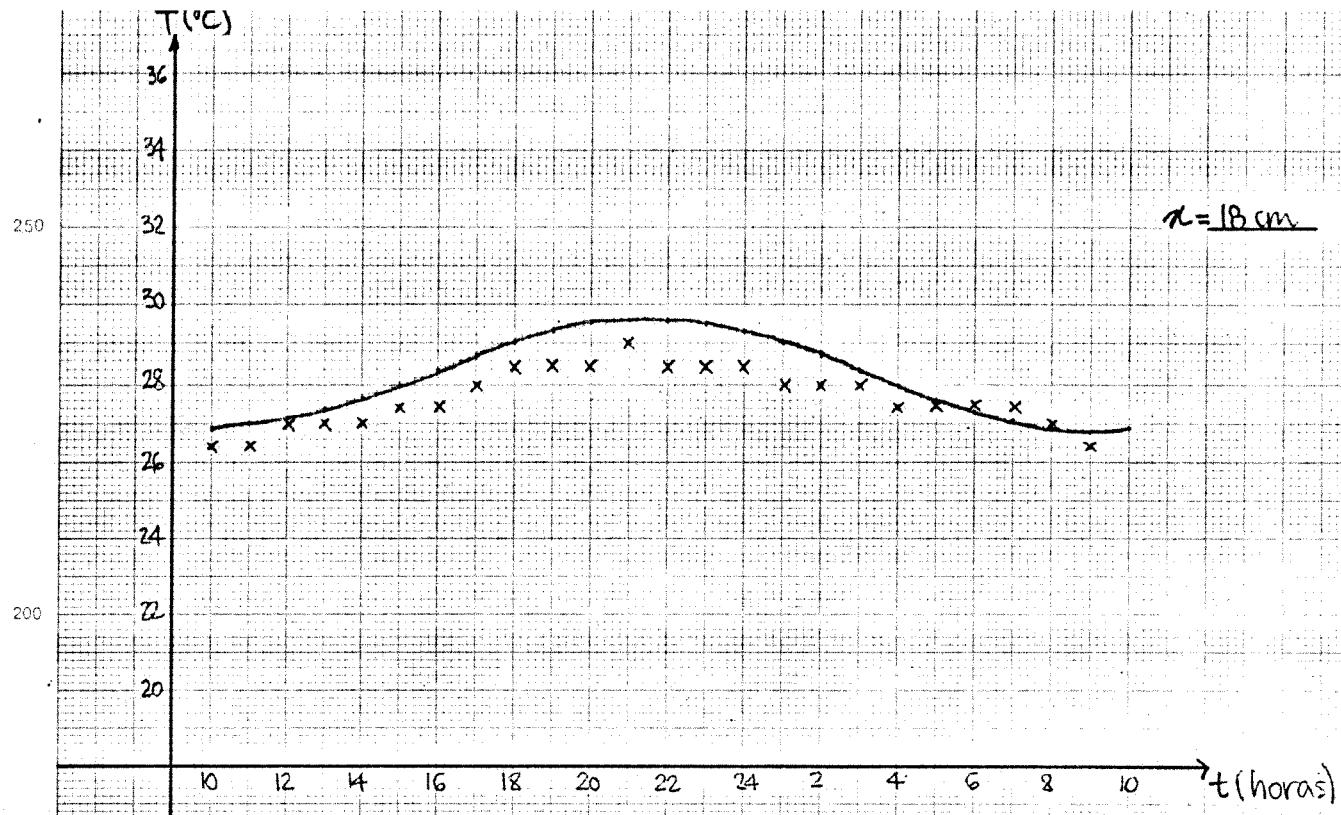




ELEMENTOS FINITOS

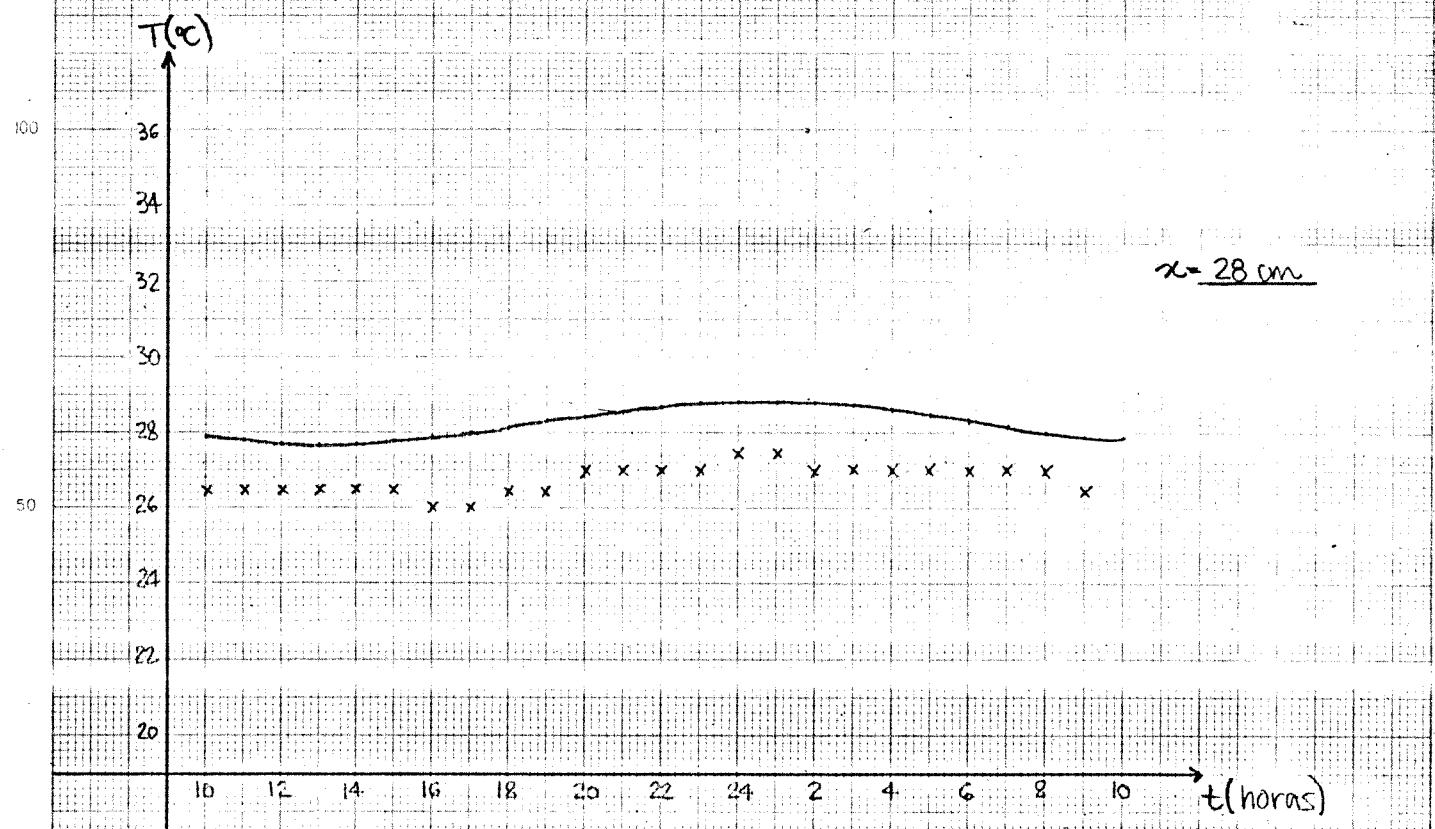
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS

