

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Este exemplar corresponde a redação final da
tese defendida por Paulo Magalhães Filho e
aprovada pela comissão julgadora em 05 de
junho de 1986.

Paulo Magalhães Filho
17-07-86

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE ARMAZENADOR DE
CALOR SENSÍVEL COM TUBOS SÓLIDOS

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

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

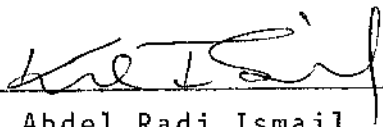
TESE DE: DOUTORADO

TÍTULO DA TESE: ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE
ARMAZENADOR DE CALOR SENSÍVEL COM
TUBOS SÓLIDOS

AUTOR: PAULO MAGALHÃES FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. KAMAL A. R. ISMAIL

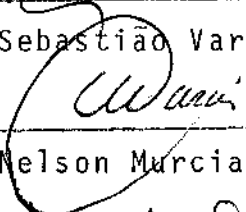
Aprovado por:



Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail



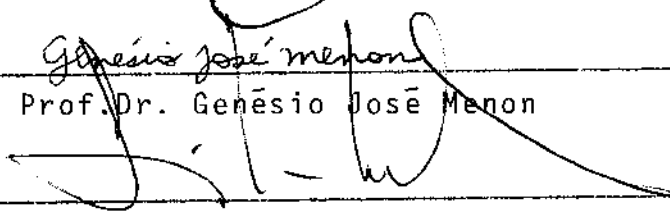
Prof. Dr. Sebastião Varella



Prof. Dr. Nelson Murcia



Prof. Dr. Genésio José Menon



Prof.^a Dr.^a Sílvia Azucena Nebra

Campinas, 05 de junho de 1986

PAULO MAGALHÃES FILHO

ENG. MECÂNICO, ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, 1975
MESTRE EM CIÊNCIAS, ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ ,
1978

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE ARMAZENADOR DE
CALOR SENSÍVEL COM TUBOS SÓLIDOS

ORIENTADOR: PROF. Dr. KAMAL A. R. ISMAIL

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

CAMPINAS, 1986

UNICAMP

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. KAMAL A.R. ISMAIL, orientador, amigo e incentivador, pela oportunidade que me ofereceu de poder trabalhar em sua equipe.

Ao Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CARRASCO ALTEMANI pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. CHANG-YU LIU pela dedicação com que sempre me atendeu.

Aos Prof. da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas.

Aos técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia de Campinas.

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

SUMÁRIO

I - SINOPSE	P - v
II - ABSTRACT	P - vi
III - SIMBOLOGIA	P - vii a xii
IV - LISTA DE FIGURAS	P - xiii a xiv
V - LISTA DE TABELAS	P - xv
1. CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	P - 1 a 7
2. CAPÍTULO 2 - A MODELAGEM TEÓRICA	P - 8 a 23
3. CAPÍTULO 3 - O MÉTODO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL	P - 24 a 39
4. CAPÍTULO 4 - A MODELAGEM FÍSICA E O MÉTODO DOS TESTES	P - 40 a 52
5. CAPÍTULO 5 - ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CALOR ARMAZENADO	P - 53 a 57
6. CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	P - 58 a 146
7. CAPÍTULO 7 - PROJETO ANALÍTICO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO	P - 147 a 168
8. CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	P - 169
VI - APÊNDICE	P - 171 a 182
VII - BIBLIOGRAFIA	P - 183 a 185
VIII - ÍNDICE	P - 186 a 188

SINOPSE

Este trabalho apresenta em sua introdução, uma orientação sobre o problema de armazenamento de calor sensível, onde se destaca o caso onde o fluido escoar no interior de um cilindro oco, tendo a superfície externa isolada termicamente.

A modelagem matemática e a solução numérica são feitas para que se tenha a previsão do comportamento da resposta transiente do calor sensível armazenado em sólidos de formato cilíndrico.

A equação que descreve a distribuição de temperatura no sólido é a Equação de FOURIER e o método numérico utilizado é o Método das Diferenças Finitas.

Os materiais armazenadores e os fluidos utilizados são os pares aço-óleo térmico e concreto-ar, para os quais foram montados bancos de ensaios, distintos, com recursos que possibilitam a variação da temperatura e da vazão do fluido. Os resultados dos testes de carregamento e descarregamento são apresentados na forma de gráficos e tabelas.

Comparando os resultados encontrados, através dos dados levantados experimentalmente e da previsão feita através da solução numérica-computacional, uma discussão é apresentada e utilizada para as conclusões e sugestões de aplicação dos resultados deste trabalho.

Como aplicação, tem-se o projeto analítico e a verificação experimental de uma unidade armazenadora, fazendo também uma discussão dos resultados comparativos encontrados.

ABSTRACT

This work presents the results of a numerical model for a sensible heat storage system composed of hollow tubes and also the experimental analysis carried out to establish the validity of the model and the performance of the storage system under varying operational conditions.

The analytical model developed is solved numerically using an interactive finite difference method and the obtained results of temperature distribution in the solid and fluid as well as the heat stored are presented in a non dimensional form.

Experimentals are performed on a specially designed loop rig to test storage tanks. The rig enables using oil and air, control of temperature and flow rate. A very large number of thermocouples was distributed along and across the model as well as at the entry and exit sections of the working fluid in order to enable mapping of the temperature profiles. Two different model materials were used in this study: the first was made of steel for high temperature applications while the other was made of concrete.

This work also presents a theoretical and experimental model to describe the transient behaviour of a sensible heat storage unit formed by arrays of thick steel tubes in the form of heat exchanger. In the proposed arrangement the hot and cold fluids can flow in opposite and parallel directions to enable verifications of the theoretical results.

Curves and tables of comparison between numerical results and the experiments are presented and discussions.

SIMBOLOGIA

a	→ variável independente	-
A	→ área de troca de calor com o fluido	L^2
A	→ constante auxiliar (eq. 81)	Θ^{-1}
B	→ constante auxiliar (eq. 82)	Θ^{-1}
B_i	→ número de Biot (eq. 39)	1
B_{iR}	→ número de Biot real	1
B_{iT}	→ número de Biot teórico	1
B_1	→ número de Biot para o lado do fluido → frio (eq. 111)	1
B_2	→ número de Biot para o lado do fluido quente (eq. 110)	1
C	→ parâmetro adimensional (eq. 44)	1
C	→ parâmetro adimensional (eq. 116)	1
C^*	→ constante auxiliar (eq. 83)	Θ^{-1}
c	→ calor específico genérico	$L^2 \Theta^{-2} T^{-1}$
CAT	→ capacidade térmica	$ML^{-1} T^{-1} \Theta^{-2}$
c_f	→ calor específico do fluido	$L^2 \Theta^{-2} T^{-1}$
c_m	→ calor específico do material armazenador	$L^2 \Theta^{-2} T^{-1}$
c_1	→ calor específico do fluido frio	$L^2 \Theta^{-2} T^{-1}$
c_2	→ calor específico do fluido quente	$L^2 \Theta^{-2} T^{-1}$
D	→ constante auxiliar (eq. 85)	Θ^{-1}
D	→ parâmetro adimensional (eq. 115)	1
D_i	→ diâmetro interno	L
E_1	→ constante auxiliar (eq. 116)	$ML^2 \Theta^{-3} T^{-1}$
E_2	→ constante auxiliar (eq. 116)	$ML^2 \Theta^{-3} T^{-1}$
f	→ função	-
f_{ck}	→ resistência característica a compressão	$ML \Theta^{-2}$

Fo	→ número de Fourier (eq. 112)	1
G_1	→ parâmetro adimensional (eq. 117)	1
G_2	→ parâmetro adimensional (eq. 118)	1
h	→ coeficiente de película genérico	$M \Theta^{-3} T$
$\bar{h}_c$	→ coeficiente de película médio entre o fluido e o material armazenador	$M \Theta^{-3} T$
$\bar{h}_{ei}$	→ coeficiente de película médio entre o isolante e o meio ambiente	$M \Theta^{-3} T$
$\bar{h}_R$	→ coeficiente de película real médio	$M \Theta^{-3} T$
$\bar{h}_T$	→ coeficiente de película teórico médio	$M \Theta^{-3} T$
$\bar{h}_1$	→ coeficiente de película médio entre o fluido frio e o material armazenador	$M \Theta^{-3} T^{-1}$
$\bar{h}_2$	→ coeficiente de película médio entre o fluido quente e o material armazenador	$M \Theta^{-3} T^{-1}$
i	→ termo da matriz ou direção ordenada	-
j	→ termo da matriz ou direção ordenada	-
k	→ variável independente genérica	-
K_m	→ coeficiente de condutibilidade térmica do material armazenador	$M L \Theta^{-3} T^{-1}$
L	→ comprimento	L
$\dot{m}_f$	→ vazão mássica de fluido	$M \Theta^{-1}$
$\dot{m}_1$	→ vazão mássica de fluido frio	$M \Theta^{-1}$
$\dot{m}_2$	→ vazão mássica de fluido quente	$M \Theta^{-1}$
M	→ massa	M
M	→ número de pontos	-
M_m	→ massa do material armazenador	M
n	→ número de variáveis independentes	-
N	→ número de pontos	-
Nu	→ número de Nusselt	1
Nu_x	→ número de Nusselt local	1
NR	→ número de pontos ao longo do raio	-

NX	→ número de pontos ao longo do comprimento	-
Pe	→ número de Peclet	1
Pr	→ número de Prandtl	1
P_1	→ perímetro da seção externa do tubo armazenador	L
P_2	→ perímetro da seção interna do tubo armazenador	L
$\bar{Q}$	→ calor médio armazenado	$ML^2 \theta^{-2}$
Q_{max}	→ calor teórico máximo armazenável	$ML^2 \theta^{-2}$
Q^*	→ parâmetro adimensional (eq. 98)	1
Q_{pi}	→ taxa de perda de calor	$ML^2 \theta^{-3}$
Q_{taxa}	→ taxa média de armazenamento	$ML^2 \theta^{-3}$
Q_{TR}	→ taxa de transferência de calor do fluido para o material armazenador	$ML^2 \theta^{-3}$
Q_{θ}	→ calor parcial armazenado	$ML^2 \theta^{-2}$
r	→ raio genérico do tubo	L
r_{ex}	→ raio externo	L
r_i	→ raio interno	L
r_p	→ raio proposto	L
r_1	→ raio interno do tubo armazenador	L
r_2	→ raio externo do tubo armazenador	L
R	→ parâmetro adimensional (eq. 27)	1
R^*	→ parâmetro adimensional (eq. 114)	1
Re	→ número de Reynolds	1
S_{ei}	→ superfície externa do isolante	L^2
S_p	→ área de passagem proposta para o fluido frio	L^2
S_1	→ área da seção interna do tubo	L^2
$\bar{t}_a$	→ temperatura média do ambiente durante o ensaio	T
$\bar{t}_b$	→ temperatura média da mistura	T

$\bar{t}_{ei}$	→ temperatura média da superfície externa do isolante	T
t_{ex}	→ temperatura da superfície externa do tubo armazenador	T
t_f	→ temperatura de referência do fluido ao longo do escoamento	T
$\bar{t}_f$	→ temperatura média de referência do fluido ao longo do escoamento	T
t_{fi}	→ temperatura de referência do fluido na entrada do tubo	T
$\bar{t}_{fi}$	→ temperatura média de referência do fluido na entrada do tubo	T
$\bar{t}_{fs}$	→ temperatura média de referência do fluido na saída do tubo	T
t_i	→ temperatura da superfície interna do tubo armazenador	T
t_m	→ temperatura do material armazenador	T
$\bar{t}_m$	→ temperatura média do material armazenador	T
t_p	→ temperatura de parede	T
t_0	→ temperatura do material armazenador no instante zero	T
$\bar{t}_0$	→ temperatura média do material armazenador no instante zero	T
t_1	→ temperatura de referência do fluido frio	T
t_{1e}	→ temperatura de entrada do fluido frio	T
t_2	→ temperatura de referência do fluido quente	T
t_{2e}	→ temperatura de entrada do fluido quente	T
t_{2s}	→ temperatura de saída do fluido quente	T
T	→ temperatura genérica	T
T	→ parâmetro adimensional (eq. 109)	1
T_f	→ parâmetro adimensional (eq. 15)	1

T_m	→ parâmetro adimensional (eq. 16)	1
U	→ parâmetro adimensional (eq. 33)	1
U	→ parâmetro adimensional (eq. 119)	1
$\bar{v}$	→ velocidade média do fluido	$L \theta^{-1}$
v_1	→ velocidade média do fluido frio	$L \theta^{-1}$
v_2	→ velocidade média do fluido quente	$L \theta^{-1}$
V	→ volume genérico	L^3
V	→ volume do material armazenador	L^3
x	→ sentido longitudinal	-
x	→ comprimento genérico	L
X	→ parâmetro adimensional (eq. 43)	1
X^*	→ parâmetro adimensional (eq. 113)	1
Z	→ solução da equação diferencial	-
Z^*	→ resultado numérico da eq. diferencial	-

SÍMBOLOS GREGOS

α	→ difusividade térmica do material armazenador	$L^2 \theta^{-1}$
γ	→ valor máximo do erro introduzido	-
Δ	→ incremento	-
Δt_1	→ diferença de temperatura (eq. 99)	T
Δt_2	→ diferença de temperatura (eq. 100)	T
Δt_3	→ diferença de temperatura (eq. 102)	T
$\Delta \theta$	→ incremento do tempo computacional	θ
ϵ	→ energia não disponível	-
η	→ parâmetro adimensional (eq. 47)	1
θ	→ tempo genérico	θ
θ_e	→ tempo de duração do ensaio	θ
∇	→ operador	-

λ	→	parâmetro adimensional (eq. 37)	1
μ_b	→	viscosidade dinâmica do fluido para t_b	$ML^{-1} \theta^{-1}$
μ_p	→	viscosidade dinâmica do fluido para t_p	$ML^{-1} \theta^{-1}$
ξ	→	parâmetro adimensional (eq. 21)	1
ρ	→	massa específica genérica	ML^{-3}
ρ_f	→	massa específica do fluido	ML^{-3}
ρ_m	→	massa específica do material armazenador	ML^{-3}
ρ_1	→	massa específica do fluido frio	ML^{-3}
ρ_2	→	massa específica do fluido quente	ML^{-3}
τ	→	tempo genérico	θ

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA	
1. Esquema da unidade armazenadora	9	
2. Esquema para o balanço energético	11	
3. Seção longitudinal no sistema de coordenadas	25	
4. Representação da matriz $T(i,j)$	25	
5. Malha representativa da posição dos nós	31	
6. Conjunto do molde do armazenador de concreto	43	
7. Modelo de concreto sem isolamento	43	
8. Conjunto do armazenador de aço (modelo nº 1)	44	
9. Distribuição dos pontos de medida de temperatura do modelo nº 1	45	
10. Banco de testes - modelos aço-óleo	49	
11. Banco de testes - modelos concreto-ar	50	
12. Tubo auxiliar para desenvolvimento da camada hidrodinâmica para o modelo nº 1	53	
13. Esquema utilizado para o cálculo do calor armazenado	55	
14. Esquema da distribuição dos pontos de medida de temperatura no modelo nº1	59	
15 a 20. Resultados experimentais do ensaio nº 1	60	a 62
21 a 26. Resultados experimentais do ensaio nº 2	63	a 66
27. Esquema da distribuição dos pontos de medida de temperatura no modelo nº 2	66	
28 a 35. Resultados experimentais do ensaio nº 3	67	a 73
36 a 43. Resultados experimentais do ensaio nº 4	74	a 81
44 a 51. Resultados experimentais do ensaio nº 5	82	a 89
52. Esquema da distribuição dos pontos de medida de temperatura nos modelos nº 3, nº 4 e nº 5	90	
53 a 57. Resultados experimentais do ensaio nº 6	91	a 94
58 a 62. Resultados experimentais do ensaio nº 7	95	a 97

	PÁGINA
63 a 67. Resultados experimentais do ensaio nº 8	98 a 100
68 a 72. Resultados experimentais do ensaio nº 9	101 a 103
73 a 77. Resultados experimentais do ensaio nº 10	104 a 106
78 a 82. Resultados experimentais do ensaio nº 11	107 a 110
83. Curvas de carregamento do modelo nº 1	129
84. Curvas de carregamento do modelo nº 2	130
85. Curvas de descarregamento do modelo nº 2	131
86. Curvas de carregamento do modelo nº 3	132
87. Curvas de carregamento do modelo nº 4	133
88. Curvas de carregamento do modelo nº 5	134
89. Curvas teóricas e experimentais dos ensaios	135
90. Esquema da seção transversal do armazenador	147
91. Esquema do armazenador	148
92. Espelho fixo do armazenador	149
93. Espelho móvel do armazenador	150
94. Esquema do modelo proposto	152
95. Esquema do banco de testes	158
96. Resultados experimentais do ensaio nº 12	160
97. Resultados experimentais do ensaio nº 13	161
98. Resultados experimentais do ensaio nº 14	162
99. Comparação dos resultados para temperatura da superfície dos tubos $\tilde{a}$ 50 (mm) do espelho dian- teiro	163
100. Comparação do calor armazenado teórico e expe- rimental	164

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
1. Dimensões dos modelos físicos	42
2. Profundidades de colocação e número de pontos de medida de temperatura	45
3. Características dos modelos físicos	58
4 a 10. Resultados teóricos do modelo nº 1	112 a 118
11 a 19. Resultados dos valores para os ensaios do modelo nº 2	120 a 128
20. Resumo dos valores para os ensaios do modelo nº 1	136
21. Resumo dos valores para os ensaios do modelo nº 2	137
22. Resumo dos valores para os ensaios dos modelos nº 3, nº 4 e nº 5	138 a 139
23. Valores comparativos de parâmetros dos ensaios	140
24. Valores comparativos de parâmetros dos materiais e fluidos	140
25. Valores comparativos dos modelos quanto a energia não disponível	141
26. Algumas grandezas comparativas para os ensaios dos modelos de concreto.	144
27. Resumo das grandezas dos ensaios do armazena - dor experimental	159
28. Resumo dos valores para o ensaio nº 14	165
29. Valores comparativos do ensaio nº 14	166

C A P Í T U L O I

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES HISTÓRICAS

Há doze anos que as palavras energia e crise aparecem sempre juntas. Acredita-se que a crise energética tenha se iniciado em outubro de 1973, quando o cartel dos países exportadores de petróleo, a OPEP, deflagrou a elevação brutal dos preços do petróleo. No ano de 1971 o relatório do Clube de Roma sobre os limites do desenvolvimento, alertou para o fato de que as jazidas de petróleo se esgotariam em poucas décadas. Elas não se esgotaram, ainda, mas a elevação dos preços entre 1973 e 1981 teve o mesmo efeito sobre a economia mundial que a escassez resultante de um processo de esgotamento das jazidas.

Mas as economias dos países industrializados não só agüentaram bem o choque como dividiram a aliança da OPEP, que parecia indissolúvel. Oito anos depois do início da crise, os preços do petróleo, fazendo uma trajetória inversa, caíram em poucos meses de 37 para menos de 30 dólares o barril. Esse fato gerou um certo otimismo entre os países industrializados, mas a OPEP, foi obrigada a diminuir sua produção, pois verificou-se uma queda no consumo de petróleo, devido em parte, aos países carentes desta fonte energética, reprogramarem seus consumos, eliminando gastos inúteis através de programas de racionalização do uso, ou utilizando fontes alternativas. Para evitar que o futuro seja uma "gangorra", oscilando entre fases de abundância e escassez, soluções simplistas estão sendo abandonadas e o caminho da abundância que está na perseguição de projetos economizadores de energia, por exemplo, recuperando a energia térmica, estão sendo pesquisados e os resultados aplicados.

No Brasil, [1] no ano de 1983, um estudo que teve por objetivo identificar a parcela de energia útil contida no consumo final de energia dos diversos setores da economia, revelou que 56% da oferta interna bruta, se perderam na transformação, na distribuição, na armazenagem ou no uso final. O estudo, conforme consta de sua apresentação, "se constituirá, por certo, em um dos principais instrumentos para auxiliar a implantação de programas de substituição e conservação de energia, permitindo a identificação dos setores de atividade energeticamente menos eficiente, bem como as formas de energia utilizadas com menor eficiência".

1.2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Na otimização de sistemas energéticos, o armazenamento de calor tem assumido paulatinamente uma importância incontestável. Neste quadro se insere o presente trabalho, voltado para a análise do armazenamento térmico por calor sensível em materiais sólidos.

Muitos problemas práticos, em que a temperatura e o fluxo de calor podem ser considerados como funções de uma única variável, são solucionados aplicando um enfoque unidimensional em regime permanente. Por outro lado, quando os contornos de um sistema são irregulares ou quando a temperatura ao longo de um contorno não é uniforme, o tratamento unidimensional pode deixar de ser satisfatório. Em tais casos, a temperatura é uma função de duas e possivelmente até de três coordenadas.

O calor conduzido através das paredes de um cilindro curto de parede espessa é um exemplo típico dessa classe de problema. Para que as condições de regime permanente possam

ser alcançadas, deve transcorrer algum tempo depois de início do o processo de transmissão de calor, para permitir que as condições transitórias desapareçam.

Para condução de calor transitória em muitas formas simples, sujeitas a condições de contorno de importância prática, a distribuição de temperatura e o fluxo de calor foram calculados e os resultados foram apresentados por BOELTER [2].

Considerações importantes devem ser avaliadas no momento de se definir e assumir situações reais que possibilitem a proximidade da formulação matemática. Uma delas é com relação à temperatura do fluido escoando numa interface líquido-sólido; na realidade apenas quando está havendo mudança de fase é que a temperatura do fluido não muda. Em muitas ocasiões, contudo, a variação de temperatura que ocorre no fluido é pequena devido a alta capacidade térmica do fluido.

Se a maior resistência à transferência de calor é oferecida pela película convectiva na interface líquido-sólido, o gradiente de temperatura dentro do sólido pode ser muito pequeno, ou seja, todo o material armazenador poderá estar à uma mesma temperatura. Quando isto acontece o calor armazenado em uma unidade ou sistema de armazenamento pode ser previsto utilizando análise por parâmetros concentrados, juntamente com modelo para fluido de capacidade térmica infinita, cuja solução foi apresentada por GRÖBER [3].