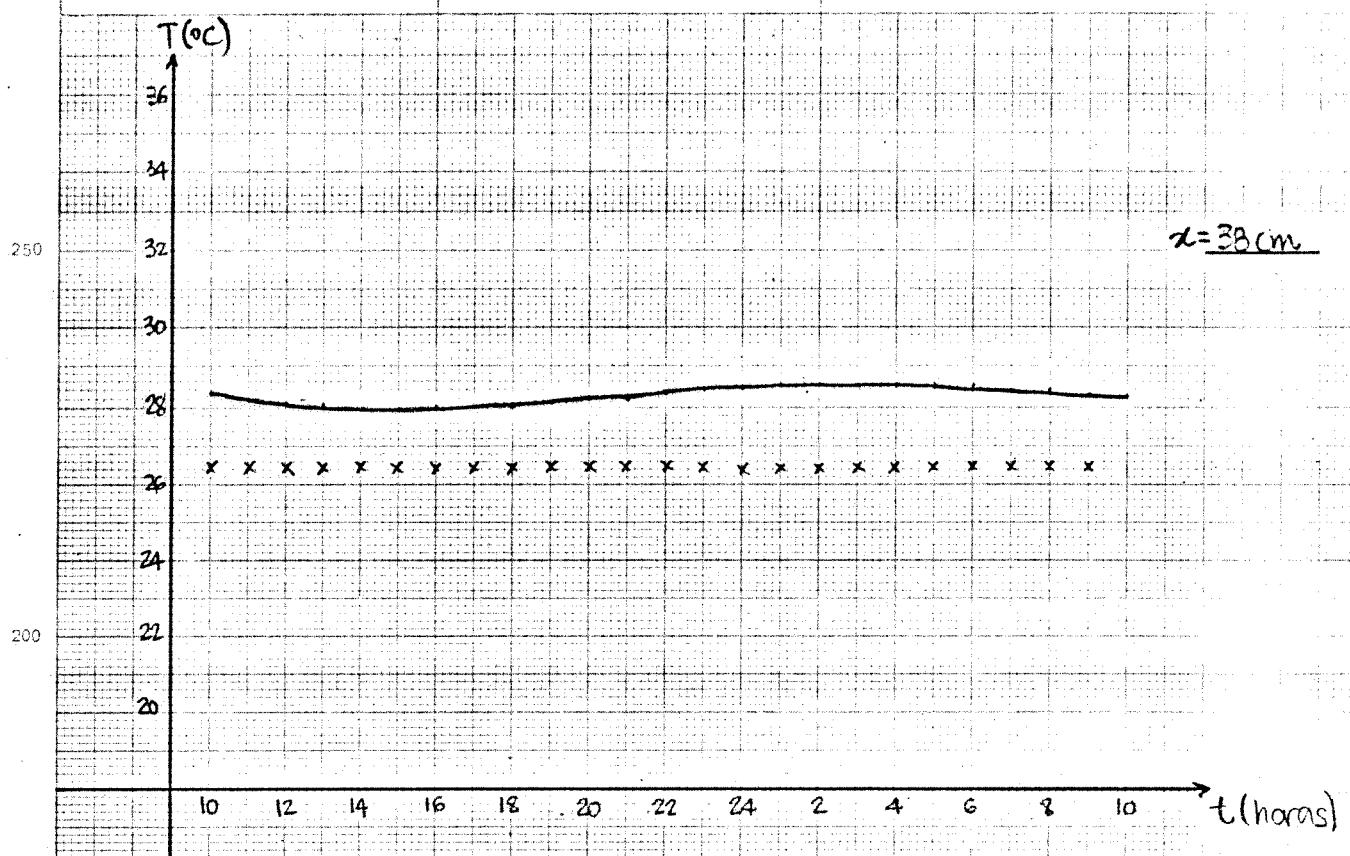




ELEMENTOS FINITOS

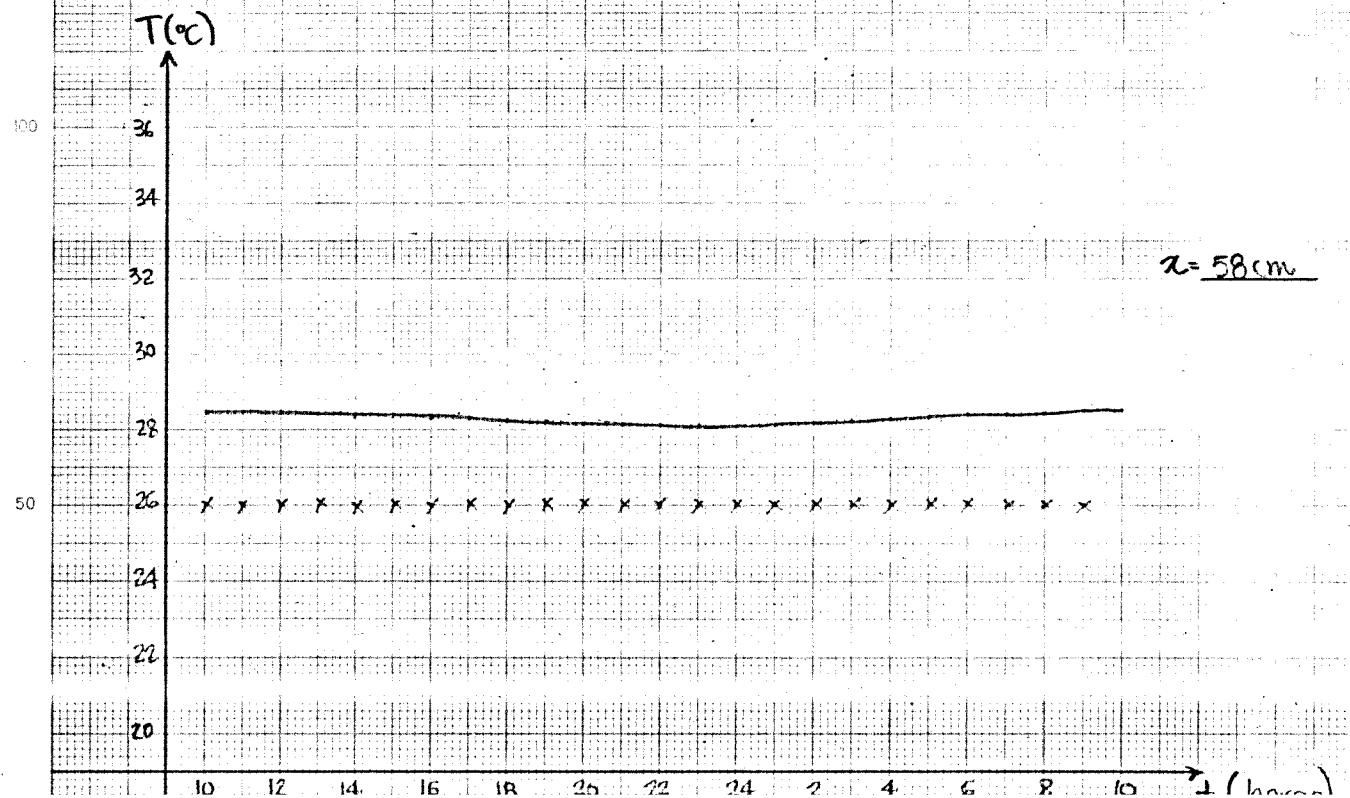
* * * * DADOS EXPERIMENTAIS