Outra consideração importante para se assumir condições reais é com relação a condutividade térmica do material armazenador, que pode ser analisado segundo um modelo de condutividade térmica finita ou modelo de condutividade térmica infinita, sendo que a escolha de um ou outro, dependerá da ava-

liação da magnitude do erro introduzido no cálculo das variáveis que participam de cada modelo, cujo estudo foi apresentado por SZEBO [4].

O problema estudado neste trabalho, envolve considerações distintas para cada condição de contorno, que serão analisadas na abordagem teórica.

1.3. FATORES INFLUENTES NA DEFINIÇÃO DO MODELO

Existem duas resistências térmicas na transferência de calor de um fluido para o interior de um material armazenador e vice-versa. Uma ocorre na superfície de contato entre sólido e líquido e é inversamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor convectivo. A outra resistência térmica está associada à transferência de calor da superfície para o interior do material armazenador, que por sua vez, tem duas direções perpendiculares e são inversamente proporcionais à condutibilidade térmica do material armazenador. A principal transferência de calor no material armazenador é toda via perpendicular ao escoamento do fluido.

Se a resistência à transferência de calor por convecção é muito grande comparado ao que oferecido à transferência de calor dentro do material, desprezíveis gradientes de temperatura surgirão no material armazenador na direção normal ao fluxo. Se as duas resistências são de igual grandeza ou se a resistência interna é muito maior, significativos gradientes de temperatura irão aparecer no material armazenador. O modelo matemático usado para prever a resposta transiente de uma unidade de armazenamento segundo SCHMIDT [5] deve incluir os efeitos da condução axial e transversal dentro do ma

terial e denomina-se modelo de condutividade finita.

A relativa influência das resistências devido a convecção e a condução, deve ser usualmente associada com a magnitude do número de Biot, cuja definição está associada à geometria da unidade armazenadora. Se o número de Biot é pequeno ($Biot < 0,1$), conforme ARPACI [6], o gradiente de temperatura dentro do material armazenador será insignificante e um modelo unidimensional pode ser utilizado; se o número de Biot está entre $0,1 \leq Bi \leq 100$, a distribuição da temperatura dentro do material armazenador, dependerá das resistências interna e externa à transferência de calor; se o número de Biot for maior que 100, o problema torna-se unicamente dependente das dimensões do corpo e das propriedades físicas do material com difusividade térmica de grande magnitude.

Para se escolher as equações que regem o comporta - mento dos parâmetros que estão envolvidos no escoamento de um fluido no interior de tubos, considerações importantes devem ser feitas e trazem consigo os limites impostos na modelagem física do fenômeno que se estuda. O transporte de energia em escoamento laminar envolvendo líquido de alta viscosidade, a qual depende fortemente a temperatura, resulta em número de Prandtl relativamente grande e o perfil térmico se desenvolve muito mais lentamente do que o perfil hidrodinâmico. Para que se tenha um perfil de velocidade completamente desenvolvido num escoamento laminar no interior de tubos, é necessário observar que um comprimento de entrada será importante para que se consiga este estado.

Na determinação do coeficiente de transferência de calor na parede, considerações importantes devem ser feitas, para que se possa definir o fenômeno que ocorre em termos da

taxa de calor constante ou temperatura da parede constante, bem como as propriedades do fluido que são calculadas para a temperatura média da mistura segundo KAYS [7].

A análise destes fatores influentes na modelagem, definiram os modelos, e o modelo teórico utilizado neste estudo teve as seguintes considerações:

- 1) Propriedades físicas do material armazenador constantes;
- 2) Propriedades físicas do fluido transportador de energia variáveis com a temperatura;
- 3) Variação da temperatura em degrau na entrada;
- 4) Velocidade do fluido constante;
- 5) Variação do coeficiente de transferência de calor convectivo;
- 6) Perfil hidrodinamicamente desenvolvido;
- 7) Perfil térmico em desenvolvimento;
- 8) Distribuição inicial uniforme da temperatura no material armazenador;
- 9) Nenhuma transferência de calor pelos lados da unidade de armazenamento;
- 10) Condutividade finita.

Na definição dos modelos físicos, foram observados alguns detalhes evidenciados por REAY [8], além de outros:

1) O armazenamento de calor sensível utilizado na indústria está associado normalmente com a produção de vapor, sendo que, os evaporadores e os acumuladores podem operar separadamente ou em funções conjuntas.

2) Devido aos elevados aumentos no custo da energia, outros tipos de armazenamento foram tendo interesse e um deles, o de energia solar tornou-se atrativo tanto para a indústria como para o comércio.

3) O armazenamento de calor sensível, empregado fora do pico de demanda, pode ter outros tipos de material armazenador além da água, que é a mais conhecida comercialmente. A maior vantagem da utilização da água como meio armazenador é o fato de se poder utilizar o próprio fluido, sem necessidade de um segundo meio para reutilização. Se a água (ou outro meio) não pode ser reutilizado diretamente, um trocador-armazenador deverá ser utilizado e o material armazenador poderá ser sólido.

4) Alumínio, e sais fundidos podem ser utilizados como meio armazenador, mas as faixas de utilização estão limitadas pelos respectivos pontos de fusão. Ferro-fundido, aço e materiais cerâmicos são os melhores meios armazenadores sob o ponto de vista de capacidade, mas a sua temperatura máxima de armazenamento é determinada por fatores, tais como o desempenho do sistema de isolamento e o tipo de fluido transportador de calor.

5) Alguns materiais, tal como o concreto, apresentam características importantes que influem na sua escolha, no que se refere ao carregamento ou a extração do calor, pois apresentam baixa difusividade térmica.

CAPITULO II

CAPÍTULO 2

A MODELAGEM TEÓRICA

2.1. DESCRIÇÃO TEÓRICA DO FENÔMENO

A resposta transiente de uma unidade de armazenamento composta de uma seção transversal cilíndrica oca com uma su perfície isolada e a outra exposta a um fluido que tem capacidade térmica infinita, pode ser conseguida analiticamente.

Porém, em muitas aplicações, a resistência oferecida ao fluxo de calor pela película convectiva é da mesma ordem de grandeza, ou, menor que a resistência oferecida pelo material ar mazenador e sob estas condições, aparecerão os gradientes de temperatura dentro do material armazenador e o modelo usado pa ra prever a resposta transiente de cada unidade, deve portanto, incluir os efeitos da condução axial e transversal dentro do material.

Nesta descrição do fenômeno, devemos evidenciar que, na realidade apenas quando está havendo mudança de fase é que a temperatura do fluido transportador de energia da unidade não se altera. Em muitas ocasiões contudo, a variação de tempe ratura que o fluido experimenta é pequena devido a alta capacidade térmica do fluido.

Baseados nestas considerações, uma predição acurada da resposta transiente de armazenamento de uma unidade conforme fig. 1, será obtida pelo uso do modelo de condutividade fi nita. O modelo para este caso dependerá da configuração geométrica do material armazenador e da distribuição da temperatura na unidade armazenadora.

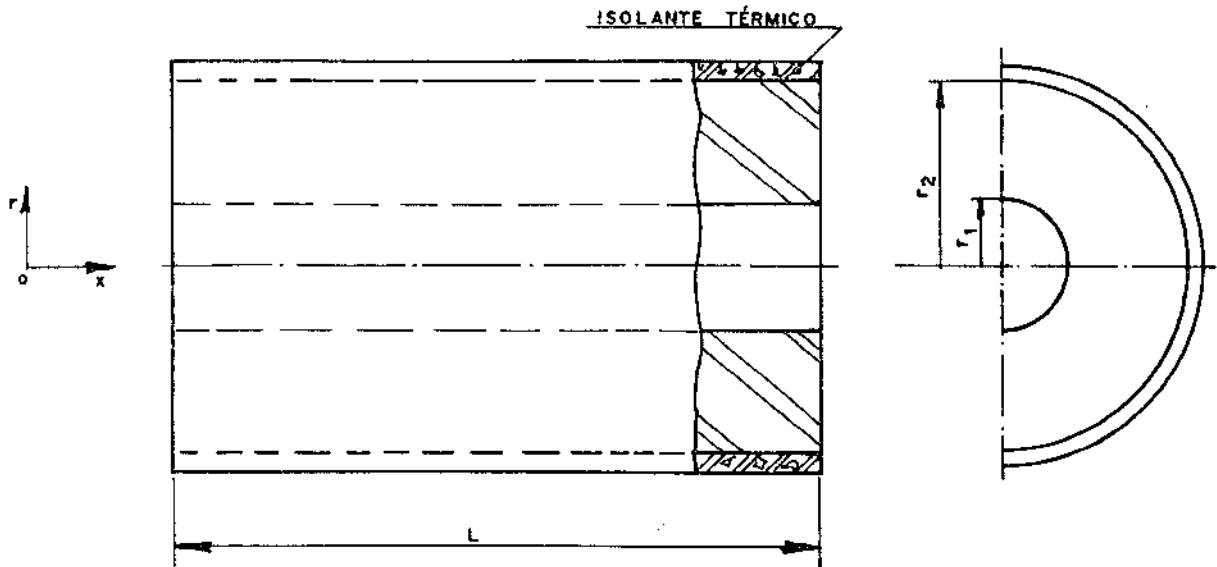


Figura 1 - Unidade Armazenadora

2.2. EQUAÇÕES UTILIZADAS NA MODELAGEM

a) Para o material armazenador:

Para o material armazenador, um sólido, onde os termos de dissipação viscosa e compressibilidade são nulos; onde a massa específica é constante; onde não existe geração interna de calor, a equação da energia em função da temperatura do material é a seguinte conforme BIRD [9] :

$$\frac{\partial t_m}{\partial \theta} = \alpha \nabla^2 t_m \quad (1)$$

Para a descrição teórica do fenômeno, considerando a distribuição de temperatura simétrica numa seção transversal; considerando que o sólido possui propriedades físicas uniformes e independentes da temperatura, a equação geral da condução de calor, que estabelece a distribuição de temperatura e a transmissão de calor por condução, se reduz à equação

de Fourier como descreveu CARSLAW [10] , em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\rho_m c_m}{K_m} \frac{\partial t_m}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \quad (2)$$

b) Para o fluido:

Na transmissão de calor, o valor numérico do coeficiente de película, depende da escolha da temperatura de referência do fluido. Para um fluido escoando num conduto, sua temperatura não é uniforme numa seção e varia ao longo da direção do escoamento e da direção do fluxo de calor. Para uma determinada seção transversal do conduto, a temperatura do fluido no centro poderia ser escolhida como a temperatura de referência, mas devido as dificuldades práticas para se medir a sua magnitude, além de não representar a variação da entalpia em todo o fluido, adotaremos aqui a temperatura média da mistura, que é de uso geral, conforme KAYS [11] , como a temperatura de referência do fluido.

O uso da temperatura média da mistura como a temperatura de referência do fluido nos permite fazer o seguinte balanço de energia, analisando a fig. 2, e considerando que a energia saindo de um volume incremental é igual: a energia entrando, menos a energia acumulada dentro deste volume, menos a energia transferida para o material armazenador, tudo no mesmo intervalo de tempo.

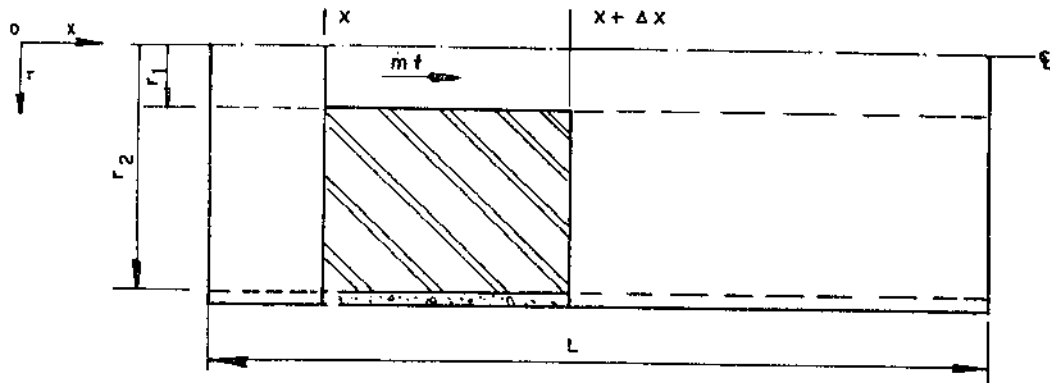


Figura 2 - Esquema para o Balanço Energético

$\frac{hA\Delta x}{L} (t_f - t_m) \rightarrow$ representa o calor transferido do fluido para o material armazenador no volume

$\dot{m}_f c_f t_f \Big|_x \rightarrow$ representa o conteúdo de energia do fluido entrando no volume pela seção x .

$\dot{m}_f c_f t_f \Big|_{x+\Delta x} \rightarrow$ representa o conteúdo de energia do fluido deixando o volume pela seção $[x + \Delta x]$

$A\Delta x \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \theta} \rightarrow$ taxa de acumulação de energia pelo fluido contido dentro do volume.

Então:

$$\dot{m}_f c_f t_f \Big|_x - A\Delta x \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \theta} - \frac{hA\Delta x}{L} (t_f - t_m) = \dot{m}_f c_f t_f \Big|_{x+\Delta x} \quad (3)$$

$$\text{Como: } t_f \Big|_{x+\Delta x} = t_f \Big|_x + \frac{\partial t_f}{\partial x} \Delta x \quad \therefore \quad (4)$$

$$- A\Delta x \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \theta} - \frac{hA\Delta x}{L} (t_f - t_m) = \dot{m}_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial x} \Delta x \quad (5)$$

ou

$$\dot{m}_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{h A}{L} (t_m - t_f) - A \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \theta} \quad (6)$$

Se admitirmos que o fluido passa com uma determinada velocidade pelo volume considerado, cuja magnitude torna desprezível a taxa de acumulação de energia pelo fluido, podemos negligenciá-la, (Avaliamos a magnitude do erro introduzido no apêndice 3) daí:

$$\dot{m}_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{h A}{L} (t_m - t_f) \quad (7)$$

2.3. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Para as eq. (2) e (7), temos

Condições iniciais:

$$\theta = 0$$

$$t_f = t_m = t_o \quad (8)$$

Condições de contorno:

$$\left. \begin{array}{l} \theta > 0, \quad r_1 < r < r_2 \\ x = 0 \quad t_f = t_{fi} \quad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0 \\ x = L \quad \frac{\partial t_m}{\partial x} = 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 > 0, \quad r = r_1 \\ h(t_m - t_f) = K_m \frac{\partial t_m}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 > 0, \quad r = r_2 \\ \frac{\partial t_m}{\partial r} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2.4. ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

a) Para o fluido em movimento:

$$A = 2\pi r_1 L \quad (12)$$

Substituindo (12) em (7), temos:

$$\dot{m}_f c_f L \frac{\partial t_f}{\partial x} = 2\pi r_1 L h (t_m - t_f) \quad (13)$$

ou

$$\frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} (t_m - t_f) \quad (14)$$

Fazendo:

$$T_f = \frac{t_f - t_o}{t_{fi} - t_o} \quad (15)$$

$$T_m = \frac{t_m - t_o}{t_{fi} - t_o} \quad (16)$$

De (15):

$$t_f = T_f(t_{fi} - t_o) + t_o \quad (17)$$

$$\therefore \frac{\partial t_f}{\partial T_f} = t_{fi} - t_o \quad \text{ou} \quad \partial t_f = (t_{fi} - t_o) \partial T_f \quad (18)$$

Da equação (14):

$$\partial t_f = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} (t_m - t_f) \partial x \quad (19)$$

Para:

$$\partial \xi = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \partial x \quad (20)$$

$$\xi = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} x \quad (21)$$

De (16):

$$t_m = T_m (t_{fi} - t_o) + t_o \quad (22)$$

Substituindo (18) em (19):

$$(t_{fi} - t_o) \partial T_f = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} (t_m - t_f) \partial x \quad (23)$$

Substituindo (18), (22) em (23):

$$(t_{fi} - t_o) \partial T_f = \frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} [T_m(t_{fi} - t_o) + t_o - T_f(t_{fi} - t_o) - t_o] \partial x \quad (24)$$

ou

$$(t_{fi} - t_o) \partial T_f = (t_{fi} - t_o)(T_m - T_f) \left(\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \right) \partial x \quad (25)$$

Substituindo (20) em (25), resulta a equação adimensional

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \quad (26)$$

b) Para o material armazenador:

A relação adimensional utilizada para o raio do tubo é:

$$R = \frac{r}{r_2 - r_1} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} \therefore \quad r &= R (r_2 - r_1) \\ \partial r &= \partial R (r_2 - r_1) \\ \partial r^2 &= \partial R^2 (r_2 - r_1)^2 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

De (16):

$$\left. \begin{aligned} t_m &= T_m(t_{fi} - t_o) + t_o \\ \partial t_m &= \partial T_m(t_{fi} - t_o) \\ \partial^2 t_m &= \partial^2 T_m(t_{fi} - t_o) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Substituindo (21), (28) e (29) em (2):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m c_m}{k_m} \frac{\partial}{\partial \theta} [T_m(t_{fi} - t_o) + t_o] &= \frac{\partial^2 T_m(t_{fi} - t_o)}{\partial R^2 (r_2 - r_1)^2} + \\ + \frac{1}{R(r_2 - r_1)} \frac{\partial T_m(t_{fi} - t_o)}{\partial R(r_2 - r_1)} &+ \frac{\partial^2 T_m(t_{fi} - t_o)}{\partial \left[\frac{\dot{m}_f c_f \xi}{2\pi r_1 h} \right]^2} \end{aligned} \quad (30)$$

ou:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m c_m}{k_m} (t_{fi} - t_o) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} &= \frac{(t_{fi} - t_o)}{(r_2 - r_1)^2} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(t_{fi} - t_o)}{R(r_2 - r_1)^2} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ (t_{fi} - t_o) \left[\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \right]^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} &\end{aligned} \quad (31)$$

ou:

$$\frac{\rho_m c_m}{k_m} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{1}{(r_2 - r_1)^2} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R(r_2 - r_1)^2} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \left[\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \right]^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \quad (32)$$

A relação adimensional utilizada para a razão entre os raios é:

$$U = \frac{r_1}{r_2} \quad (33)$$

Reagrupando a equação (32):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m c_m}{k_m} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = & \frac{1}{(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ & + \left[\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \right]^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (34)$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = & \frac{k_m}{\rho_m c_m (r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{k_m}{\rho_m c_m R(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ & + \frac{k_m}{\rho_m c_m} \left[\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f} \right]^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (35)$$

Analisando o termo $\frac{2\pi r_1 h}{\dot{m}_f c_f}$ temos que:

$$\frac{r_1 h}{\dot{m}_f c_f} = \frac{L.M.\theta^{-3}.T^{-1}}{M\theta^{-1}.L^2.\theta^{-2}.T^{-1}} = \frac{1}{L} \quad (36)$$

A relação entre os comprimentos incrementais x e o comprimento total do armazenador L , da equação (21), será:

$$\lambda = \frac{2\pi r_1 h L}{\dot{m}_f c_f} \quad (37)$$

$$\frac{\xi}{\lambda} = \frac{x}{L} \quad (38)$$

A razão entre a resistência do fluxo de calor externo e a resistência do fluxo de calor interno, que é a resistência relativa adimensional ou número de Biot, será para a configuração do modelo:

$$B_i = \frac{h (r_2 - r_1)}{K_m} \quad (39)$$

Substituindo (37) em (35), dividindo m. a m. por h e reagrupando, temos:

$$\frac{(\rho_m c_m)}{h} \frac{\partial T_m}{\partial \theta} = \frac{k_m}{h(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{k_m}{h(r_2 - r_1)R(r_2 - r_1)}$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial R} + \frac{k_m \lambda^2}{L^2 h} \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \quad (40)$$

Multiplicando por $(r_2^2 - r_1^2)$ a equação (40), m.

a m.:

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_m c_m)}{h} (r_2^2 - r_1^2) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} &= \frac{k_m}{h(r_2 - r_1)} (r_2 + r_1) \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \\ &+ \frac{k_m}{h(r_2 - r_1)} \frac{(r_2 + r_1)}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \frac{k_m}{h L^2} \lambda^2 (r_2^2 - r_1^2) \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (41)$$

Substituindo (39) em (41):

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_m c_m)}{h} (r_2^2 - r_1^2) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} &= \frac{(r_2 + r_1)}{B_i} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(r_2 + r_1)}{B_i} \frac{1}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ &+ \frac{\lambda^2}{L^2} \frac{(r_2 - r_1)^2}{B_i} (r_2 + r_1) \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (42)$$

A relação entre a diferença dos raios e o comprimento do armazenador será:

$$\chi = \frac{(r_2 - r_1)}{L} \quad (43)$$

A razão $\frac{(\lambda X)^2}{B_i}$ é adimensional .'.
 B_i

$$C = \frac{(\lambda X)^2}{B_i} \quad (44)$$

Substituindo (44) em (42) e dividindo m. a m. por r_2 , temos:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m c_m}{h} (r_2 - r_1)(1 + U) \frac{\partial T_m}{\partial \theta} &= \frac{(1 + U)}{B_i} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(1 + U)}{B_i} \frac{1}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ + C(1 + U) \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (45)$$

Analisando o termo $\frac{\rho_m c_m}{h} (r_2 - r_1)$, temos:

$$\frac{\rho_m c_m}{h} (r_2 - r_1) = \frac{ML^{-3} L^2 \theta^{-2} T^{-1} L}{M \theta^{-3} T^{-1}} = \frac{1}{\theta} \quad (46)$$

Para a área de troca de calor com o fluido da e quação (12), e para o volume do material armazenador, podemos escrever:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2\pi r_1 L h \theta}{\pi(r_2^2 - r_1^2) L \rho_m c_m} = \frac{2h\theta r_1}{(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) \rho_m c_m} = \\ &= \frac{2h\theta U}{(r_2 - r_1)(1 + U) \rho_m c_m} \end{aligned} \quad (47)$$

Analisando adimensionalmente o termo η :

$$\frac{h \Theta U}{(r_2 - r_1)(1 + U) \rho_m c_m} = \frac{M \Theta^{-3} T^{-1} \Theta}{L M L^{-3} L^{-2} \Theta^{-2} T^{-1}} = 1 \quad (48)$$

Dividindo m. a m. da equação (45) por $2 U$, vem:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_m c_m (r_2 - r_1)(1 + U)}{2 U h} \frac{\partial T_m}{\partial \Theta} &= \frac{(1 + U)}{2 U B_i} \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{(1 + U)}{2 U B_i} \frac{1}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} + \\ &+ C \frac{(1 + U)}{2 U} \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \end{aligned} \quad (49)$$

De (47) podemos escrever:

$$\Theta = \frac{(r_2 - r_1)(1 + U) \rho_m c_m}{2 U h} \eta \quad (50)$$

$$\therefore \frac{\partial T_m}{\partial \Theta} = \frac{\partial T_m}{\partial \left[\frac{(r_2 - r_1)(1 + U) \rho_m c_m}{2 U h} \eta \right]} \quad (51)$$

ou

$$\frac{\partial T_m}{\partial \Theta} = \frac{2 U h}{(r_2 - r_1)(1 + U) \rho_m c_m} \frac{\partial T_m}{\partial \eta} \quad (52)$$

Substituindo (52) em (49) e reagrupando temos:

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = \frac{(1+U)}{2 U B_i} \left[\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_m}{\partial R} \right] + \frac{C(1+U)}{2 U} \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \quad (53)$$

As condições iniciais e de contorno (8,9,10,11)
passam a ser as seguintes:

De (8), (15), (16) e (50), temos:

Condições iniciais:

para $\eta = 0$

$$T_m = T_f = 0 \quad (54)$$

Condições de contorno:

De (9), (15), (21), (27) e (33), temos:

$$\left. \begin{array}{l} \text{para } \eta > 0, \quad \frac{U}{1-U} < R < \frac{1}{1-U} \\ \xi = 0 \quad T_f = 1 \quad \frac{\partial T_m}{\partial \xi} = 0 \\ \xi = \lambda \quad \frac{\partial T_m}{\partial \xi} = 0 \end{array} \right\} \quad (55)$$

De (10), (15), (16), (27), (33) e (39), temos:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{para } \eta > 0, \quad R &= \frac{U}{1-U} \\
 \frac{\partial T_m}{\partial R} &= B_i (T_m - T_f)
 \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

De (11), (16) e (27), temos

$$\left. \begin{aligned}
 \text{para } \eta > 0, \quad R &= \frac{1}{1-U} \\
 \frac{\partial T_m}{\partial R} &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

CAPITULO III

CAPÍTULO 3 O MÉTODO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL

3.1. ESTABELECIMENTO DO RETICULADO

Para representar a seção longitudinal na equação discretizada, usaremos uma matriz $T(i,j)$, onde i representa x e j representa r . Sendo assim, um determinado ponto (i,j) da matriz, corresponderá ao par ordenado (x,r) na seção longitudinal do cilindro, num dado instante θ , segundo a função de mapeamento:

$$x = (i - 1) \Delta x \quad (58)$$

$$r = (j - 1) \Delta r \quad (59)$$

Para:

NR = número de pontos ao longo do raio;

NX = número de pontos ao longo do comprimento;

os espaçamentos entre os pontos nos eixos r e x , são obtidos por:

$$\Delta x = \frac{L}{NX-1} \quad (60)$$

$$\Delta r = \frac{r_2}{(NR-1)} \quad (61)$$

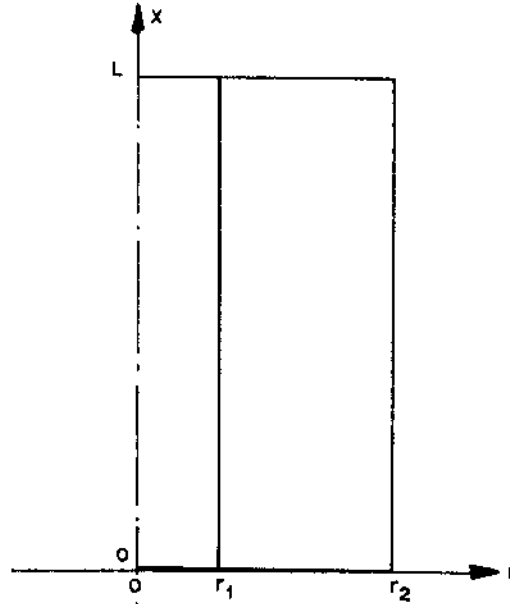


Figura 3 - Seção Longitudinal no Sistema de Coordenadas Cilíndricas

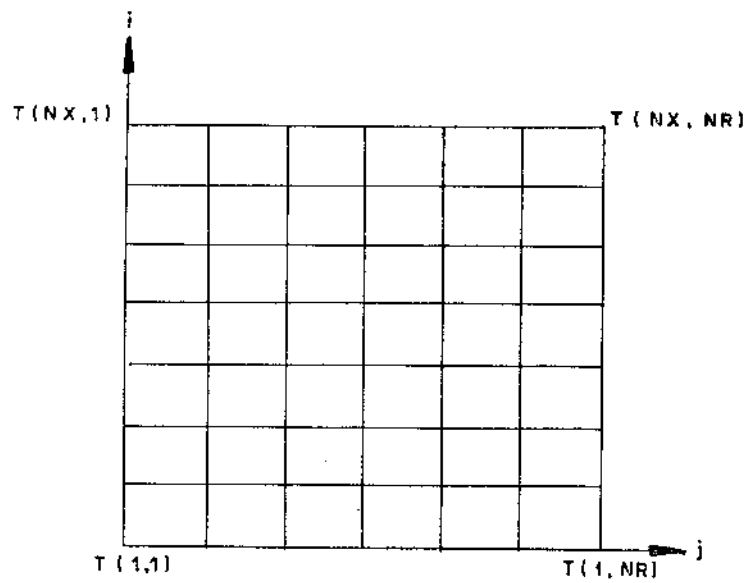


Figura 4 - Representação da Matriz $T(i,j)$

A matriz $T(i,j)$ tem seus eixos conforme a fig.4 e a variação do termo (i) , corresponde a varrer as colunas ao longo do comprimento do cilindro, enquanto a variação do termo (j) corresponde varrer as linhas, ou seja ao longo do raio.

O eixo de simetria é dado pela coluna $T(i,1)$, com (i) variando de 1 até NX .

Pela consideração feita em (2), concluímos que qualquer seção longitudinal do cilindro que contenha o eixo de simetria tem a mesma distribuição de temperatura. Logo, para representar o cilindro em um dado instante Θ , basta utilizar a metade da seção transversal.

3.2. OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS

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

São conhecidas as expansões por série de Taylor:

$$f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) = f(a_1, \dots, a_n) + \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} + \dots \quad (62)$$

$$f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n) = f(a_1, \dots, a_n) - \Delta a_k \frac{\partial f}{\partial a_k} + \frac{(\Delta a_k)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} - \dots \quad (63)$$

Truncando as equações (62) e (63) após a derivada de primeira ordem, temos duas expressões para $\frac{\partial f}{\partial a_k}$, con-

forme CARNAHAN [12]:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{\Delta a_k} \quad (64)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n)}{\Delta a_k} \quad (65)$$

Somando (63) a (62), obtemos uma expressão para $\frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2}$ conforme CARNAHAN [12]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial a_k^2} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} &= \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - 2f(a_1, \dots, a_n)}{(\Delta a_k)^2} + \\ &+ \frac{f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n)}{(\Delta a_k)^2} \end{aligned} \quad (66)$$

Subtraindo (63) de (62), obtemos outra expressão para $\frac{\partial f}{\partial a_k}$ conforme CARNAHAN [12]:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{(a_1, \dots, a_n)} = \frac{f(a_1, \dots, a_k + \Delta a_k, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_k - \Delta a_k, \dots, a_n)}{2\Delta a_k} \quad (67)$$

De (67), obtemos a expressão da aproximação cen-
trada para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left. \frac{\partial T_m}{\partial R} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R+\Delta R) - T_m(\xi, R-\Delta R)}{2\Delta R} \quad (68)$$

De (65), obtemos a expressão da aproximação des-
cendente para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left. \frac{\partial T_m}{\partial R} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R) - T_m(\xi, R-\Delta R)}{\Delta R} \quad (69)$$

De (64), obtemos a expressão da aproximação as-
cendente para $\frac{\partial T_m}{\partial R}$:

$$\left. \frac{\partial T_m}{\partial R} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R+\Delta R) - T_m(\xi, R)}{\Delta R} \quad (70)$$

De (66), obtemos as expressões das equações das
aproximações para $\frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2}$ para os três casos:

a) centrada:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R+\Delta R) - 2T_m(\xi, R) + T_m(\xi, R-\Delta R)}{(\Delta R)^2} \quad (71)$$

b) descendente:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R) - 2T_m(\xi, R - \Delta R) + T_m(\xi, R - 2\Delta R)}{(\Delta R)^2} \quad (72)$$

c) ascendente:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R + 2\Delta R) - 2T_m(\xi, R + \Delta R) + T_m(\xi, R)}{(\Delta R)^2} \quad (73)$$

De (66), obtemos as expressões das equações das aproximações para $\frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2}$, para os três casos:

a) centrada:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi + \Delta \xi, R) - 2T_m(\xi, R) + T_m(\xi - \Delta \xi, R)}{(\Delta \xi)^2} \quad (74)$$

b) descendente:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi, R) - 2T_m(\xi - \Delta \xi, R) + T_m(\xi - 2\Delta \xi, R)}{(\Delta \xi)^2} \quad (75)$$

c) ascendente:

$$\left. \frac{\partial^2 T_m}{\partial \xi^2} \right|_{\xi, R} = \frac{T_m(\xi + 2\Delta\xi, R) - 2T_m(\xi + \Delta\xi, R) + T_m(\xi, R)}{(\Delta\xi)^2} \quad (76)$$

De (64), obtemos a expressão da aproximação para

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta};$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = \frac{T_m(\xi, R)|_{\eta+\Delta\eta} - T_m(\xi, R)|_{\eta}}{\Delta\eta} \quad (77)$$

De (64), obtemos a expressão da aproximação ascendente para $\frac{\partial T_f}{\partial \xi}$:

$$\left. \frac{\partial T_f}{\partial \xi} \right|_{\xi} = \frac{T_f(\xi + \Delta\xi) - T_f(\xi)}{\Delta\xi} \quad (78)$$

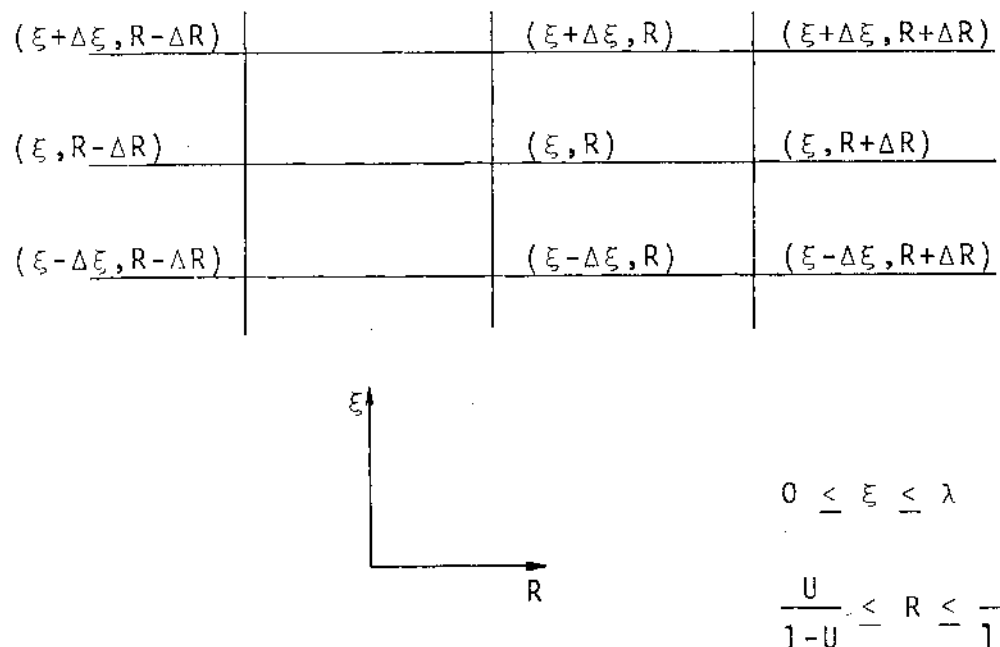
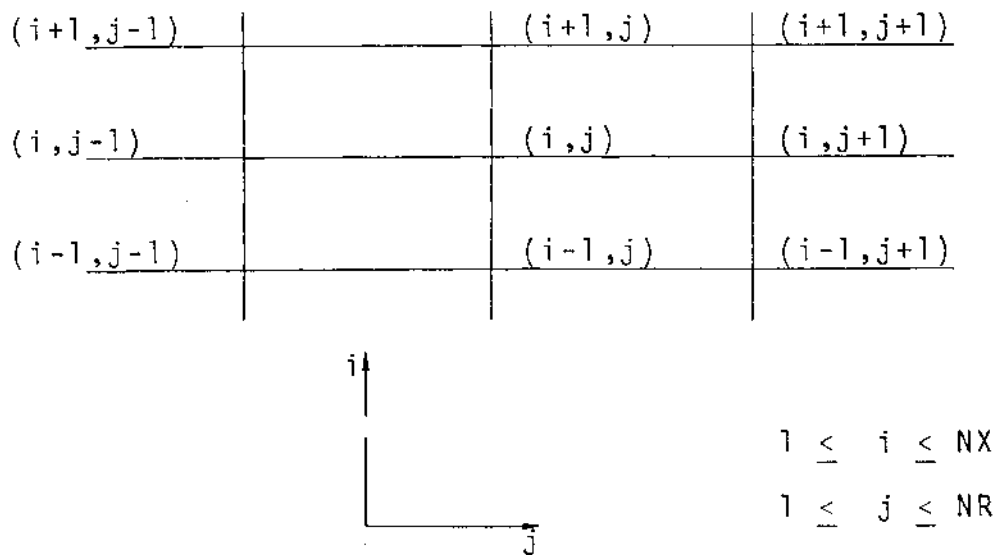
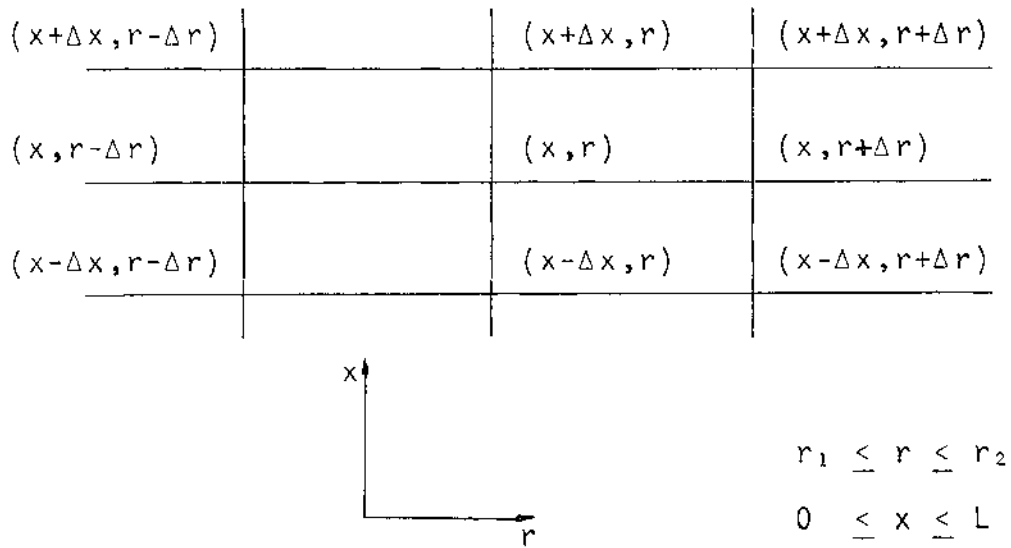


Figura 5. Malha Representativa da Posição dos Nós

O erro de truncamento nestas equações é da ordem de $(\Delta a_k)^2$.

A disposição dos pontos num reticulado fica conforme a fig. 5.

Essas aproximações serão empregadas na montagem do modelo numérico utilizado, que é o método das diferenças finitas, e neste problema estudado, optamos pelo uso de expressões de diferenças finitas ascendentes, descendentes e centradas, conforme a posição do nó na malha do reticulado.

3.3. AS EQUAÇÕES DAS DIFERENÇAS FINITAS PARA CA DA CONDIÇÃO DE CONTORNO

Na equação (26) que representa o comportamento da temperatura do fluido, será utilizada a diferença ascendente pois o módulo da temperatura do fluido num determinado nó $(i + 1)$, dependerá do nó anterior (i) .

Substituindo (78) em (26) e fazendo a transposição de índices conforme a fig. 5, temos:

$$T_f(i+1) = \Delta \xi \left[T_m(i,j) - T_f(i) \right] + T_f(i) \quad (79)$$

A determinação da temperatura no material armazenador será feito em três situações, satisfazendo as condições de contorno estabelecidas em (54), (55), (56) e (57).

Na superfície interna do material armazenador, onde o escoamento do fluido ocorre, teremos diferenças ascendentes, pois na situação real, a temperatura do material armazenador num nó $(i+1)$ ou $(j+1)$ dependerá dos nós (i) ou (j) respec

tivamente.

Substituindo (47), (56), (60), (61), (73), (76) e (77) em (53), temos,

$$\begin{aligned}
 T_m(i,j) \Big|_{\Theta+1} &= T_m(i,j) \Big|_{\Theta} + \Delta\Theta \left\{ A \left[T_m(i,j) \Big|_{\Theta} - 2T_m(i+1,j) \Big|_{\Theta} + \right. \right. \\
 &+ T_m(i+2,j) \Big|_{\Theta} \Big] + B \left[T_m(i,j+2) \Big|_{\Theta} - 2T_m(i,j+1) \Big|_{\Theta} + T_m(i,j) \Big|_{\Theta} \right] + \\
 &\left. + C^* \left[T_f(i) \Big|_{\Theta} - T_m(i,j) \Big|_{\Theta} \right] \right\} \quad (80)
 \end{aligned}$$

onde:

$$A = \alpha \left(\frac{NX - 1}{L} \right)^2 \quad (81)$$

$$B = \alpha \left(\frac{NR - 1}{r_2 - r_1} \right)^2 \quad (82)$$

$$C^* = \frac{h(1 - U)}{(r_2 - r_1)\rho_m C_m U} \quad (83)$$

Para a determinação da distribuição de temperatura dentro do material armazenador, iremos adotar um comportamento da temperatura de forma que satisfaça a condição de isolamento nas faces do cilindro e na superfície externa, conforme condições de contorno já adotadas. Para tal, adotare

mos diferenças centrada na direção do raio e ascendente na direção do escoamento.

Substituindo (27), (47), (55), (60), (61), (68), (71), (76) e (77) em (53), temos,

$$\begin{aligned}
 T_m(i,j) \Big|_{\Theta+1} &= T_m(i,j) \Big|_{\Theta} + \Delta\Theta \left\{ A \left[T_m(i,j) \Big|_{\Theta} - 2 T_m(i+1,j) \Big|_{\Theta} + \right. \right. \\
 &+ T_m(i+2,j) \Big|_{\Theta} \Big] + B \left[T_m(i,j+1) \Big|_{\Theta} - 2 T_m(i,j) \Big|_{\Theta} + T_m(i,j-1) \Big|_{\Theta} \right] + \\
 &\left. + D \left[T_m(i,j+1) \Big|_{\Theta} - T_m(i,j-1) \Big|_{\Theta} \right] \right\} \quad (84)
 \end{aligned}$$

onde:

$$D = \alpha \left\{ \frac{(NR - 1)^2}{2(r_2 - r_1) [r_1(NR-1) + (r_2 - r_1)(j-1)]} \right\} \quad (85)$$

Para a superfície externa do material armazenador, onde está o isolamento, utilizaremos diferenças descendente na direção do raio e ascendente na direção do escoamento, conforme PATANKAR [13].

Substituindo (47), (57), (60), (61), (72), (76) e (77) em (53), temos,

$$T_m(i,j) \Big|_{\Theta+1} = T_m(i,j) \Big|_{\Theta} + \Delta\Theta \left\{ A \left[T_m(i,j) \Big|_{\Theta} - 2 T_m(i+1,j) \Big|_{\Theta} + T_m(i+2,j) \Big|_{\Theta} \right] + \right.$$

$$+ B \left[T_m(i, j) \Big|_{\theta} - 2T_m(i, j-1) \Big|_{\theta} + T_m(i, j-2) \Big|_{\theta} \right] \Bigg\} \quad (86)$$

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

a) Erros Introduzidos

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

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

A distribuição do erro de arredondamento se as

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

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

b) Estabilidade da Solução

Mesmo sabendo que durante as etapas de cálculo, os erros de arredondamento e truncamento são cuidadosamente observados para que permaneçam em pequenas dimensões, algum desvio é introduzido na solução por diferenças finitas. Seja γ , o valor máximo absoluto do erro introduzido no cálculo para cada ponto da malha e Z^* o resultado numérico da equação diferencial com diferenças finitas. Se Z é a solução da equação diferencial com diferenças finitas, assumindo que nenhum erro é introduzido no cálculo, a diferença $[Z^* - Z]$ é o desvio da solução numérica, resultante dos erros. A solução da equação das diferenças finitas é chamada estável se o valor de $[Z^* - Z]$ tender a zero, tal que γ tenda a zero e não aumentar exponencialmente quando o tamanho da malha tender a zero, conforme SMITH [14].

A consideração de estabilidade é importante na solução da equação. Alguns métodos tem sido utilizados na literatura para estabelecer as condições de estabilidade.

RICHTMEYER [15] , utiliza von Neumann's Fourier Series Expansion Method na análise da estabilidade de equações de condução de calor dependentes do tempo. Este método não inclui automaticamente os efeitos das condições de contorno na estabilidade do sistema de diferenças. Um Matrix Method, descrito por SMITH [14] , inclui os efeitos das condições de contorno na estabilidade de tais sistemas.

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

Para verificação deste fato, analisaremos a equação (80), a qual irá representar o comportamento da temperatura do material na interface líquido-sólido.