ELEMENTOS FINITOS

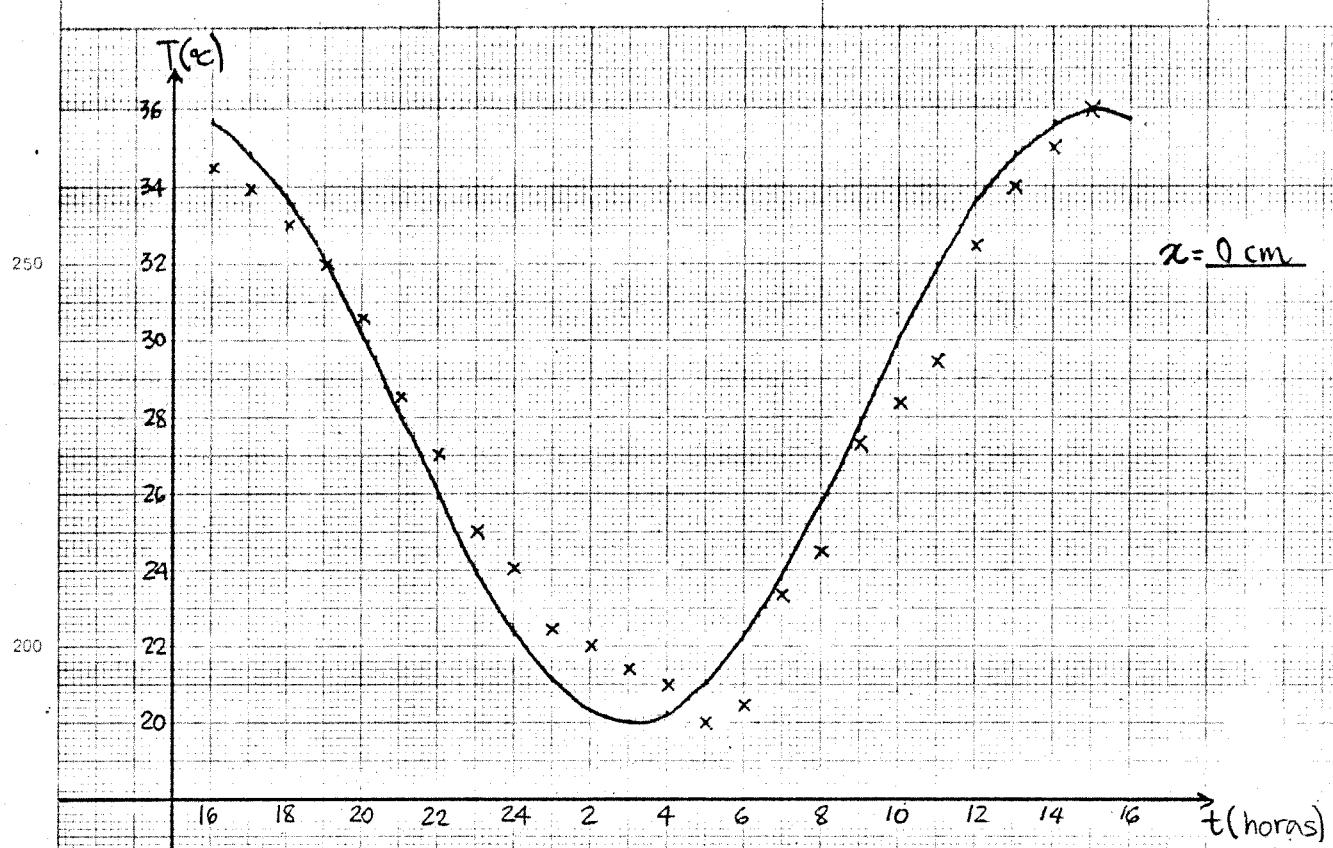
$\times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS



GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

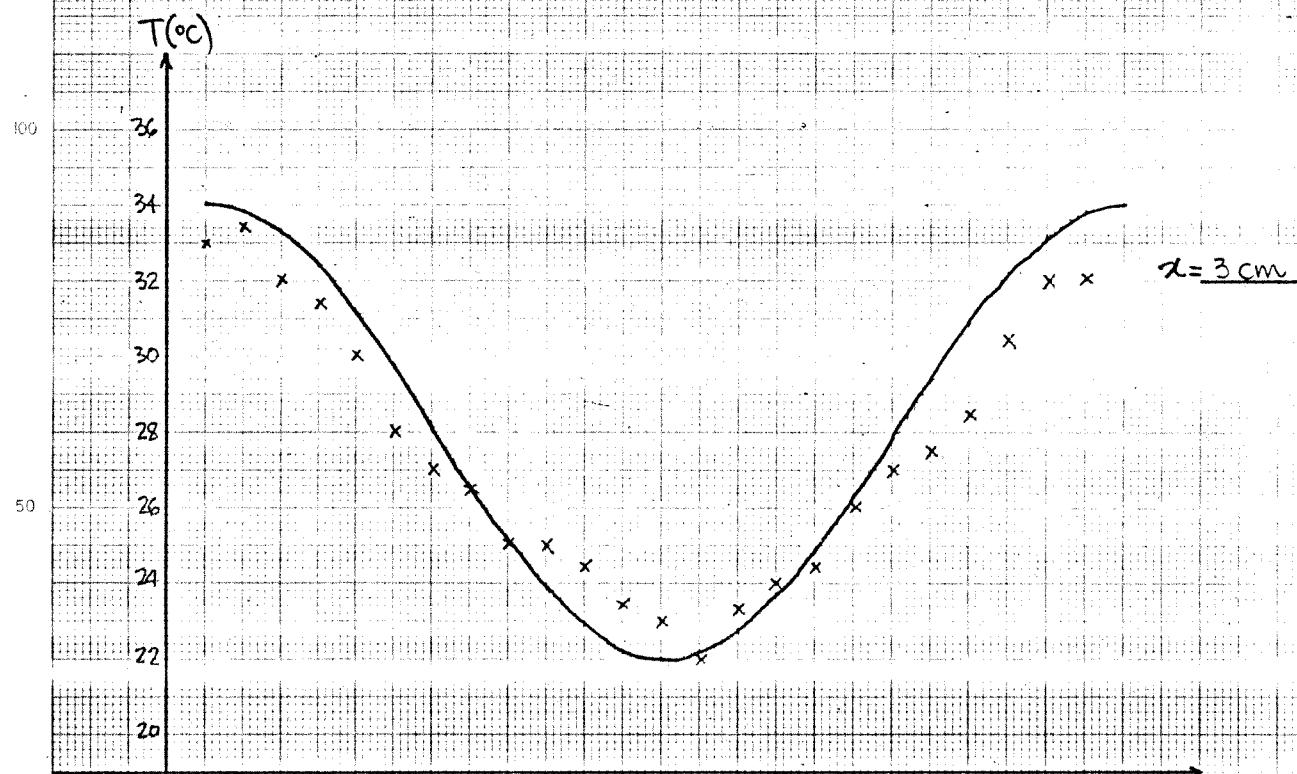
30-31 DE AGOSTO DE 1983

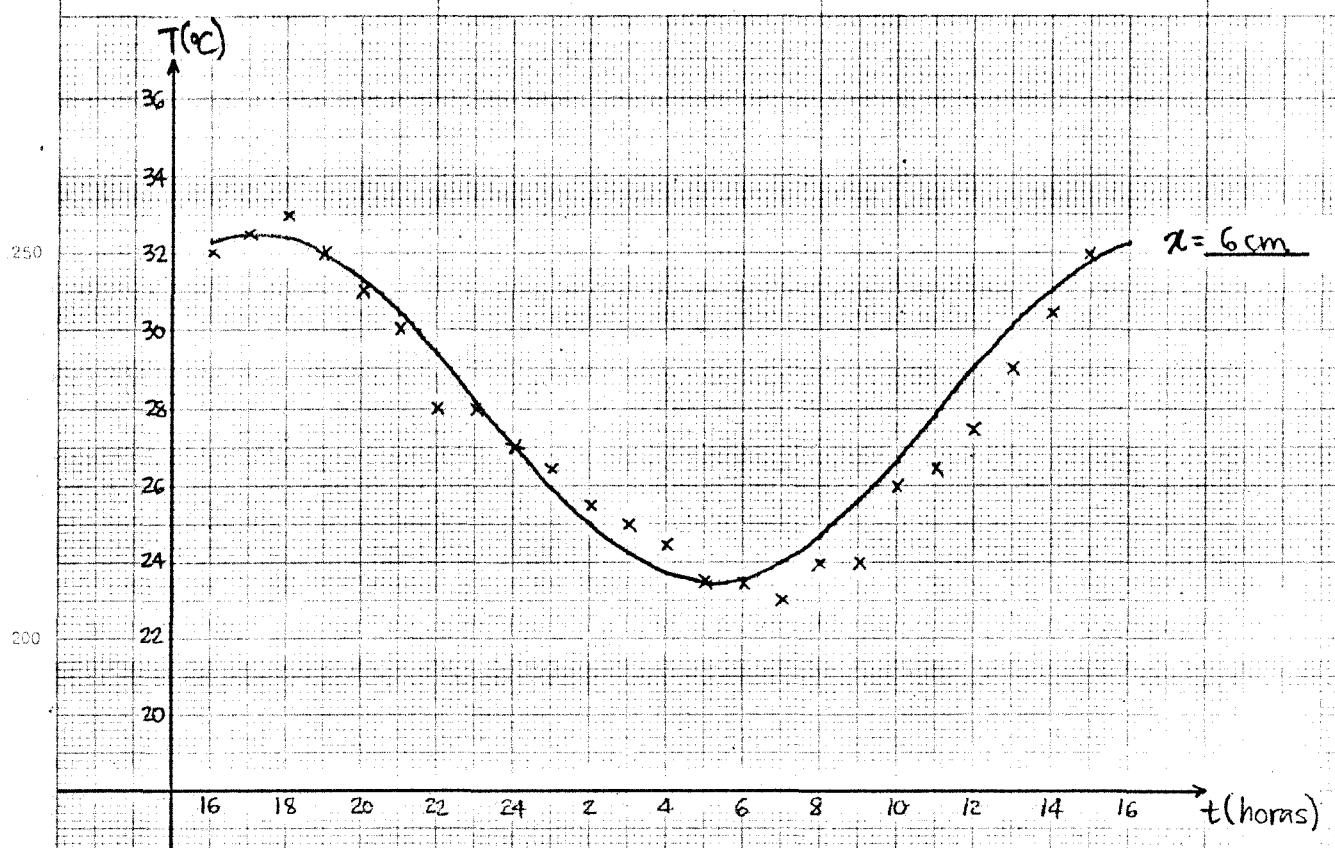
Curvas Temperatura versus Tempo esperadas pelo método analítico e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.