Substituindo (60), (61), (81), (82) e (83) em (80), para $\Delta x = \Delta r$, teremos:

$$\begin{aligned}
 T_m(i,j) \Big|_{0+1} &= \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \left\{ \left[\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} - 2 + \frac{h(1-U)(\Delta x)^2}{(r_2-r_1)k_m U} \right] T_m(i,j) \Big|_0 + \right. \\
 &+ \left[T_m(i+2,j) \Big|_0 - 2T_m(i+1,j) \Big|_0 + T_m(i,j+2) \Big|_0 - 2T_m(i,j+1) \Big|_0 \right] + \\
 &\left. + \left[\frac{h(1-U)(\Delta x)^2}{(r_2-r_1)k_m U} \right] T_f(i) \Big|_0 \right\} \quad (87)
 \end{aligned}$$

Substituindo (39) em (87) e reescrevendo, temos:

$$\begin{aligned}
T_m(i,j) \Big|_{\Theta+1} &= \frac{\alpha \Delta \Theta}{(\Delta x)^2} \left\{ \frac{B_i (1-U) (\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} T_f(i) \Big|_{\Theta} + T_m(i+2,j) \Big|_{\Theta} - \right. \\
&- 2T_m(i+1,j) \Big|_{\Theta} + T_m(i,j+2) \Big|_{\Theta} - 2T_m(i,j+1) \Big|_{\Theta} + \\
&+ \left. \left[\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \Theta} - 2 + \frac{B_i (1-U) (\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} \right] T_m(i,j) \Big|_{\Theta} \right\} \quad (88)
\end{aligned}$$

A seleção do parâmetro $\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \Theta}$ na equação (88), requer uma análise, pois o coeficiente de película tem influência na escolha e irá determinar o modo com que a magnitude deste coeficiente contribuirá para a estabilidade do método. A escolha do valor deste parâmetro é indicada por ÖZISIK [16], de tal modo que o coeficiente de $T_m(i,j) \Big|_{\Theta}$, seja nulo.

Da equação (88) temos que:

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \Theta} - 2 + \frac{B_i (1-U) (\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} = 0 \quad (89)$$

Portanto,

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta \Theta} = \frac{-B_i (1-U) (\Delta x)^2}{(r_2 - r_1)^2 U} + 2 \quad (90)$$

3.5. O PROGRAMA COMPUTACIONAL

A listagem do programa desenvolvido, encontra-se no Apêndice 1, com indicações detalhadas das grandezas utilizadas, bem como as sub-rotinas utilizadas.

Os resultados teóricos deste programa estão no item 6.4.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO 4 A MODELAGEM FÍSICA E O MÉTODO DOS TESTES

4.1. SELEÇÃO E FABRICAÇÃO DOS MODELOS

A escolha dos materiais para fabricação dos modelos práticos, teve como diretriz principal, selecionar elementos existentes no mercado nacional e que mais se aproximassem das hipóteses feitas no equacionamento matemático.

Foram escolhidos o aço e o concreto como materiais armazenadores e o óleo térmico e o ar como fluidos transportadores de calor.

A descrição detalhada do aço escolhido é a seguinte:

Denominação: Aço carbono com alto teor de manganês para construções mecânicas.

Classificação: SAE - 1024

Utilização: Aço de granulação fina com elevado limite de escoamento e elevada resistência, excelentes propriedades de usinagem e soldabilidade ilimitada. Indicado para a construção mecânica em geral, particularmente de tubos mecânicos.

Composição química aproximada:

carbono	0,20%
silício	0,30%
manganês	1,40%
fósforo	0,03% (Máx)
enxofre	0,03% (Máx)

Características mecânicas: (valores mínimos)

Estado: Normalizado

Resistência à tração: 52 kgf/mm²

Limite de escoamento: 35 kgf/mm²

Alongamento (L = 5d): 22%

Dureza: 145 BRINELL

Para abranger as diversas aplicações do concreto, as quais são encontradas na construção civil, tais como, moldagem de vigas, pilares e fundações, foram selecionados 3 traços conforme descrição detalhada a seguir:

TRAÇO I

Resistência característica à compressão: $f_{ck} = 90 \text{ kgf/cm}^2$

Composição aproximada no momento da mistura:

cimento	264 kgf/m ³	
pedra I	1126 kgf/m ³	
areia	850 kgf/m ³	(4% umidade)
água	158 l/m ³	

Peso específico do concreto seco: 2240 kgf/m³

TRAÇO II

Resistência característica à compressão: $f_{ck} = 150 \text{ kgf/cm}^2$

Composição aproximada no momento da mistura:

cimento	306 kgf/m ³	
pedra I	1130 kgf/m ³	
areia	808 kgf/m ³	(4% umidade)
água	160 l/m ³	

Peso específico do concreto seco: 2244 kgf/m³

TRAÇO III

Resistência característica à compressão: $f_{ck} = 243 \text{ kgf/cm}^2$

Composição aproximada no momento da mistura:

cimento	414	kgf/m ³	
pedra I	1134	kgf/m ³	
areia	702	kgf/m ³	(4% umidade)
água	164	l/m ³	

Peso específico do concreto seco: 2250 kgf/m³

Os modelos de aço foram usinados em máquinas operatrizes, adequadas às operações requeridas, de forma que ficaram com as dimensões dadas na tabela 1.

Os modelos de concreto foram fundidos conforme dimensões também dadas na tabela 1.

Os moldes para a fabricação dos modelos de concreto e o modelo em si, estão apresentados nas figuras 6 e 7.

Os modelos de aço foram construídos conforme figura 8, com alteração nos diâmetros para o modelo nº 2.

Nº DO MODELO	MATERIAL ARMAZENADOR	COMPRIMENTO (MM)	DIÂMETRO INTERNO (MM)	DIÂMETRO EXTERNO (MM)
1	Aço 1024	1080	28	56
2	Aço 1024	1080	32	120
3	Concreto $f_{ck} 90$	945	26	145
4	Concreto $f_{ck} 150$	927	26	145
5	Concreto $f_{ck} 243$	948	26	145

TABELA 1. Dimensões dos Modelos Físicos

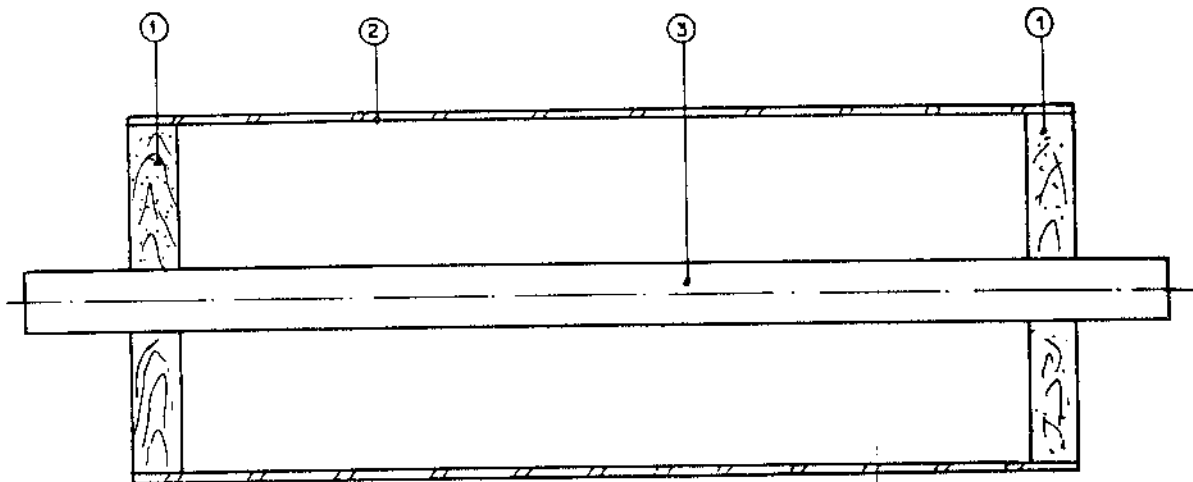


Figura 6. Conjunto do Molde do Armazenador de Concreto

(1. Tampões de madeira; 2. Tubo PVC 150 mm; 3. Tubo de aço de parede fina de 25mm de diâmetro externo)

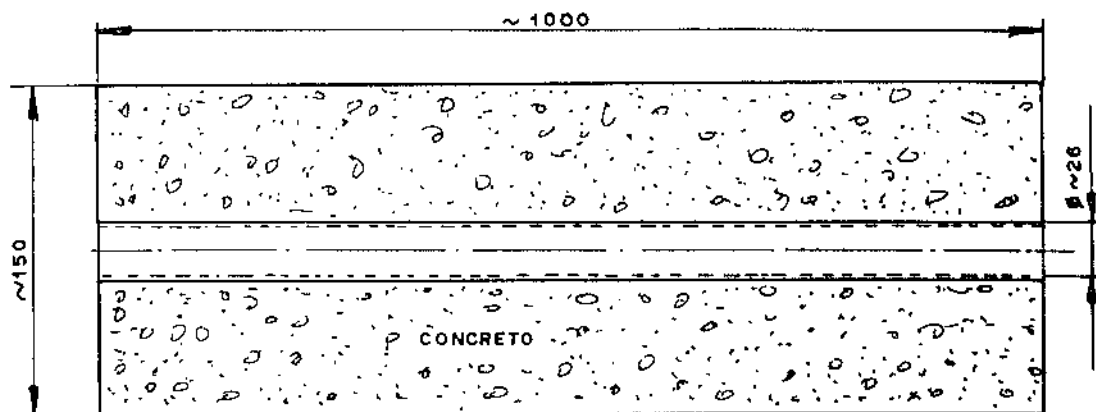


Figura 7. Modelo de Concreto sem Isolamento

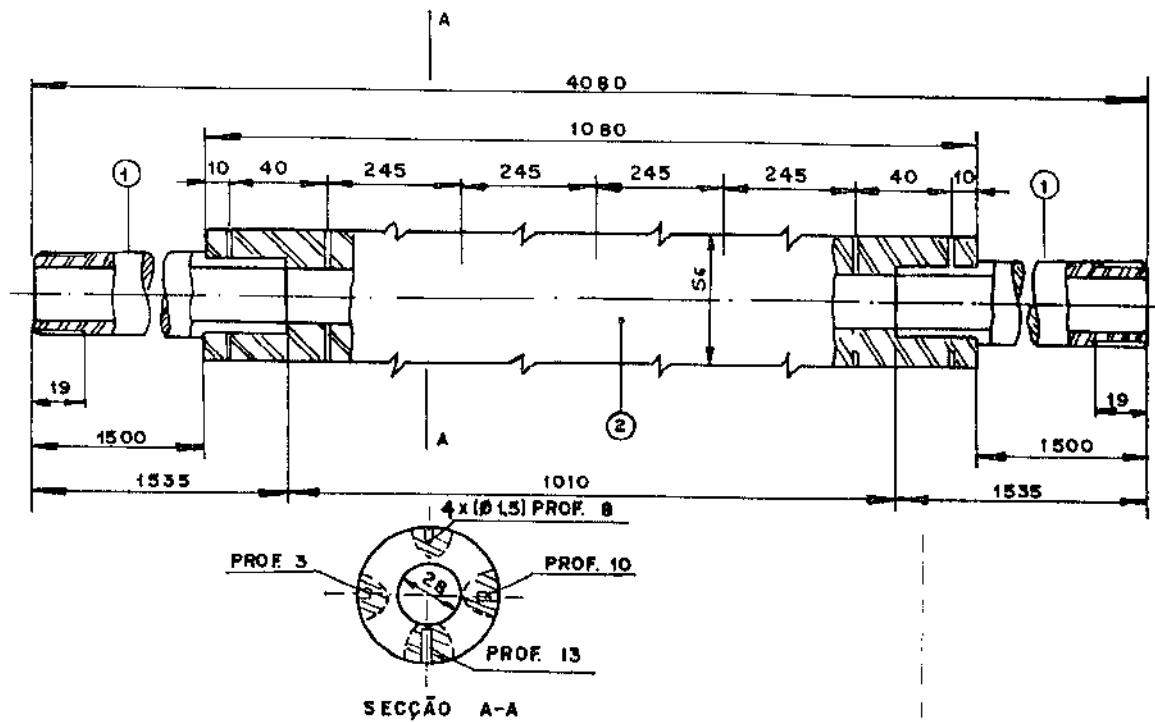


Figura 8. Conjunto do Armazenador de Aço Modelo nº 1
(1. Tubo de entrada e saída; 2. Armazenador)

4.2. A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA NOS MODELOS

Para se verificar a distribuição da temperatura no interior e nas superfícies do material armazenador do modelo foram alocados ao longo do comprimento dos tubos e em diferentes profundidades, conjuntos sensores para o levantamento do campo térmico.

Estes conjuntos de pontos sensores foram introduzidos em furos de 1,5mm de diâmetro, nos modelos de aço, e furos de 3,0mm de diâmetro, nos modelos de concreto.

Durante a instrumentação dos modelos, os pontos sensores receberam uma determinada quantidade de pasta de contato térmico, para que se melhorassem as condições de

aderência e foram armarrados externamente ao material armaze-
nador através de cordões de amianto, internamente ao isola-
mento.

A figura 9, mostra a distribuição dos pon-
tos de medida para o modelo nº 1 e a tabela 2, apresenta as
profundidades para todos os modelos ensaiados.

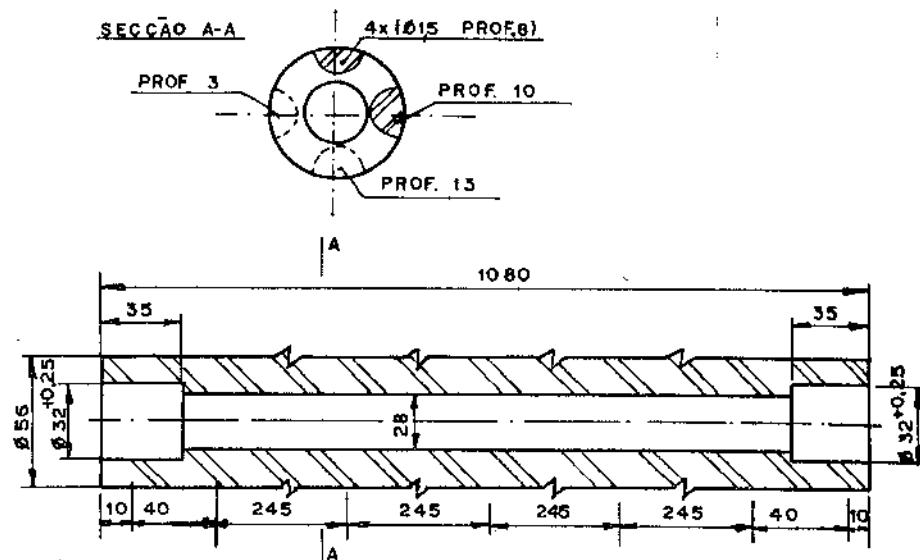


Figura 9. Distribuição dos Pontos de Medida de Temperatu-
ra do Modelo nº 1 (aço)

Nº DO MODELO	PROFUNDIDADE EM mm	Nº TOTAL DE PONTOS AO LONGO DO ARMAZE- NADOR
1	0;3;8;10;13	35
2	0,3;7;10;20;25;35	49
3	0;20;40;60	20
4	0;20;40;60	20
5	0;20;40;60	20

TABELA 2. Profundidades de Colocação e Nº de Pontos
de Medida de Temperatura

4.3. SELEÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE TEMPERATURA E VAZÃO

a) Medição de Temperatura

Para a faixa de temperatura dos testes com os modelos de aço (20 a 200°C) foram escolhidos termopares tipo T (cobre, constantan) AWG 24, os quais foram calibrados, contra um termômetro de mercúrio de haste e bulbo de vidro com precisão de 0,1°C, marca INCOTHERM e nº 10607, em uma aparelhagem construída para este fim, obedecendo as dimensões e correções conforme ASTM [17] e BENEDICT [18] .

Do mesmo modo, foram escolhidos termopares tipo J (ferro, constantan) AWG 20, para os modelos em concreto, para a faixa de temperatura dos ensaios destes modelos, (20 a 100°C) e calibrados de modo idêntico ao caso anterior.

Os termopares foram calibrados individualmente utilizando o método decrescente de variação da temperatura, e um milivoltímetro de marca FLUKE, previamente aferido.

b) Medição da Vazão

Nos modelos de aço, os quais foram ensaiados no banco utilizando óleo térmico, THERMINOL 55, da Monsanto, a vazão foi determinada através de um medidor de vazão do tipo deprimogênio, especificamente uma placa de orifício, fabricado e calibrado segundo norma ASME, cujo diferencial de pressão foi indicado por um manômetro diferencial marca MERRIAM INSTRUMENT, SÉRIE 1180.

Nos modelos de concreto, os quais foram en-

saiados no banco utilizando ar, a vazão foi determinada através de um medidor do tipo deprimogênio da MERIAM INSTRUMENT , -LFE (LAMINAR FLOW ELEMENT) - 50 MH10-4 NT, SÉRIE nº L59943 - cuja diferença de pressão foi indicada por um manômetro diferencial MODELO 34FB2-TM, SÉRIE L 59941 da MERIAM INSTRUMENT.

Para os dois casos acima descritos, foram utilizadas as correções indicadas pelo manual do fabricante , com o objetivo de adaptar às condições de ensaio, os valores de coeficientes por eles indicados.

4.4. OS BANCOS E O MÉTODO DOS TESTES

a) Os Bancos de Ensaio

Os bancos dos testes foram construídos de acordo com as figuras 10 e 11, respectivamente para os conjuntos aço-óleo e concreto-ar. As características dos ensaios , foram as principais regras que orientaram o projeto e a construção dos bancos.

Os locais de medida de temperatura e vazão, foram escolhidos pela necessidade imposta pelo sistema de controle destas grandezas, a dimensão dos condutos obedeceu os cálculos de perda de carga que orientou a especificação do sistema de movimentação do fluido de cada banco de testes.

As resistências de passagem para aquecimento do fluido transportador de calor, foram calculadas para que a quantidade de calor introduzida fosse suficiente para manter as condições de ensaio.

O sistema de isolamento utilizado foi o de calhas de lã de vidro, alumínio externo, tiras e presilhas ,

procurando aproximação com os casos industriais.

As válvulas gaveta e globo, foram utilizadas para manobras e variações de fluxo, conforme a finalidade específica de cada uma.

Os dois sistemas, tanto para ar-concreto , como óleo-aço, possibilitam os ensaios de carregamento e descarregamento do modelo, sendo necessário que se defina preliminarmente o tipo de teste, para se estabelecer os fluxos no sistema.

O sistema de controle de temperatura e vazão, permite uma variação destas duas grandezas de forma que se tenha uma ampla faixa de ensaio.