METODO ANALITICO

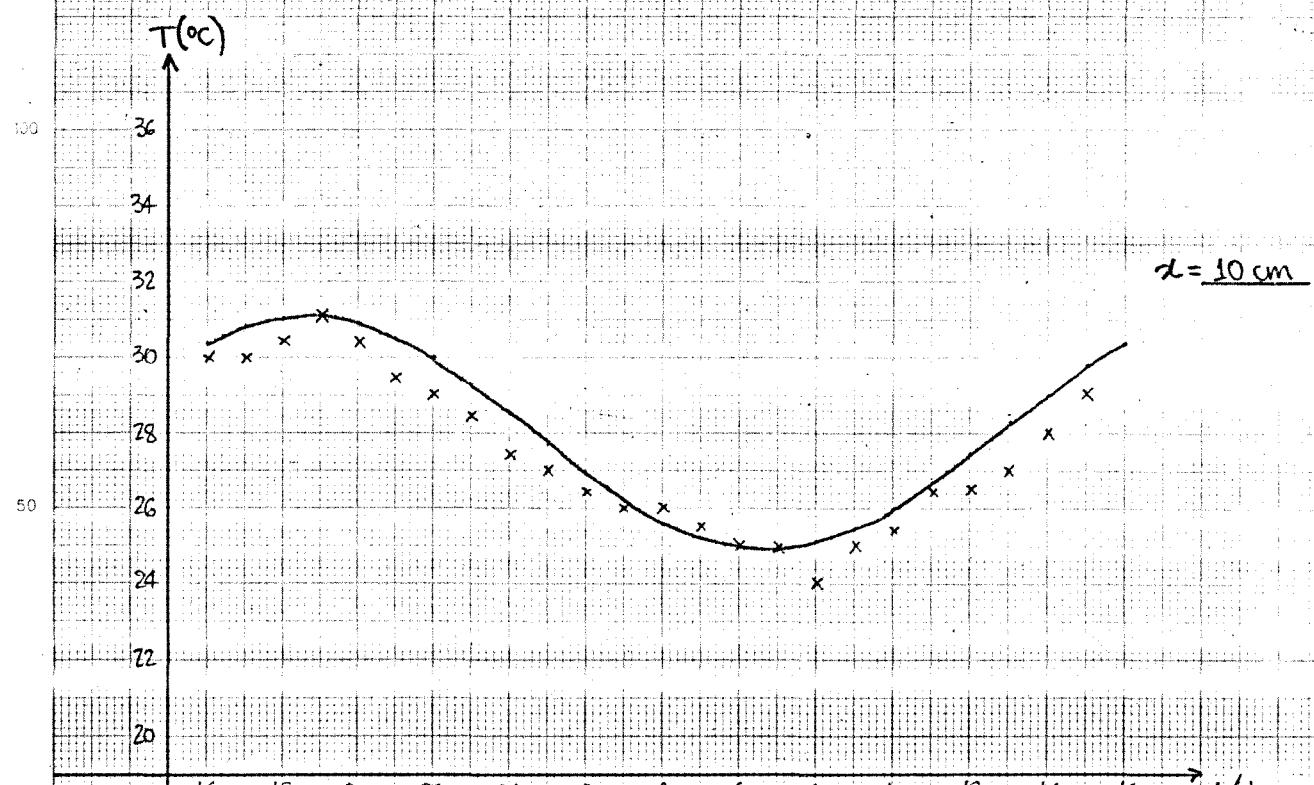
x x x x DADOS EXPERIMENTAIS

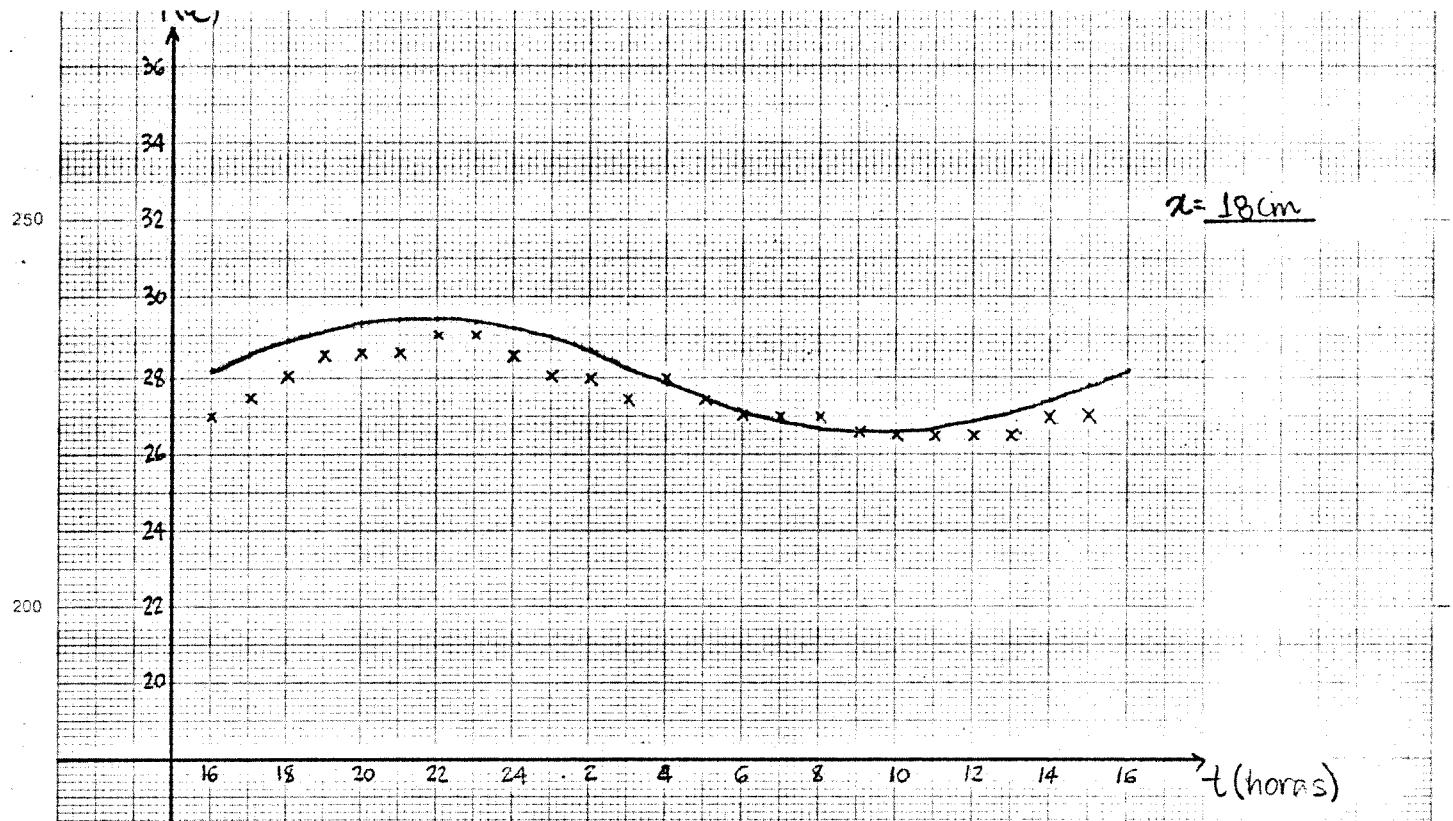




METODO ANALITICO

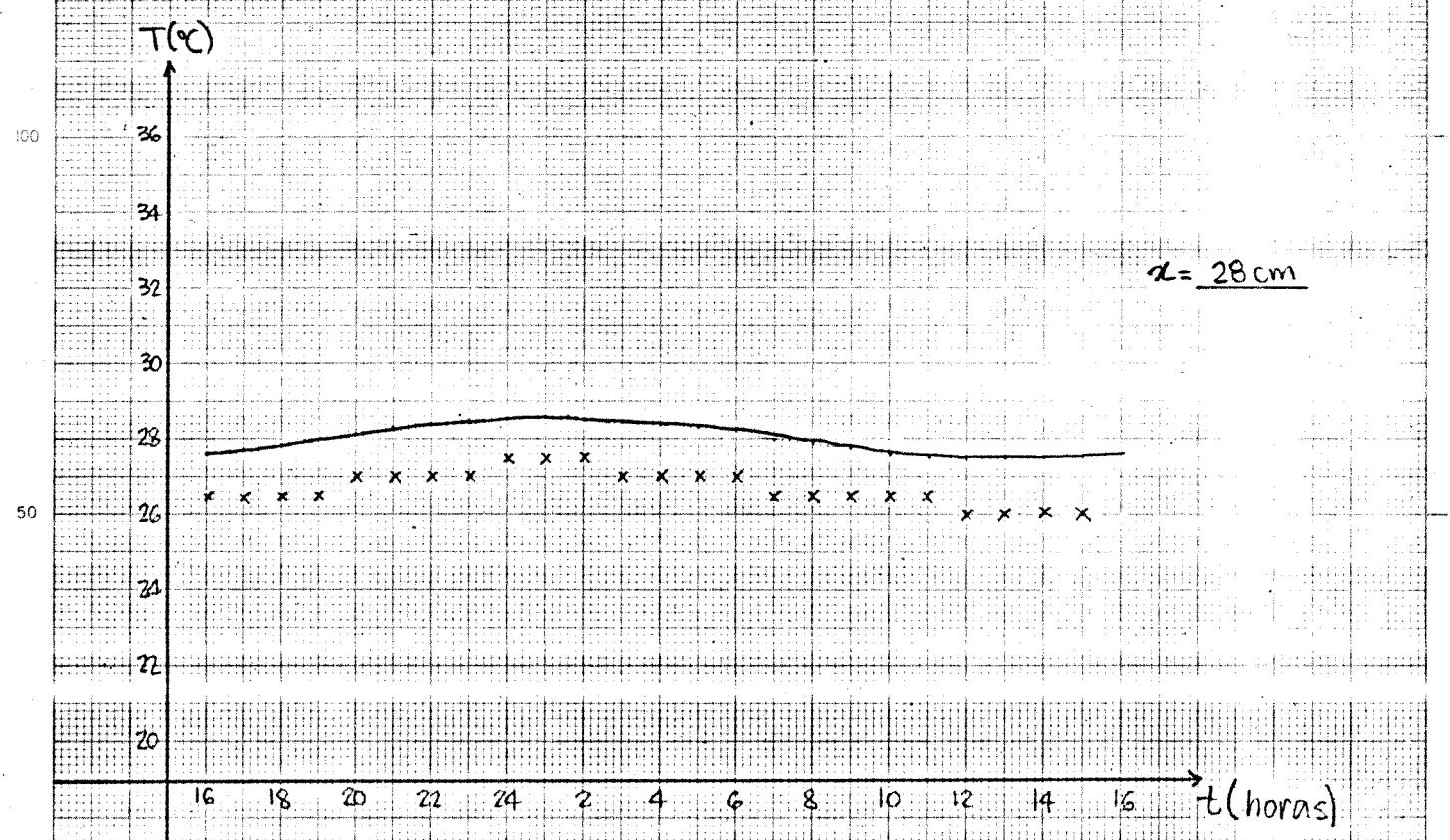