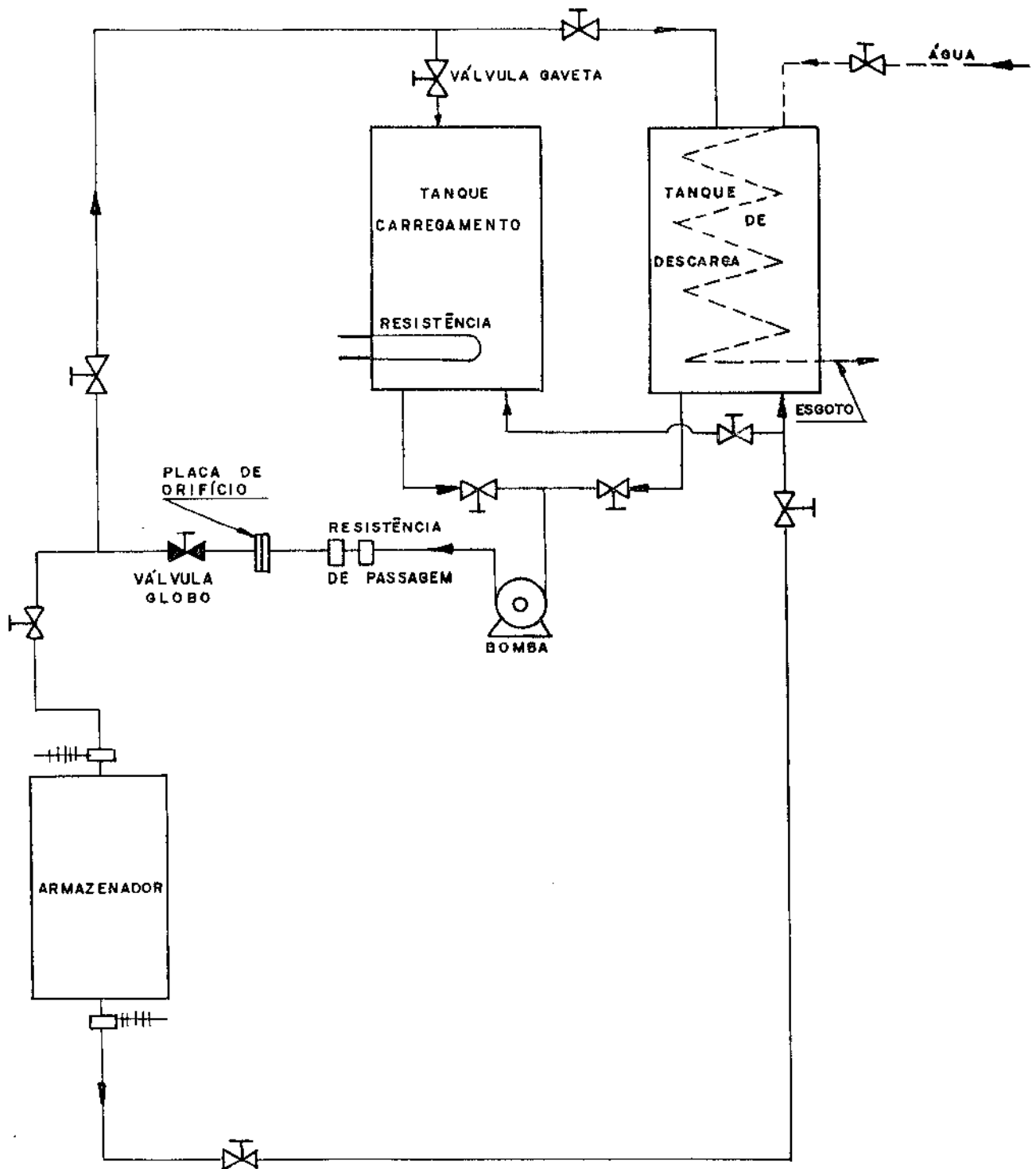


Figura 10. Banco de Testes - Modelo Aço-Óleo

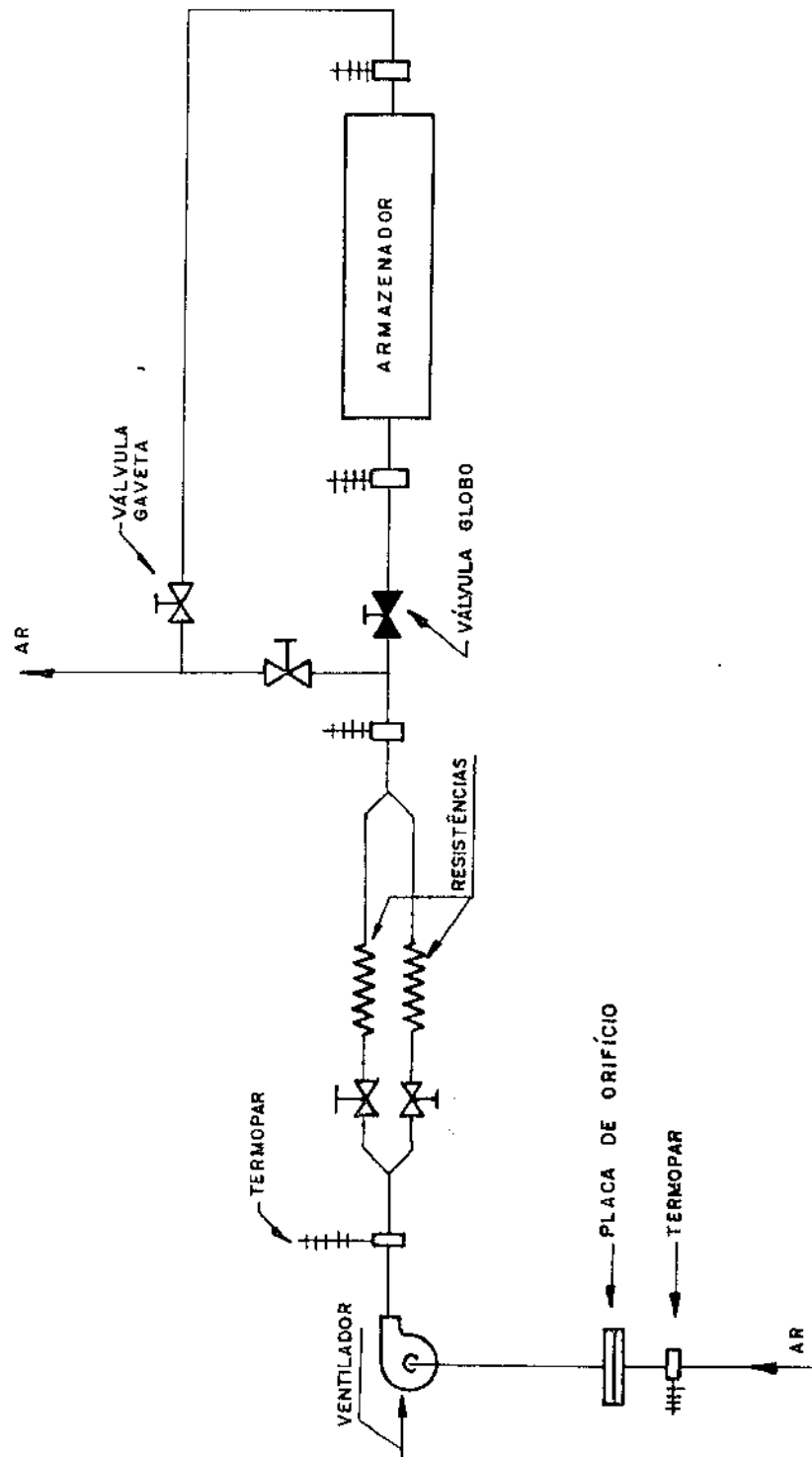


Figura 11. Banco de Ensaio - Modelo Concreto-Ar

b) O Método dos Testes

b.1) Carregamento

O banco de testes utilizando o óleo térmico, possui um sistema alternativo de circulação ("by-pass") que é ativado para a movimentação inicial do fluido, cujo tempo de aquecimento pode variar conforme a vazão de circulação.

Após o tempo inicial de aquecimento e estabilização do óleo térmico na temperatura desejada para o ensaio, este "by-pass" é desativado, e para o circuito fechado de circulação principal é dirigido o fluxo, sendo neste momento iniciado o ensaio.

As resistências de passagem são alimentadas por um sistema que varia a intensidade da corrente que passa através delas, e com isto, mantêm-se a temperatura do ensaio durante todo o tempo do teste.

No banco de testes utilizando ar, que possui também um "by-pass", o procedimento é o mesmo, sendo que o tempo de aquecimento inicial é menor e o sistema é aberto.

b.2.) Descarregamento

O ensaio de descarregamento, é realizado no banco de testes utilizando óleo térmico, através de um circuito fechado que passa no interior de um tanque, que possui circulação interna de água à temperatura da rede de fornecimento, e que tem uma inércia térmica calculada para absorver o calor conduzido pelo óleo térmico e entregar à água de resfriamento. Este sistema de descarregamento funcio

na isoladamente ao sistema de carregamento.

No banco de testes utilizando o ar, como fluido transportador de calor, o circuito de circulação é o mesmo do sistema de carregamento, sendo no entanto desligadas as resistências de aquecimento. Como o circuito é aberto, o ar que atravessa o armazenador é captado no ambiente, mas é expelido para fora do recinto, o que possibilita sua renovação.

b.3.) Procedimento para as medições de temperatura e vazão

Após a estabilização da temperatura do fluido transportador de calor, na fase de aquecimento inicial, nos ensaios de carregamento, inicia-se o teste, sendo neste instante acionado o cronômetro acumulativo. A leitura e gravação dos tempos e temperatura instantânea para todos os pontos de medição, foram realizadas por um DATALOGGER, de marca FLUKE, que armazena e registra em fita de papel, estes dados de tempo, temperatura e número do termopar.

Nos ensaios de descarregamento, o procedimento é o mesmo.

A medida de vazão é realizada a cada instante que se estipula, juntamente com a leitura da temperatura, com a finalidade de possíveis pequenas correções que possam ocorrer durante o ensaio, pois a diretriz é de que a vazão seja constante.

CAPITULO V

CAPÍTULO 5 ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CALOR ARMAZENADO

5.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA (h)

a) Armazenador aço-óleo (escoamento laminar)

Para a determinação de h, foram feitas as seguintes considerações:

1) As propriedades do fluido avaliadas para a temperatura média da mistura;

2) O efeito da temperatura da parede e a temperatura média da mistura para a qual foram determinadas as propriedades do fluido, corrigido pela utilização da relação $\left(\frac{\mu_b}{\mu_p}\right)^{0,14}$ conforme SIEDER [19];

3) Perfil hidrodinamicamente desenvolvido, que para ser considerado, foi introduzido um comprimento de entrada calculado conforme KAYS [7], e suas dimensões para o modelo nº 1, estão apresentados na figura 12;

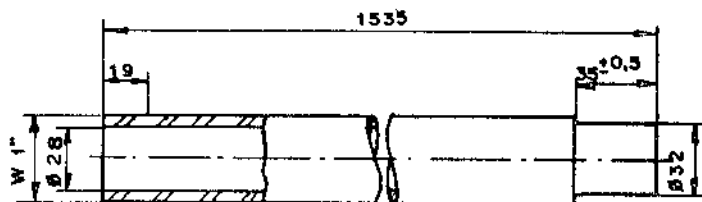


Figura 12 - Tubo Auxiliar para Desenvolvimento da Camada Hidrodinâmica para o Modelo nº 1

4) Taxa de calor constante, devido a maior capacidade térmica do fluido transportador de calor;

5) Perfil térmico em desenvolvimento, pois o modelo é de pequeno comprimento. ($L < 0,05 PeDi$, KAYS [7])

Com estas considerações, escolhemos o cálculo do

$Nu_{local} (Nu_x)$, conforme HAUSEN [20]:

$$Nu_x = 4,36 + \frac{0,023 (Di/x) Re Pr}{1 + 0,0012(Di/x) Re Pr} \quad (91)$$

b) Armazenador concreto - ar (escoamento turbulento)

Para a determinação de h , neste caso, foram feitas as seguintes considerações:

1) As propriedades do fluido avaliadas para a temperatura média da mistura;

2) O efeito da temperatura da parede e a temperatura média da mistura para a qual foram determinadas as propriedades do fluido, corrigido pela utilização da relação $(\frac{t_p}{t_b})^n$. O valor de $n = -0,5$ para descarregamento e $n = 0$ para carregamento, para $L/Di > 30$, segundo SLEICHER [21];

3) Perfil hidrodinamicamente desenvolvido, que para ser considerado, foi introduzido um comprimento de entrada, especificado conforme BOELTER [22];

4) Taxa de calor constante, devido a maior capacidade térmica do fluido transportador de calor;

5) Perfil térmico em desenvolvimento em consequência das dimensões da região de entrada, conforme KAYS [7];

Com estas considerações, escolhemos o cálculo do Nu para este modelo, a seguinte relação proposta por KAYS [7]:

$$Nu = 0,021 Pr^{0,5} Re^{0,8} \left(\frac{t_p}{t_b}\right)^n \quad (92)$$

5.2. ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA O MODELO TEÓRICO

Com os resultados obtidos pelo método matemático computacional, o calor armazenado foi calculado através da análise da figura 13 e da generalização que resumiremos neste item.

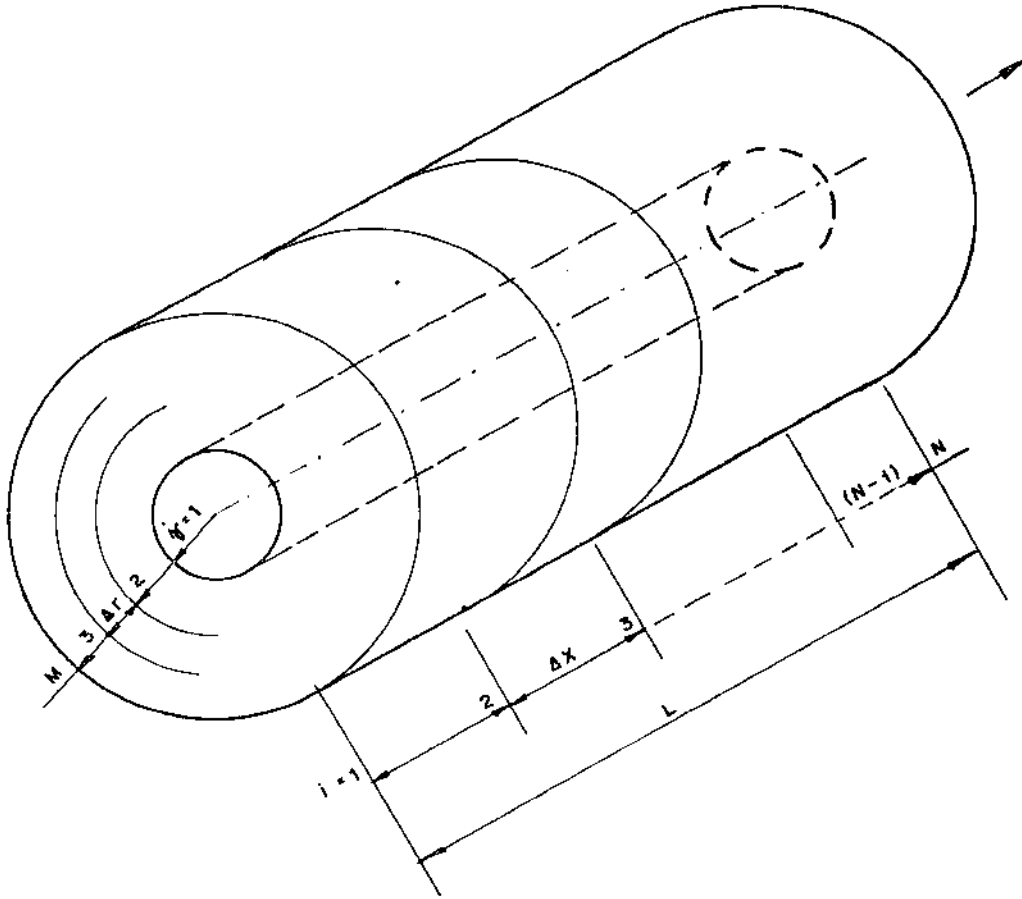


Figura 13 - Esquema Utilizado para o Cálculo do Calor Armazenado

$$\bar{Q} = \sum_{\theta=1}^Z Q_{\theta} \quad (93)$$

onde,

$$Q_{\theta} = \rho_m c_m \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N-1} V(j) \Delta t_m(i,j) \Big|_{\theta} \quad (94)$$

Para:

$$V(j) = \pi \Delta x \left\{ [r(j+1)]^2 - [r(j)]^2 \right\} \quad (95)$$

e

$$\Delta t_m(i,j) \Big|_{\theta} = \frac{t_m(i,j) + t_m(i+1,j)}{2} \Big|_{\theta} - t_0 \quad (96)$$

O cálculo do calor máximo teórico armazenável, é de terminado utilizando-se o seguinte produto:

$$Q_{\max} = \rho_m c_m \pi (r_2^2 - r_1^2) L (t_{fi} - t_0) \quad (97)$$

O calor adimensional Q^* , armazenado até um determinado instante θ é dado pela relação:

$$Q^* = \frac{\bar{Q}}{Q_{\max}} \quad (98)$$

5.3. ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA O MODELO FÍSICO

Com os resultados dos ensaios realizados em cada modelo, foram construídos gráficos, apresentados no Capítulo 6, para as diferentes profundidades e distribuição axial, de pontos de medida da temperatura no material armazenador. Estes gráficos possibilitaram a determinação de temperaturas nas diversas seções do material, hipoteticamente dividido conforme o que mostra a figura 13. O cálculo do calor armazenado, obedeceu ao mesmo critério adotado para o item 5.2.

5.4. DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DO ARMAZENADOR

O método que tem sido utilizado para calcular o desempenho de armazenadores de calor sensível [23], que é sujeito a um degrau na temperatura de entrada do fluido de transferência, consiste em se integrar a diferença das temperaturas entre a entrada e a saída do fluido transportador de calor no período do teste e multiplicar o resultado pela taxa de fluxo mássico e o calor específico, dividindo-se este valor pela capacidade máxima de armazenamento do material.

Os resultados destes cálculos estão apresentados no item 6.6, onde:

$$Q_{\text{taxa}} = \frac{M_m c_m \Delta t_1}{\theta_e} \quad \text{para} \quad \Delta t_1 = \bar{\tau}_f - \bar{\tau}_0, \quad (99)$$

$$Q_{pi} = h_{ei} S_{ei} \Delta t_2 \quad \text{para} \quad \Delta t_2 = \bar{\tau}_{ei} - \bar{\tau}_a, \quad (100)$$

$$\text{ou } Q_{pi} = Q_{TR} - Q_{\text{taxa}}, \quad (101)$$

$$Q_{TR} = \dot{m}_f c_f \Delta t_3 \quad \text{para} \quad \Delta t_3 = \bar{\tau}_{fi} - \bar{\tau}_{fs}, \quad (102)$$

$$\epsilon = \frac{Q_{TR} - Q_{\text{taxa}}}{Q_{TR}} \times 100 \quad e \quad (103)$$

$$\bar{h}_c = \frac{\dot{m}_f c_f \Delta t_3}{2\pi r_j L \Delta t_1} \quad (104)$$

CAPITULO VI

CAPÍTULO 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

Nº DO MODELO	MATERIAL ARMAZENADOR		FLUIDO TRANSPORTADOR
	MATERIAL	MASSA (KG)	TIPO
1	Aço 1024	15,66	Óleo Térmico
2	Aço 1024	89,06	Óleo Térmico
3	Concreto f_{ck} 90	33,82	Ar
4	Concreto f_{ck} 150	33,25	Ar
5	Concreto f_{ck} 243	34,09	Ar

TABELA 3 - Características dos Modelos Físicos

6.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS

AÇO-ÓLEO

- a) Distribuição dos Pontos de Medição da Temperatura
no Modelo nº 1

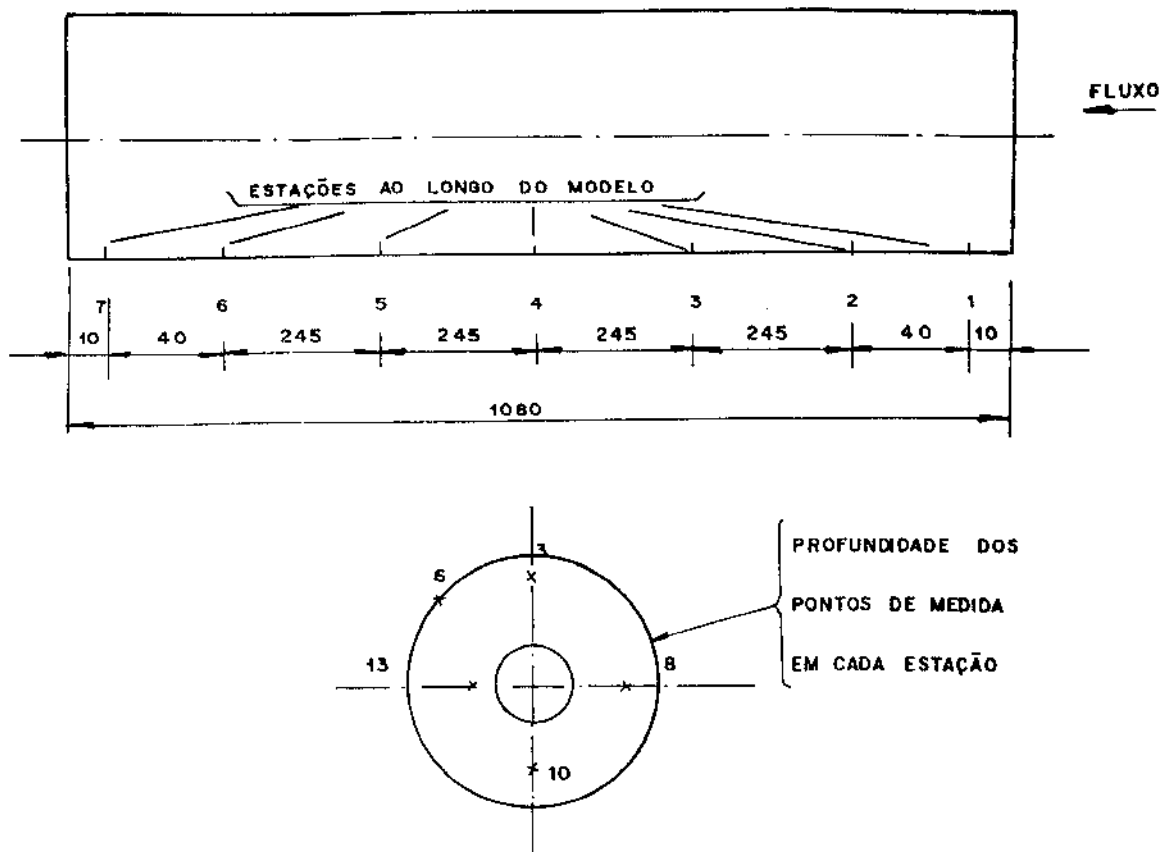


Figura 14 - Esquema da Distribuição dos Pontos de Medida de Temperatura no Modelo nº 1

b) Ensaio de Carregamento do Modelo nº 1

b.1.) Dados e Resultados do Ensaio nº 1

$$\begin{aligned}\bar{t}_f &= 98,6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \bar{t}_o &= 22,0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \bar{t}_a &= 23,0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \dot{m}_f &= 0,0672 \text{ Kg/s} \\ \bar{h}_c &= 66,52 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C} \\ \bar{t}_{ei} &= 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

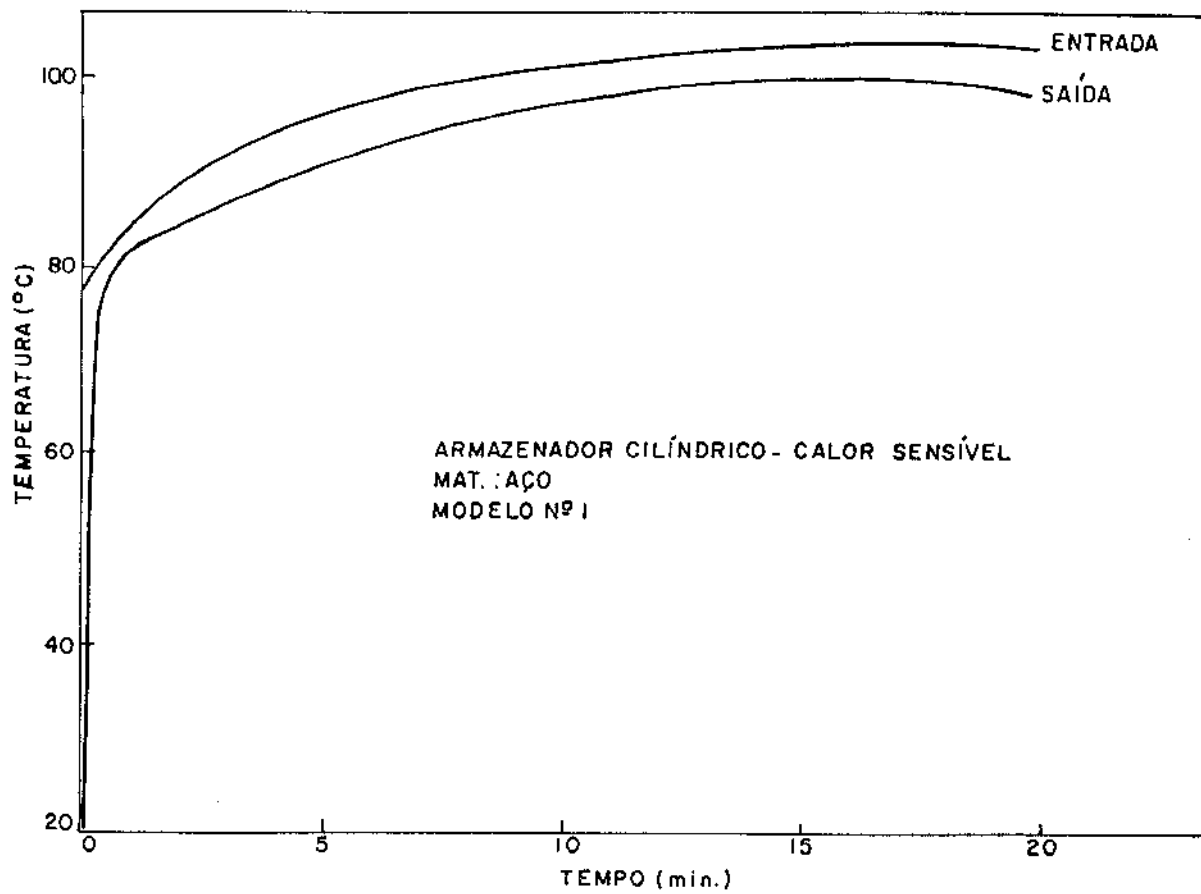


Figura 15 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido (Ensaio nº 1)

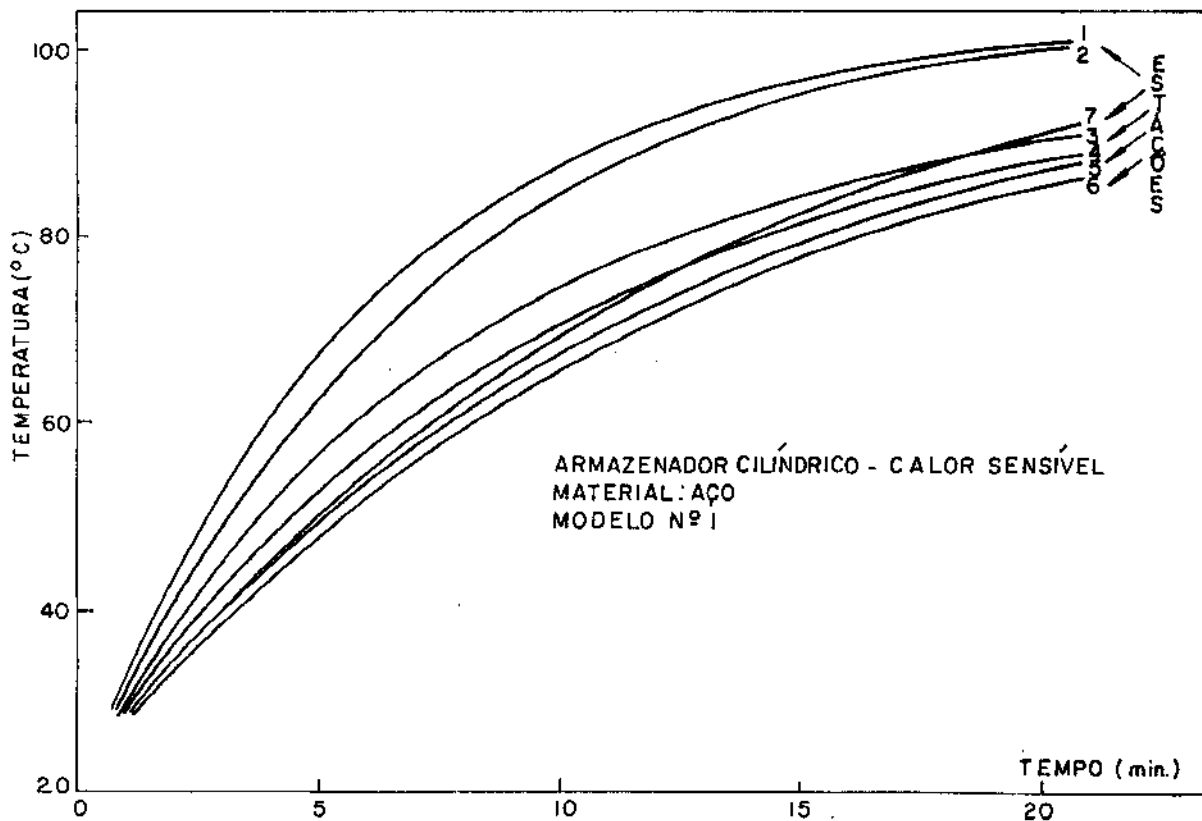


Figura 16 - Temperatura do Material na Superfície (Ensaio nº 1)

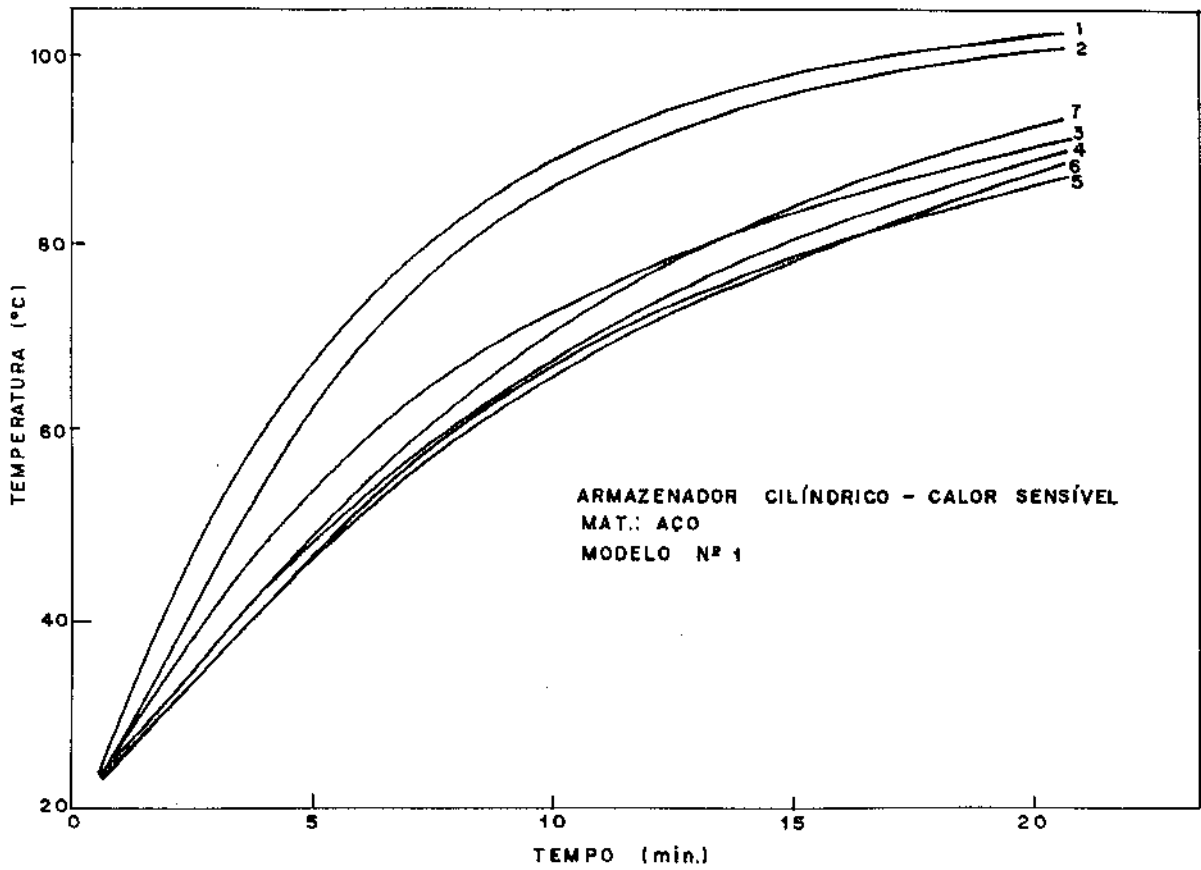


Figura 17 - Temperatura do Material a 3 mm da Superfície (Ensaio nº 1)

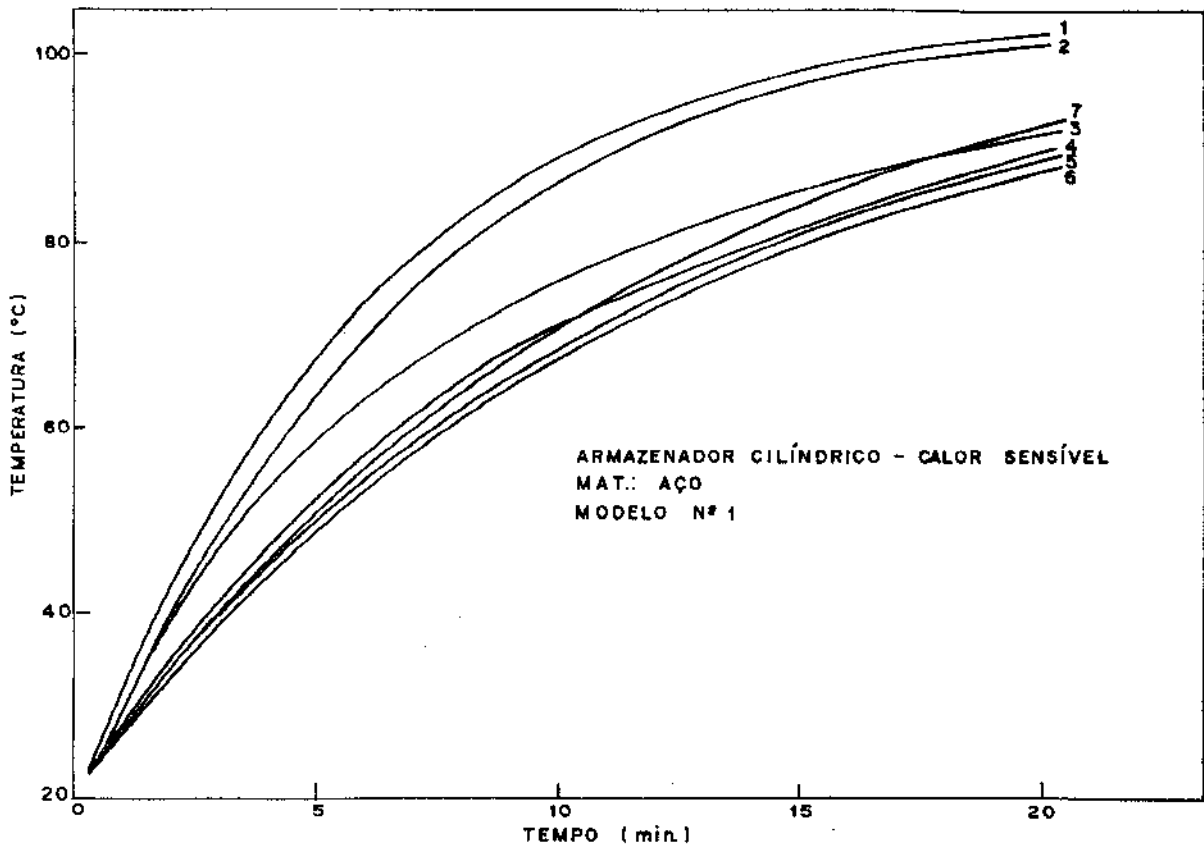


Figura 18 - Temperatura do Material a 8 mm da Superfície (Ensaio nº 1)

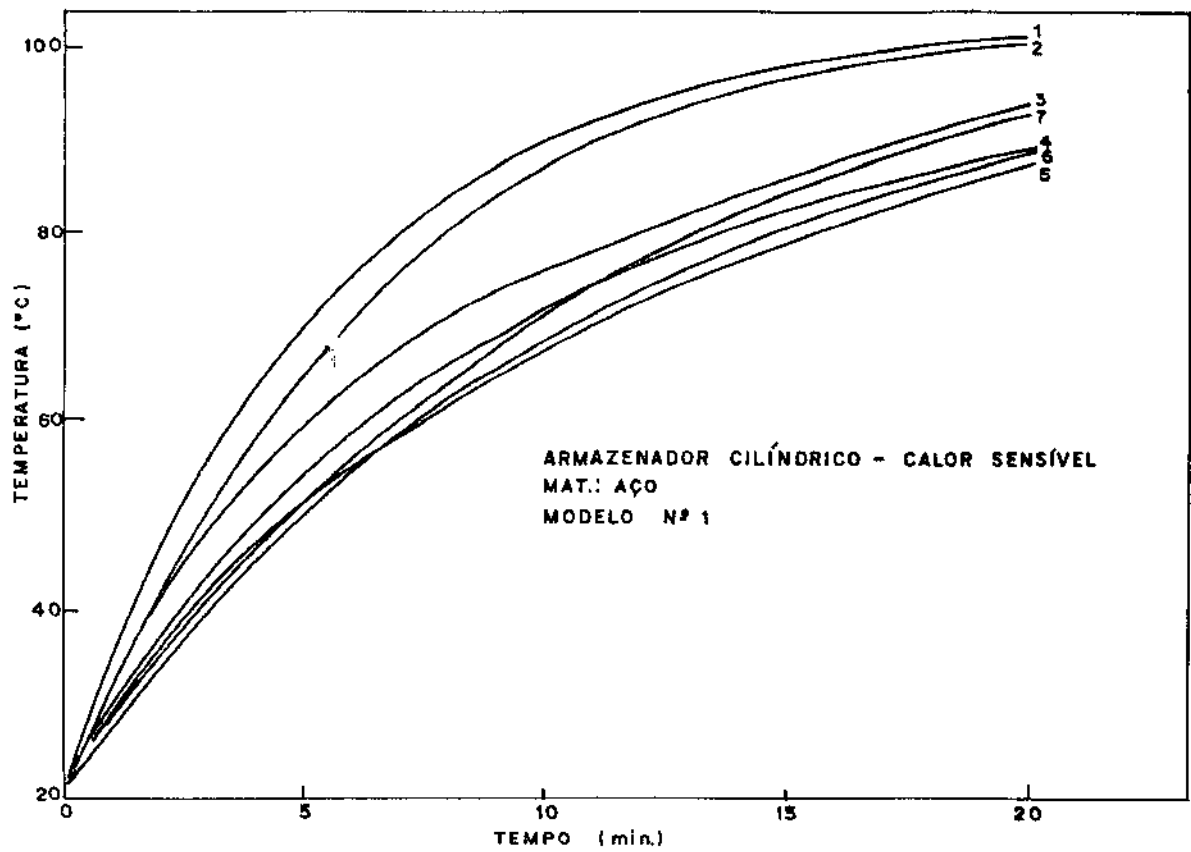


Figura 19 - Temperatura do Material a 10 mm da Superfície (Ensaio nº 1)

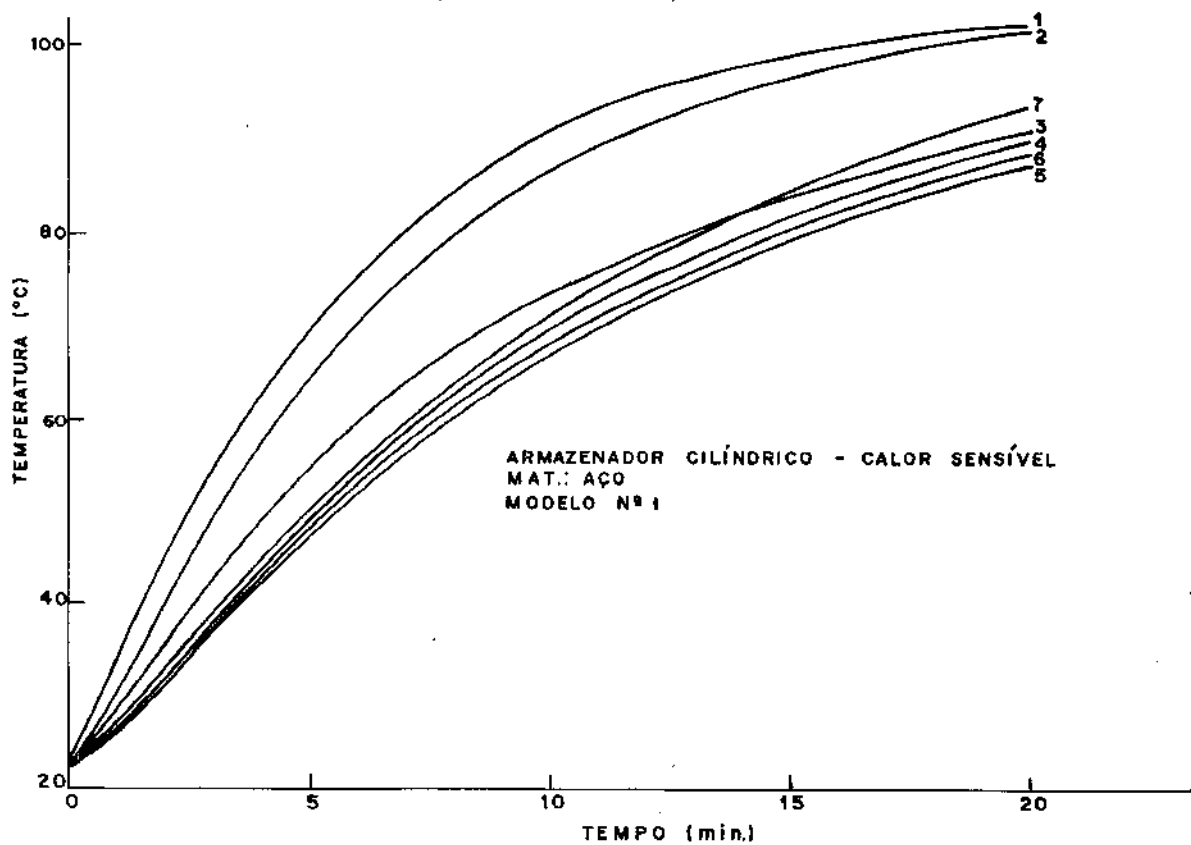


Figura 20 - Temperatura do Material a 13 mm da Superfície (Ensaio nº 1)

b.2.) Dados e Resultados do Ensaio nº 2

$$\bar{T}_f = 94,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{T}_o = 21,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{T}_a = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0651 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 65,66 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{T}_{ei} = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

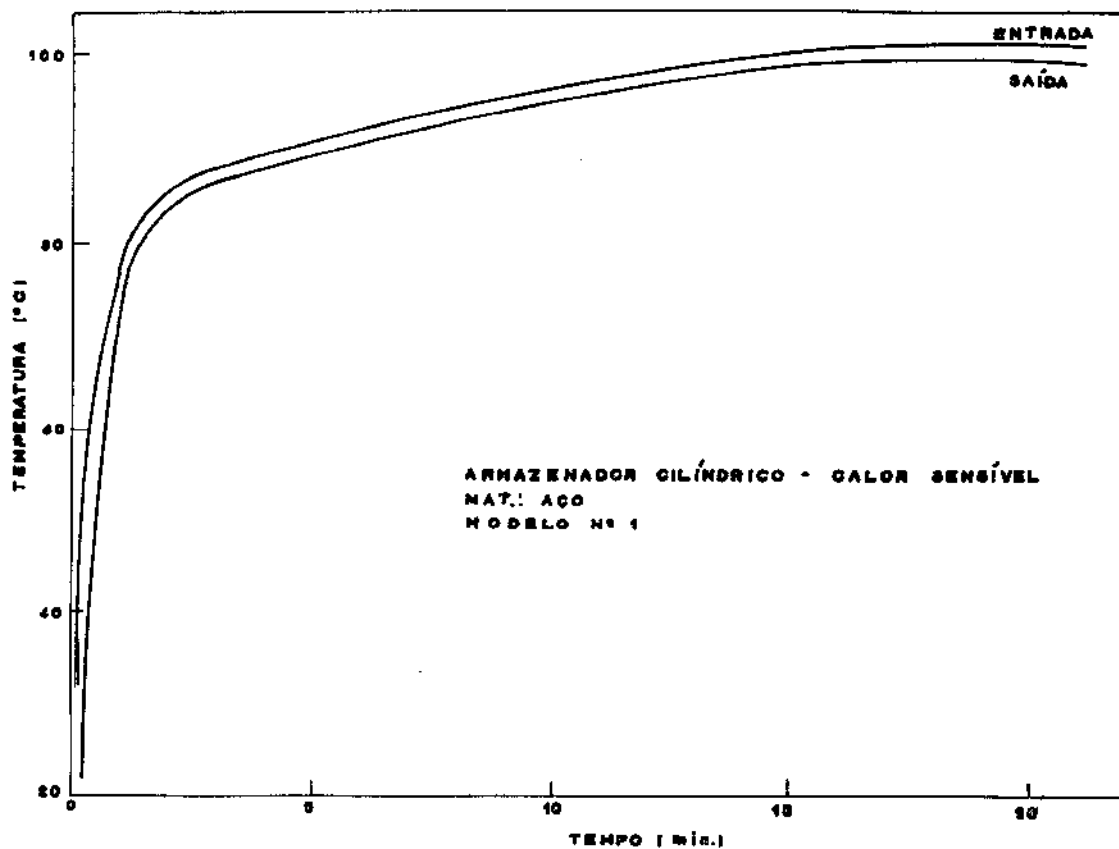


Figura 21 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 2)

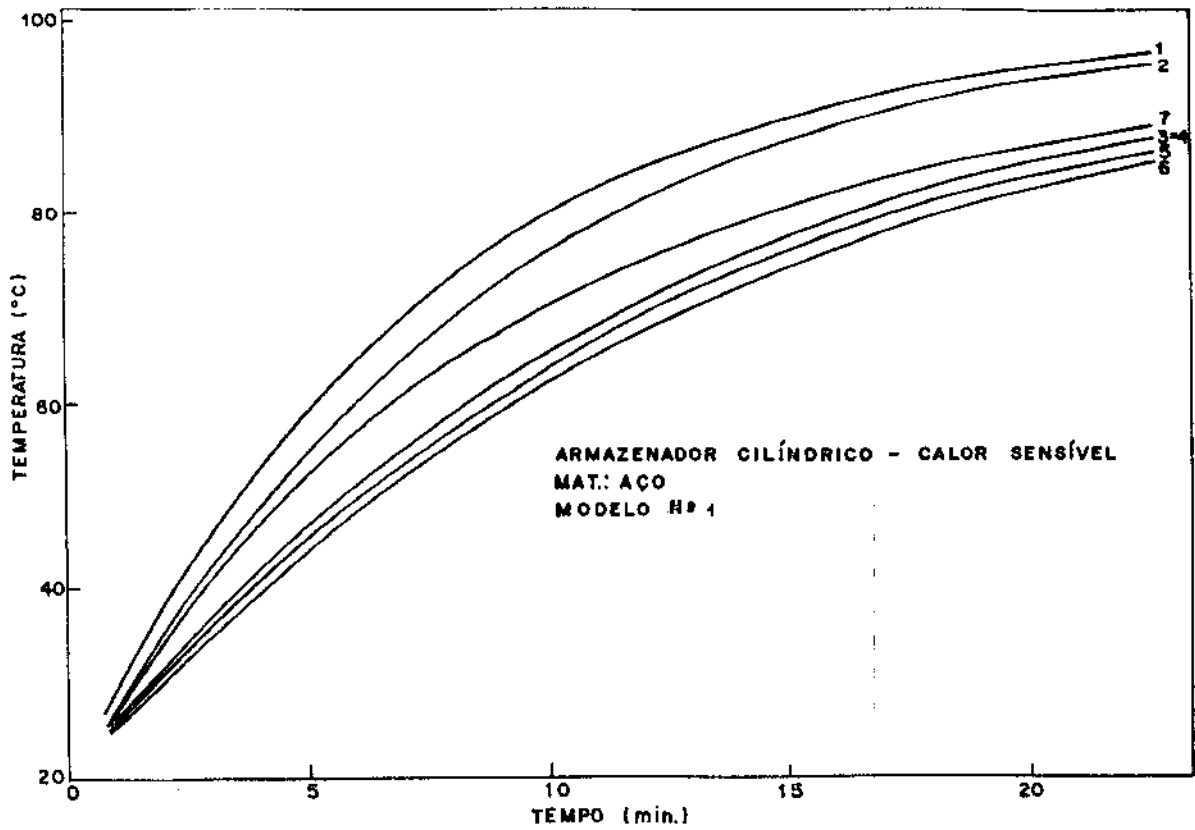


Figura 22 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 2)