× × × × DADOS EXPERIMENTAIS

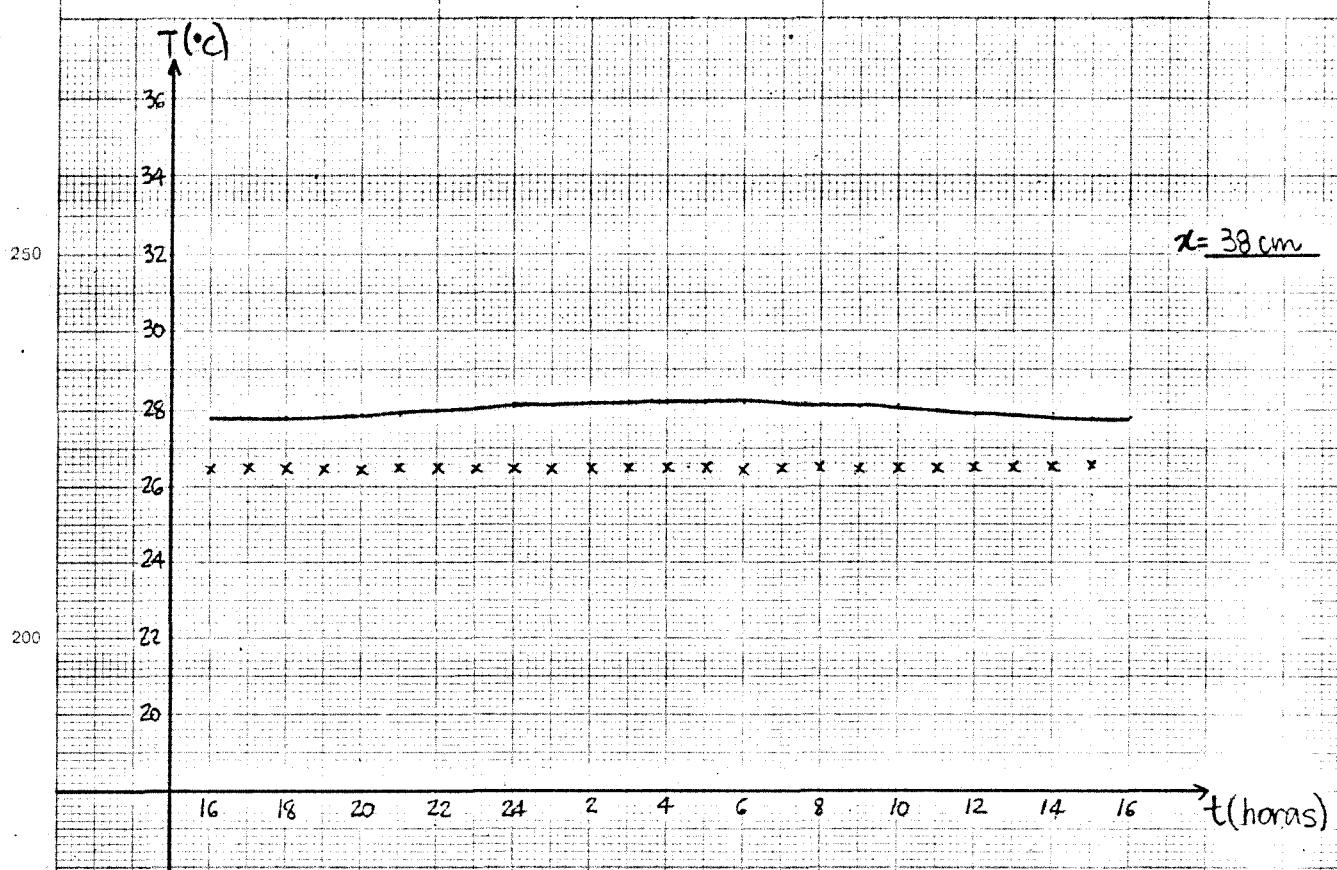




METODO ANALITICO

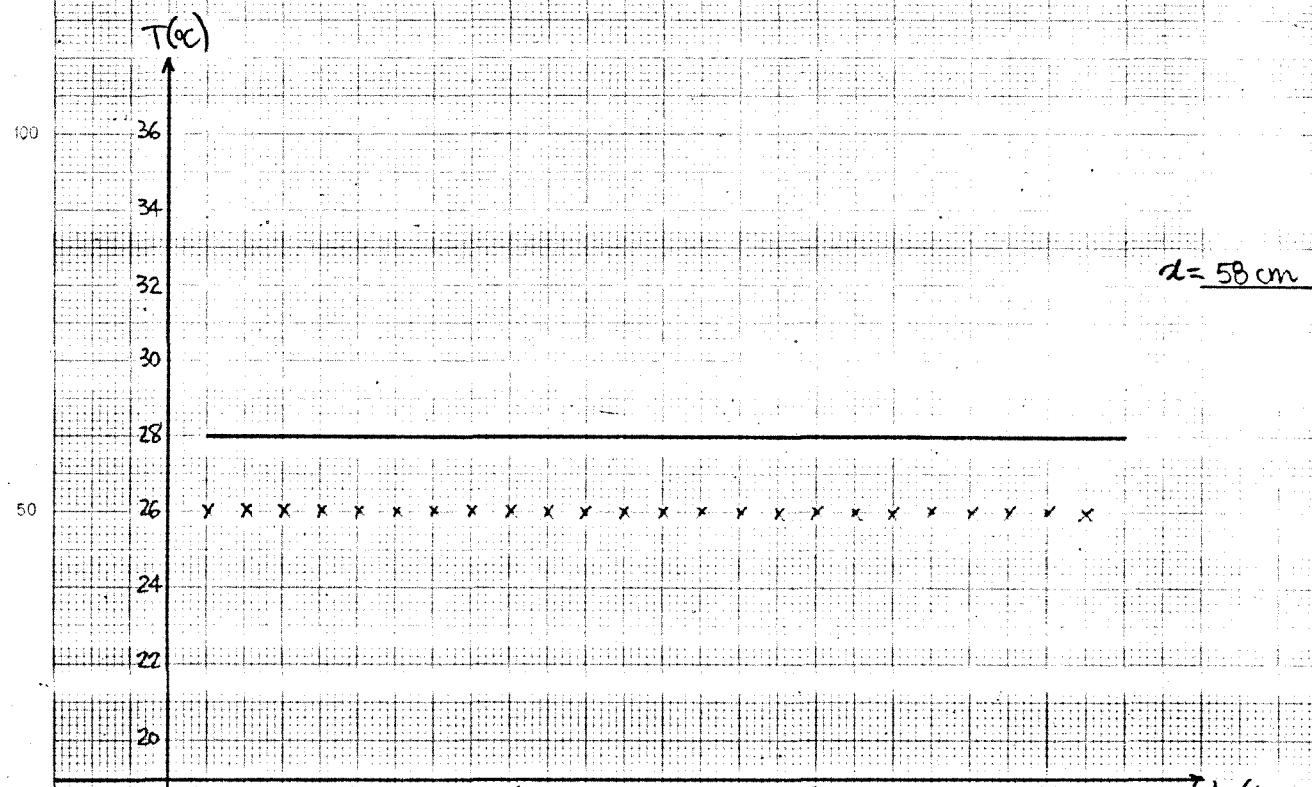
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS





METODO ANALITICO

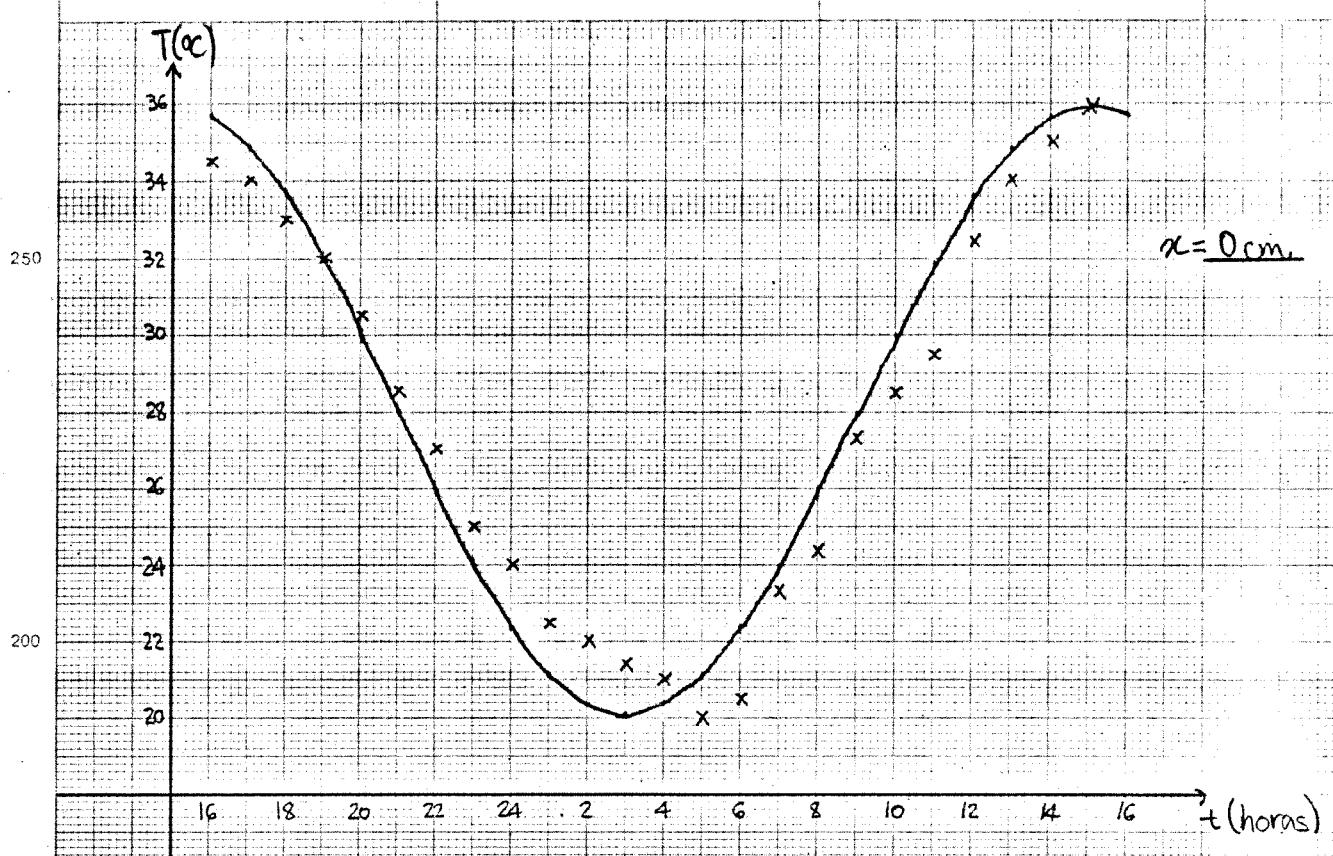
$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS



GRÁFICOS RELATIVOS AO PERÍODO

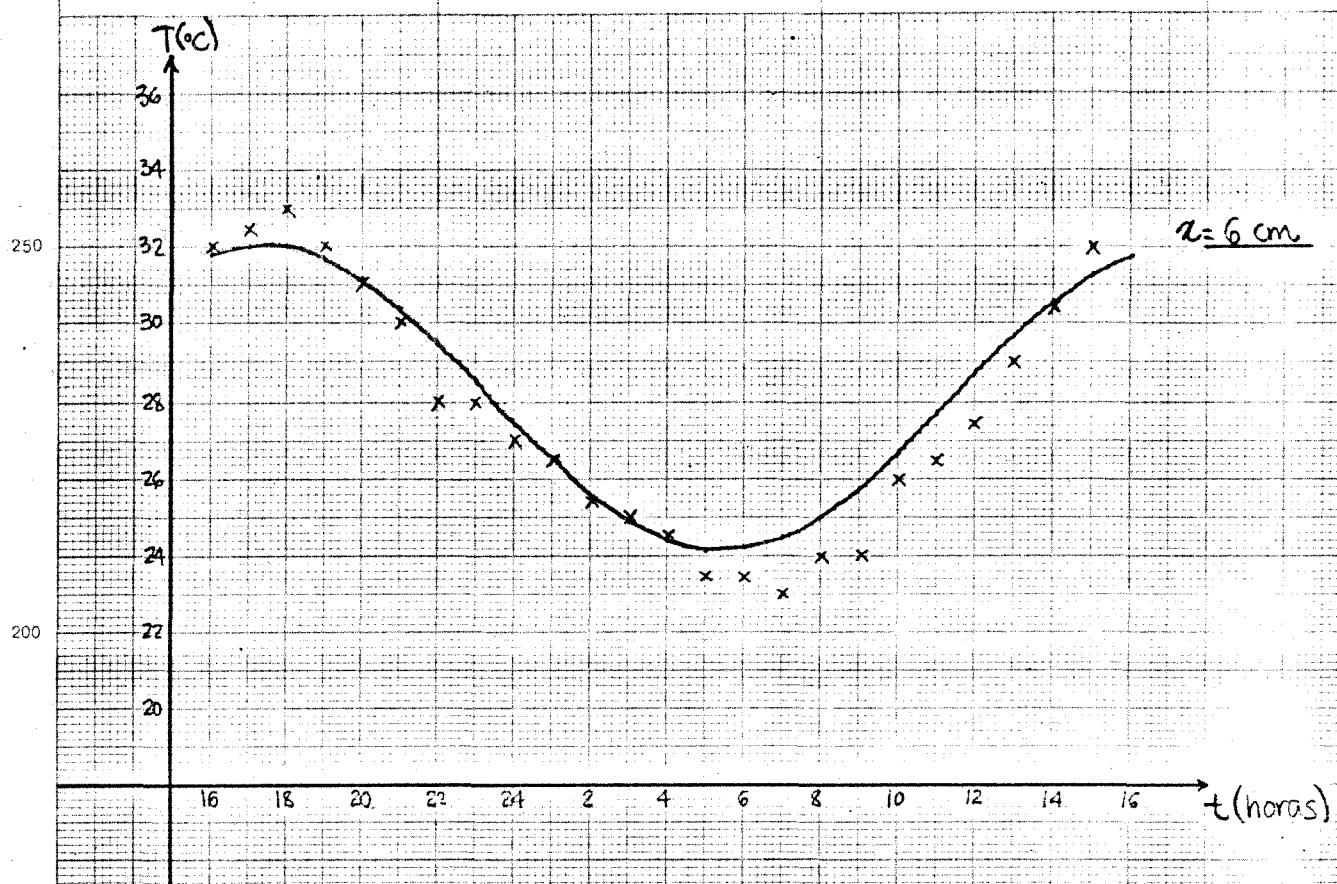
30-31 DE AGOSTO DE 1983

Curvas Temperatura versus Tempo esperadas por elementos finitos e dados experimentais para as profundidades 0, 3, 6, 10, 18, 28, 38 e 58 cm.