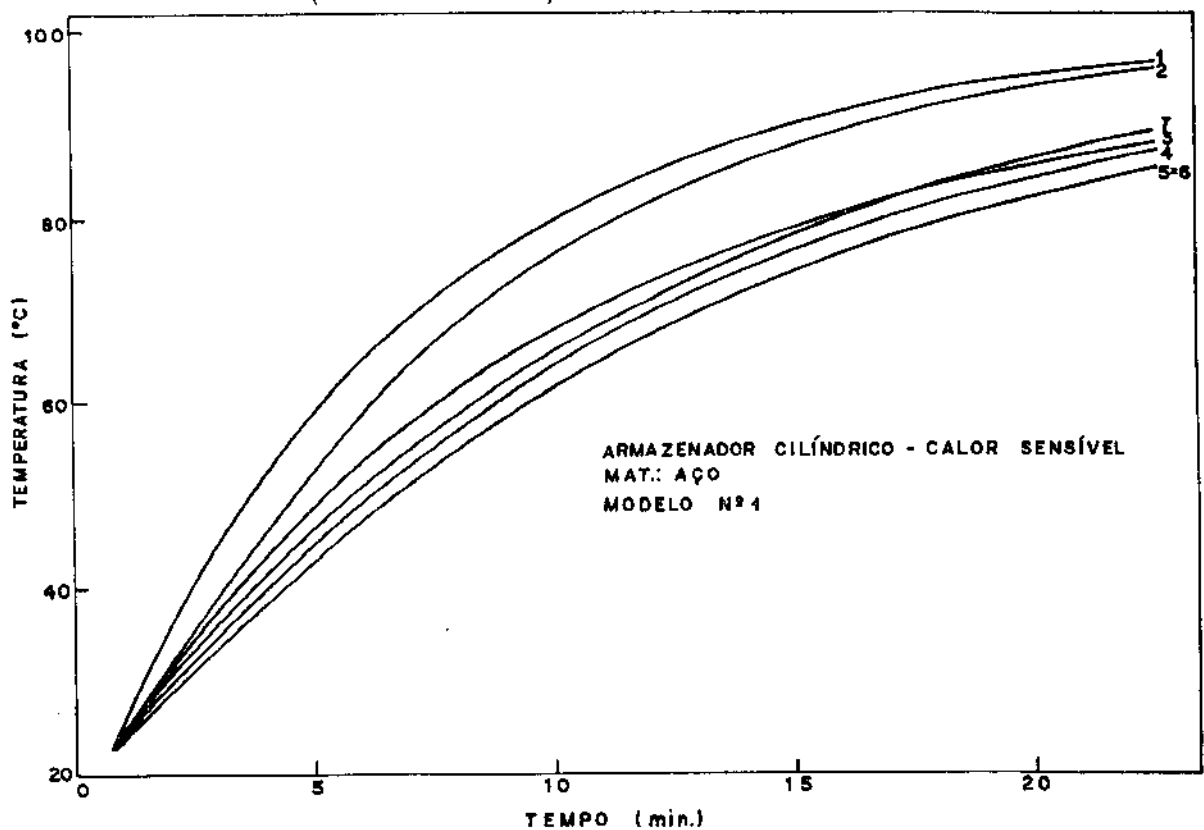


Figura 23 - Temperatura do Material a 3 mm da Superfície
(Ensaio nº 2)

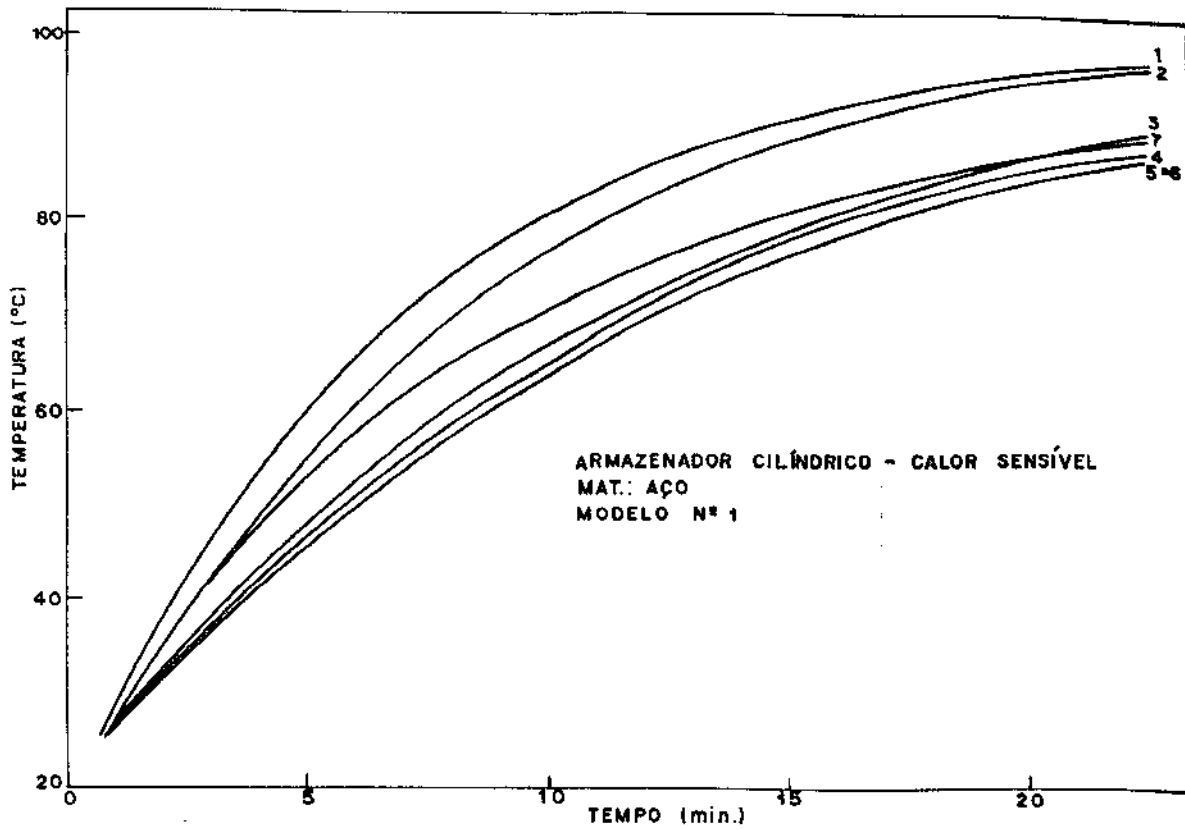


Figura 24 - Temperatura do Material a 8 mm da Superfície (Ensaio nº 2)

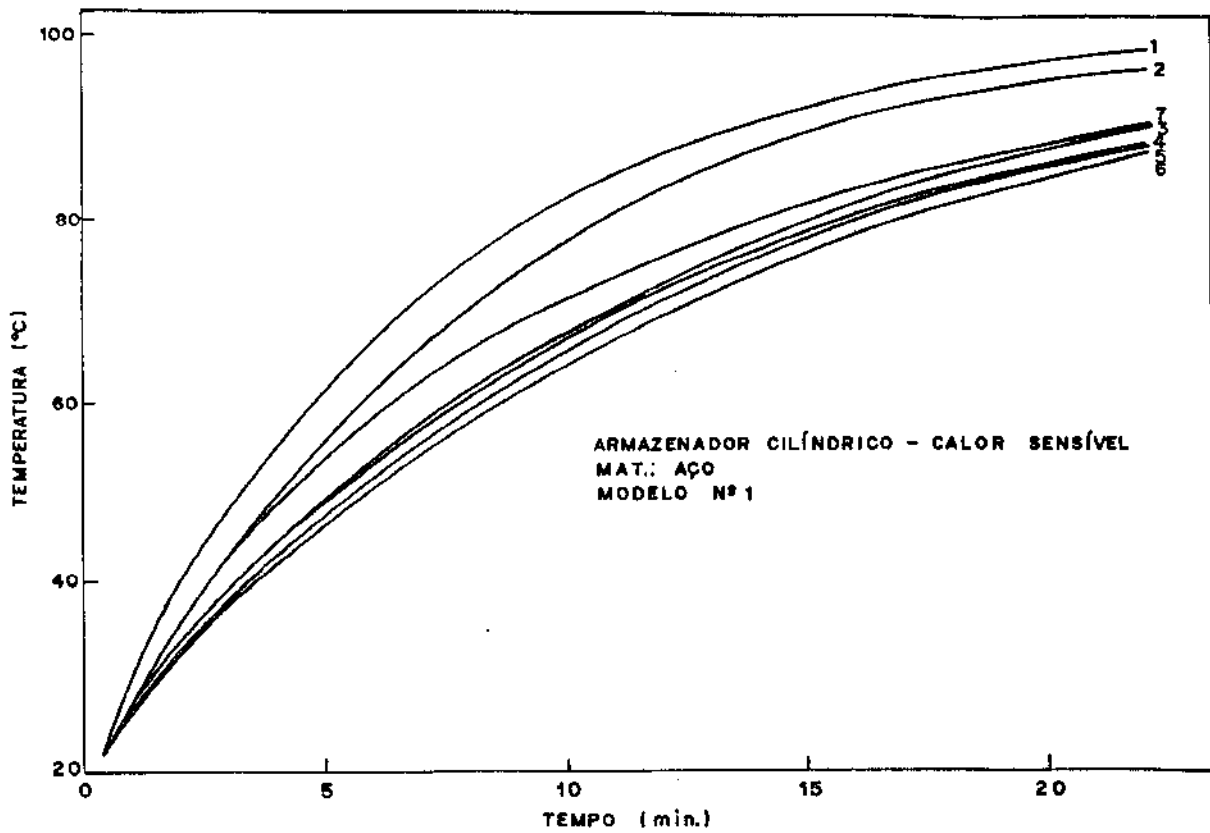


Figura 25 - Temperatura do Material a 10 mm da Superfície (Ensaio nº 2)

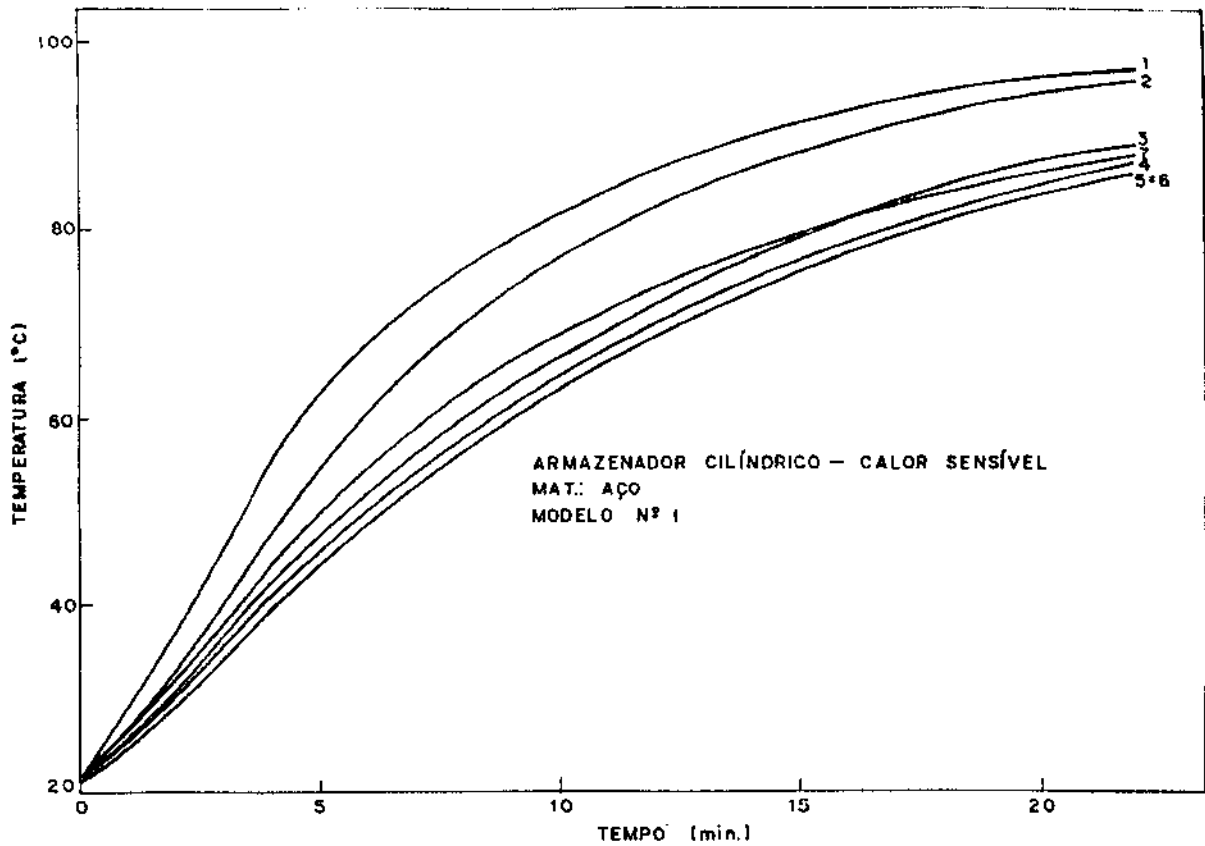


Figura 26 - Temperatura do Material a 13 mm da Superfície (Ensaio nº 2)

c) Distribuição dos pontos de medição da temperatura no modelo nº 2

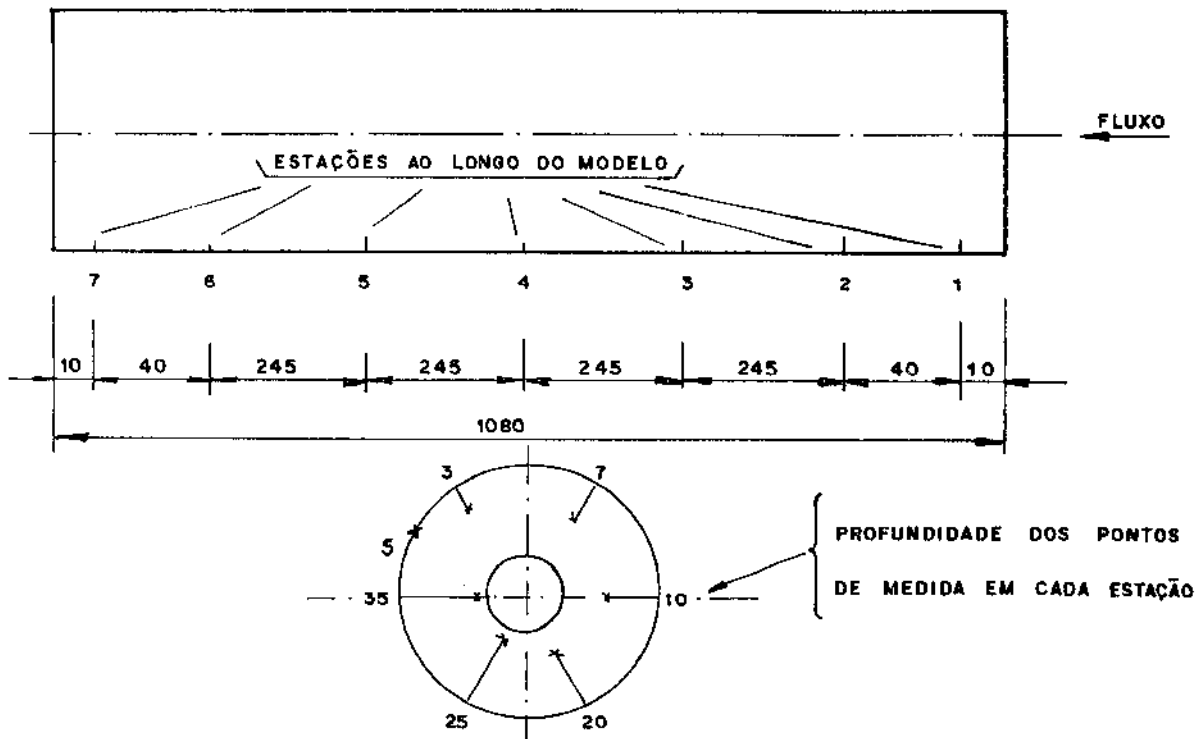


Figura 27 - Esquema da Distribuição dos Pontos de Medida de Temperatura no Modelo nº 2

d) Ensaio de Carregamento do Modelo nº 2

d.1.) Dados e Resultados do Ensaio nº 3

$$\bar{t}_f = 115,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0588 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 70,68 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_{ei} = 28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

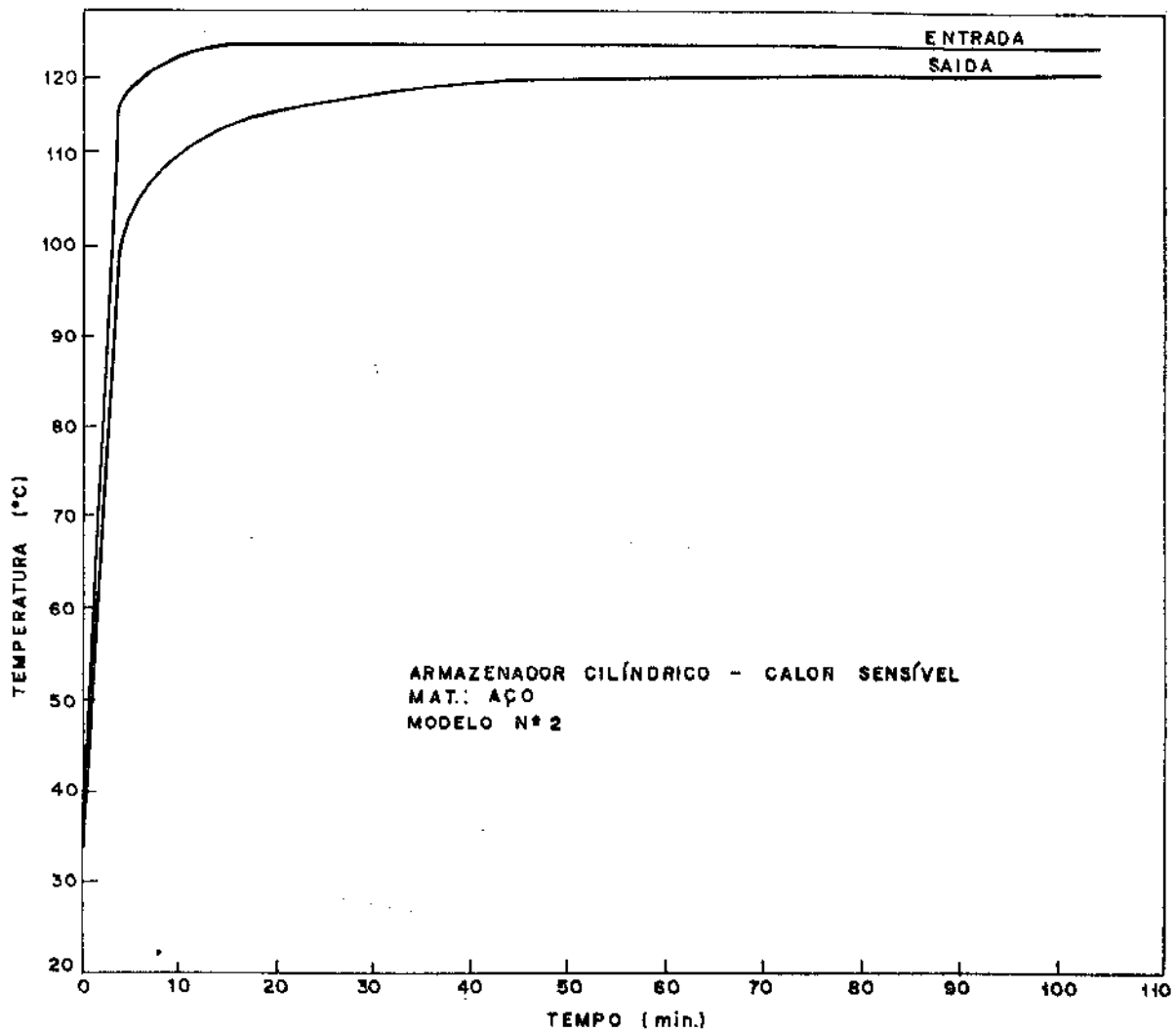


Figura 28 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 3)