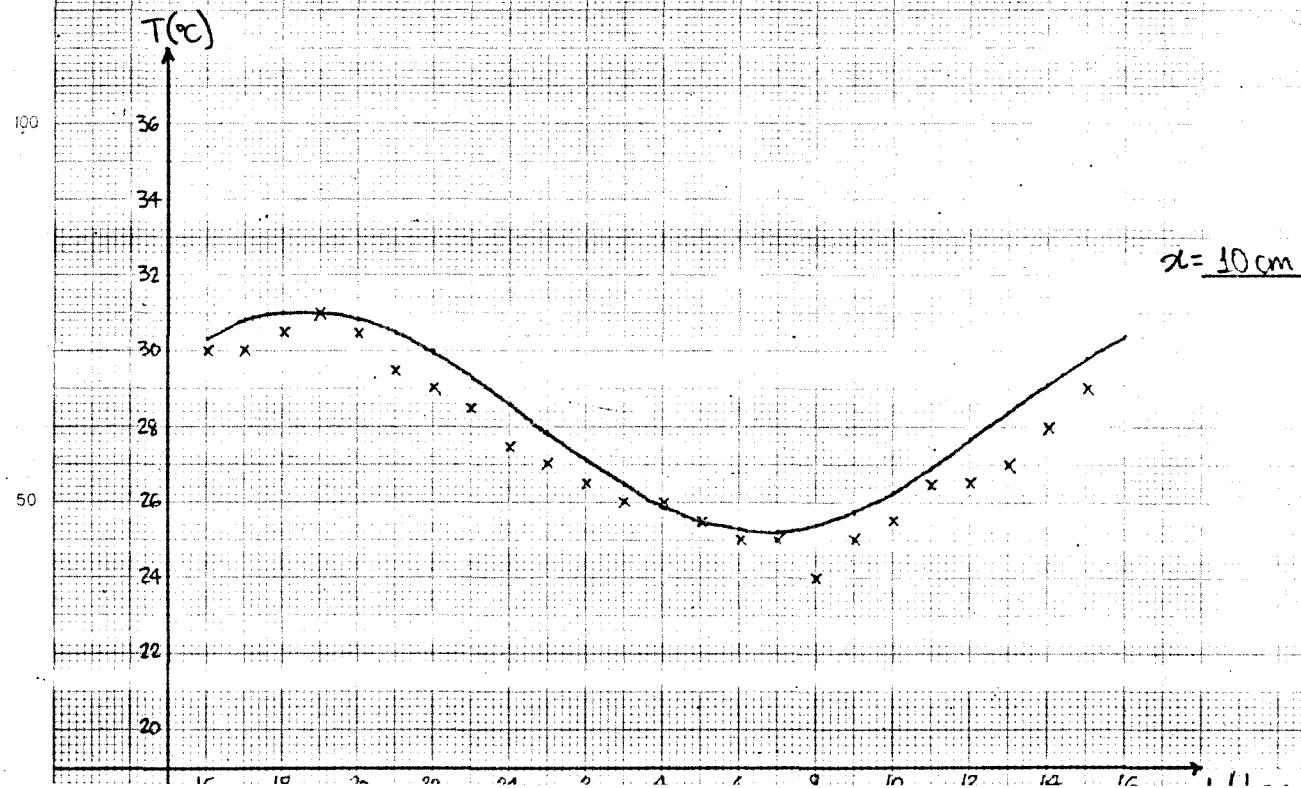


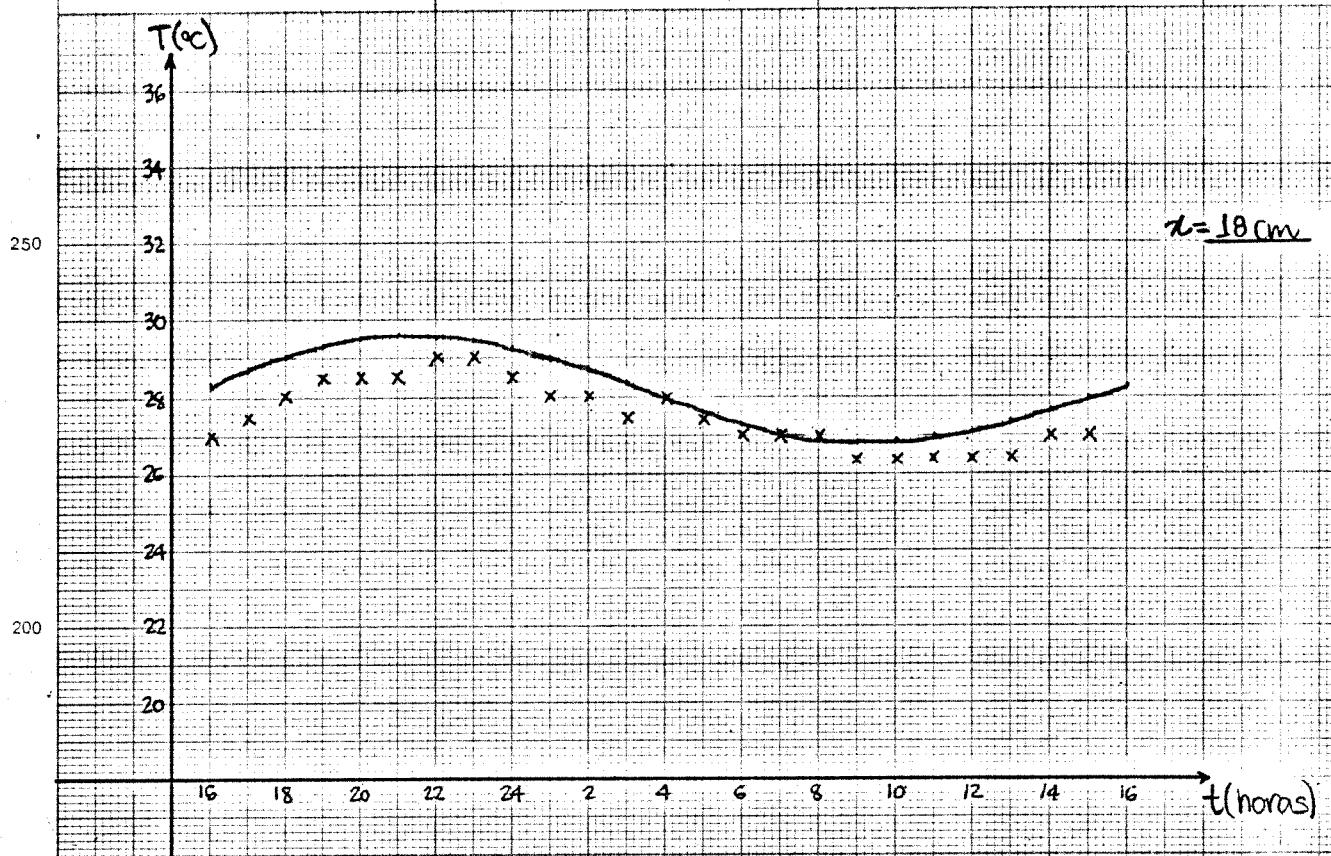
ELEMENTOS FINITOS
 $\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS





ELEMENTOS FINITOS
 × × × DADOS EXPERIMENTAIS





ELEMENTOS FINITOS

$\times \times \times \times$ DADOS EXPERIMENTAIS