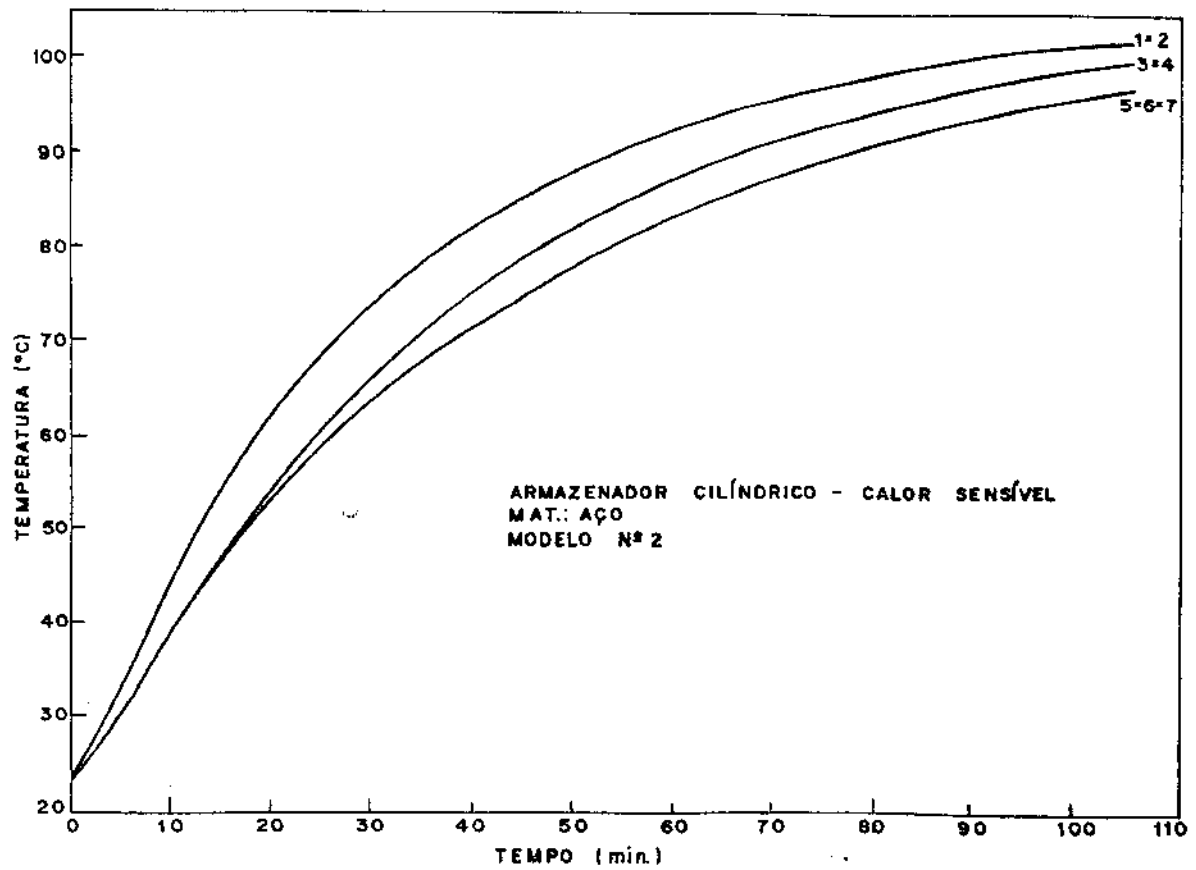


Figura 29 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 3)

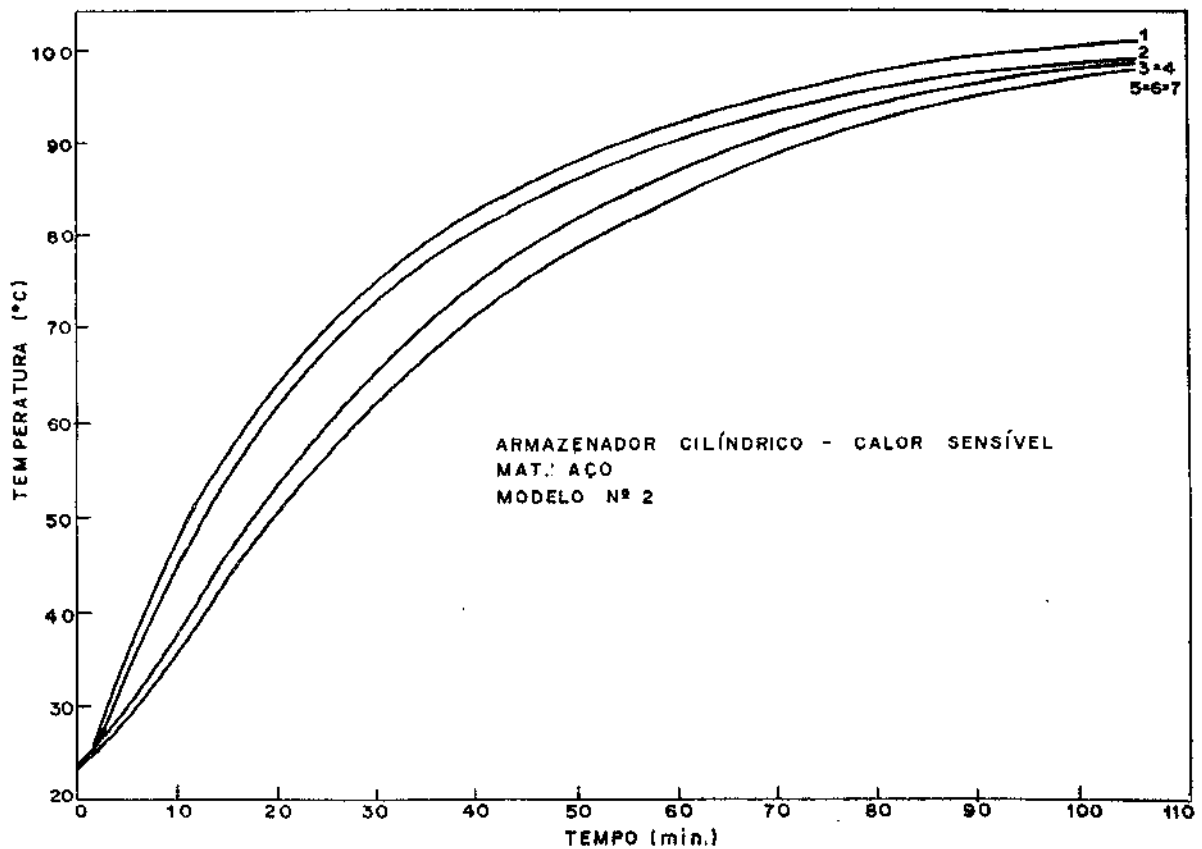


Figura 30 - Temperatura do Material a 3 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

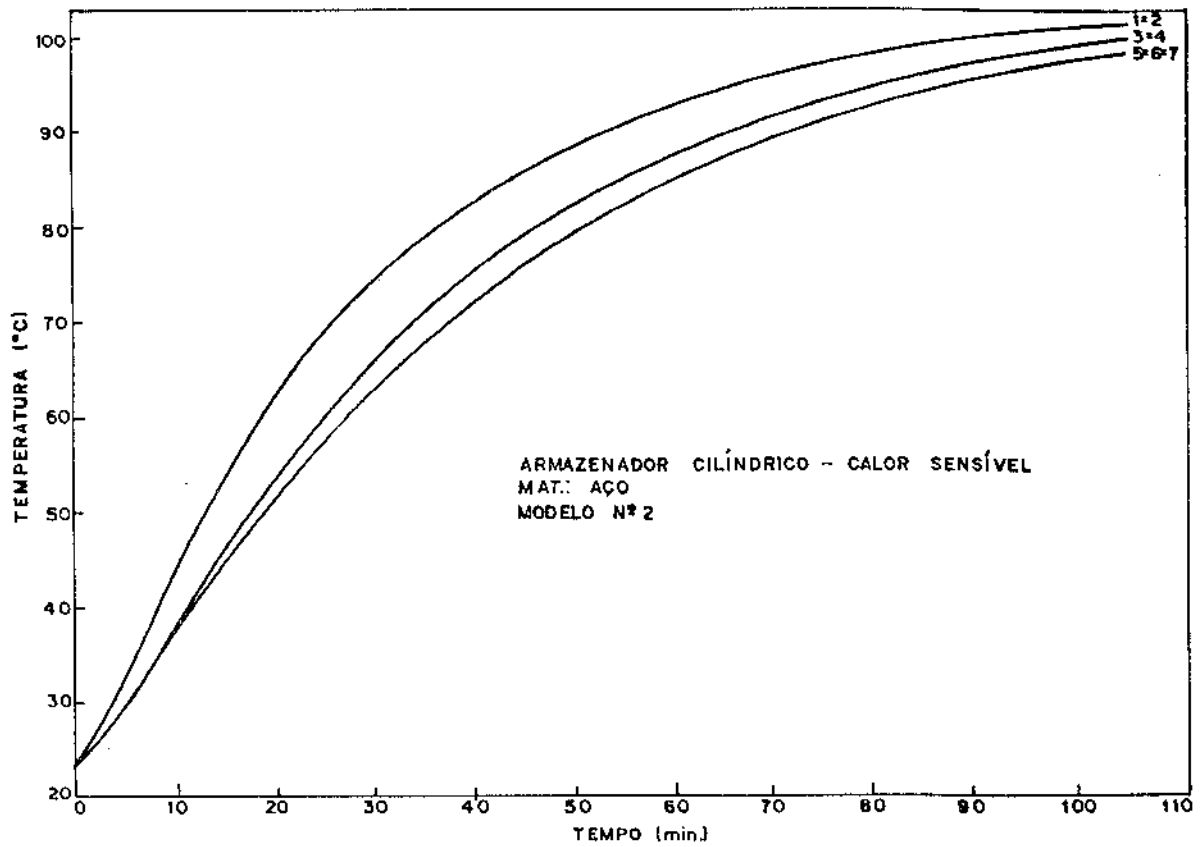


Figura 31 - Temperatura do Material a 7 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

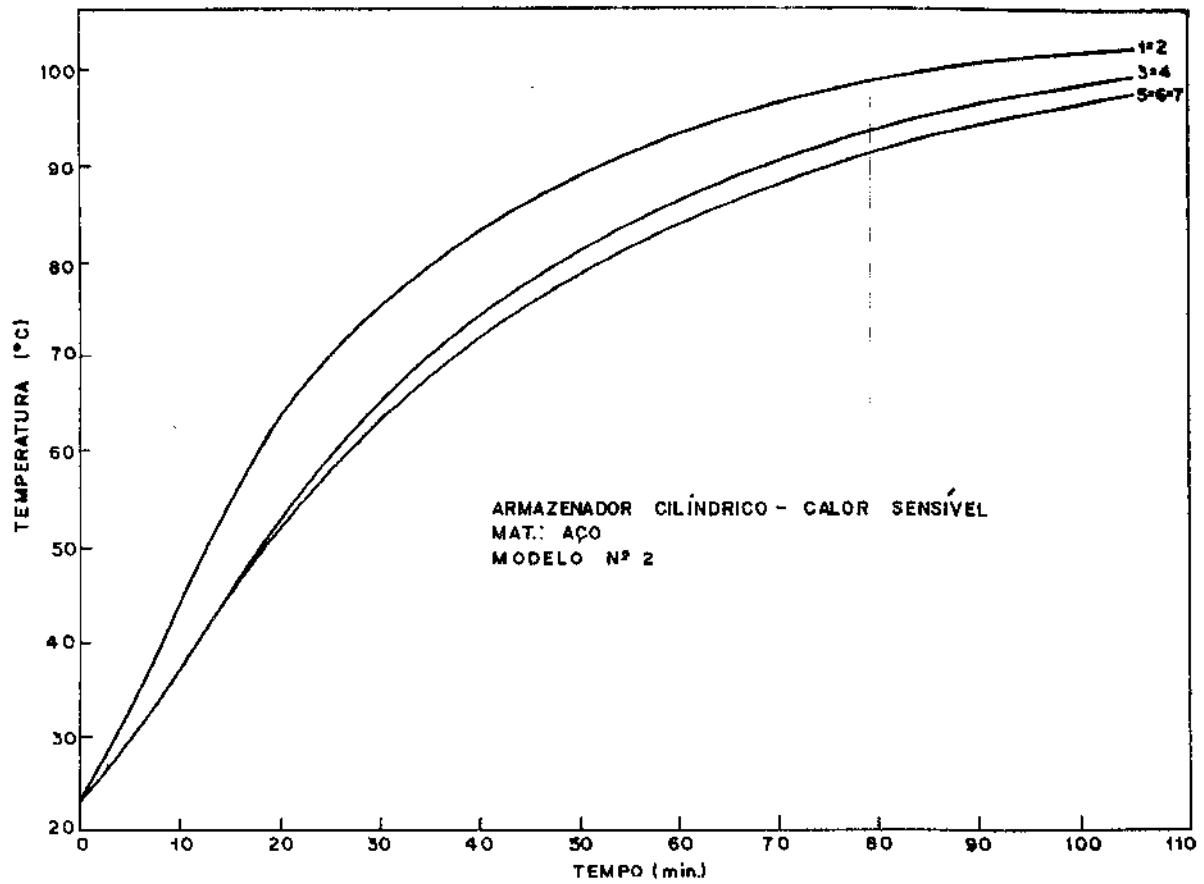


Figura 32 - Temperatura do Material a 10 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

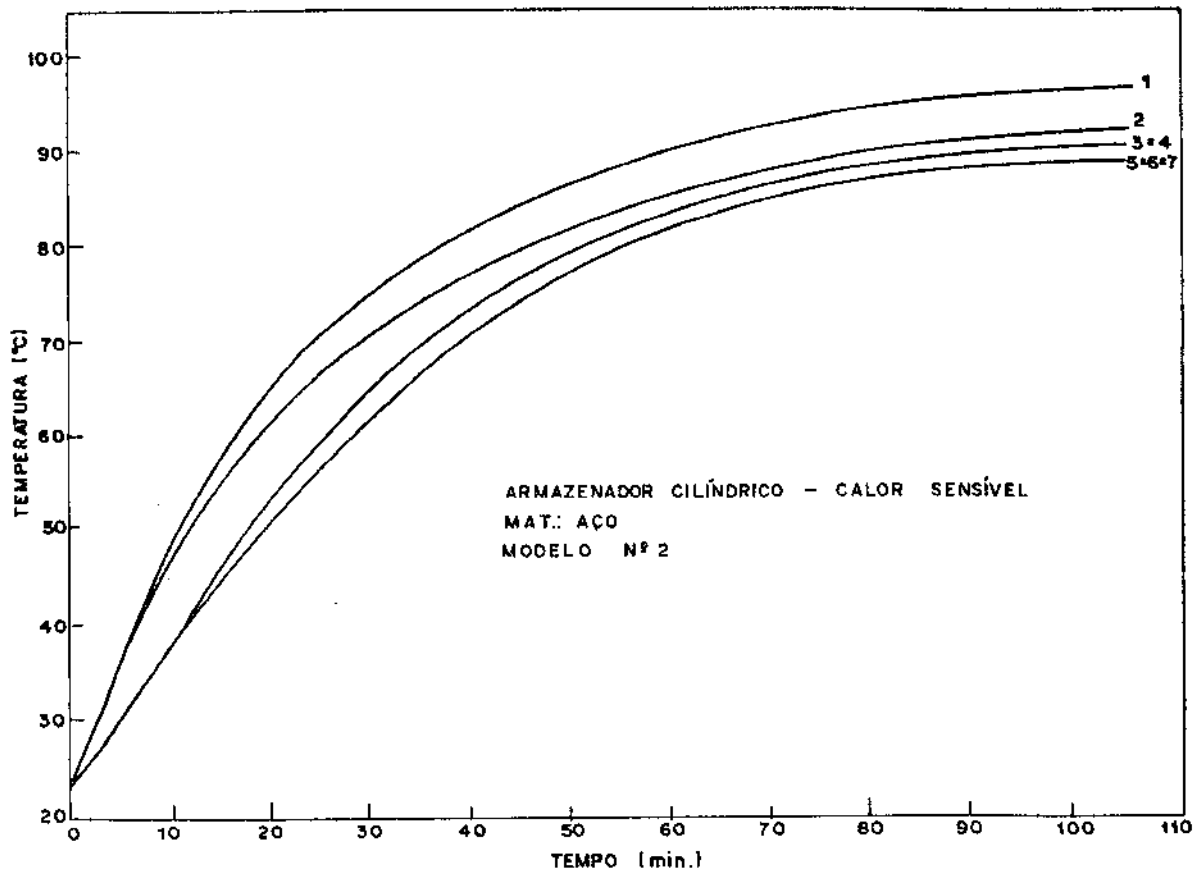


Figura 33 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

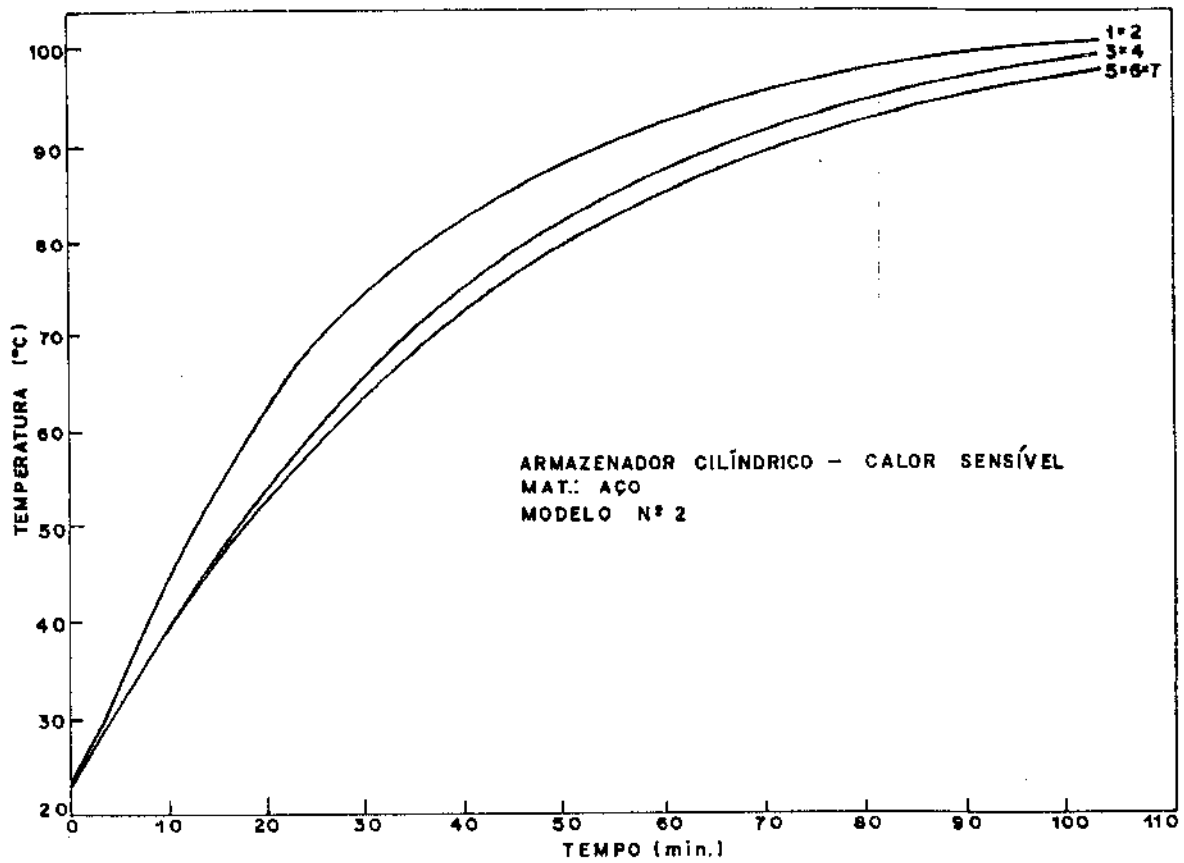


Figura 34 - Temperatura do Material a 25 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

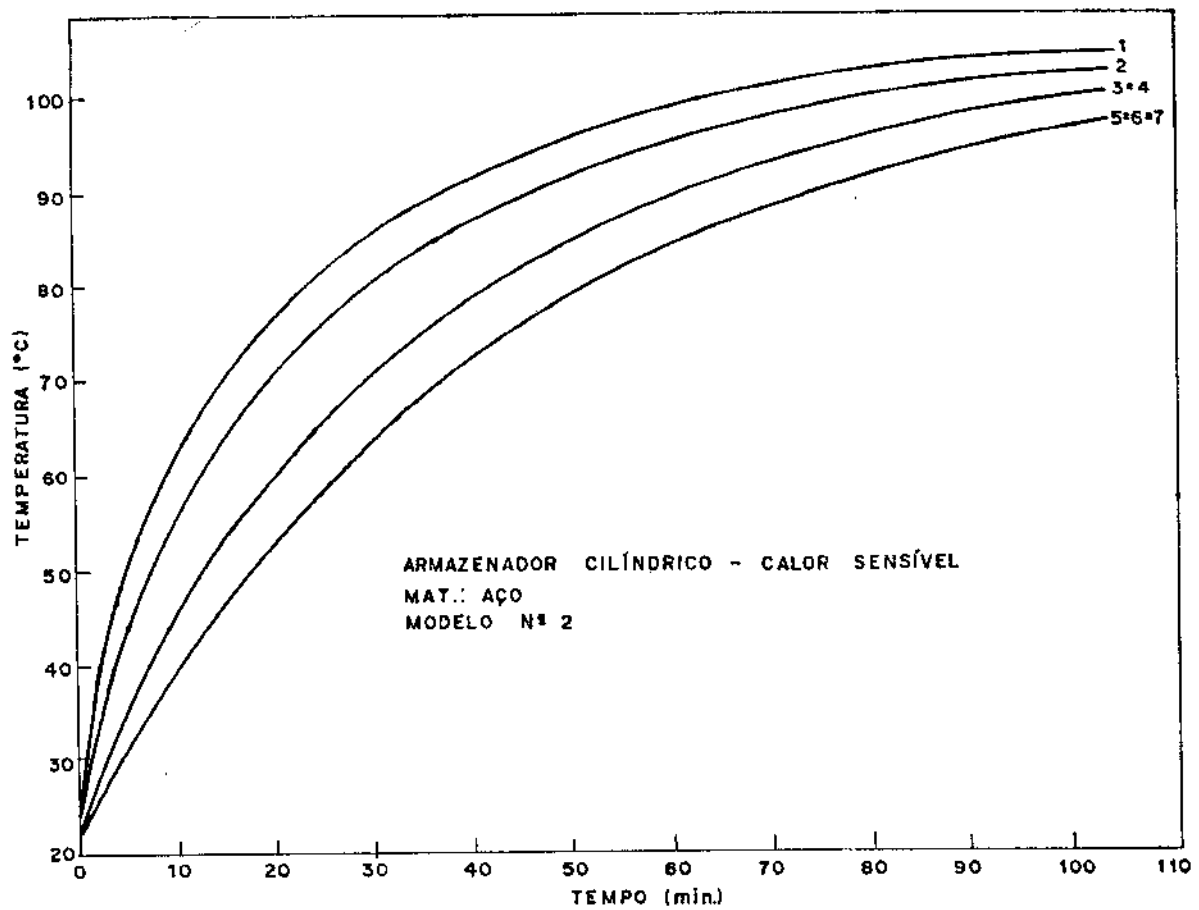


Figura 35 - Temperatura do Material a 35 mm da Superfície (Ensaio nº 3)

d.2.) Dados e Resultados do Ensaio nº 4

$$\bar{t}_f = 120,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 21,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 22,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0588 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 71,80 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_{ei} = 26,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

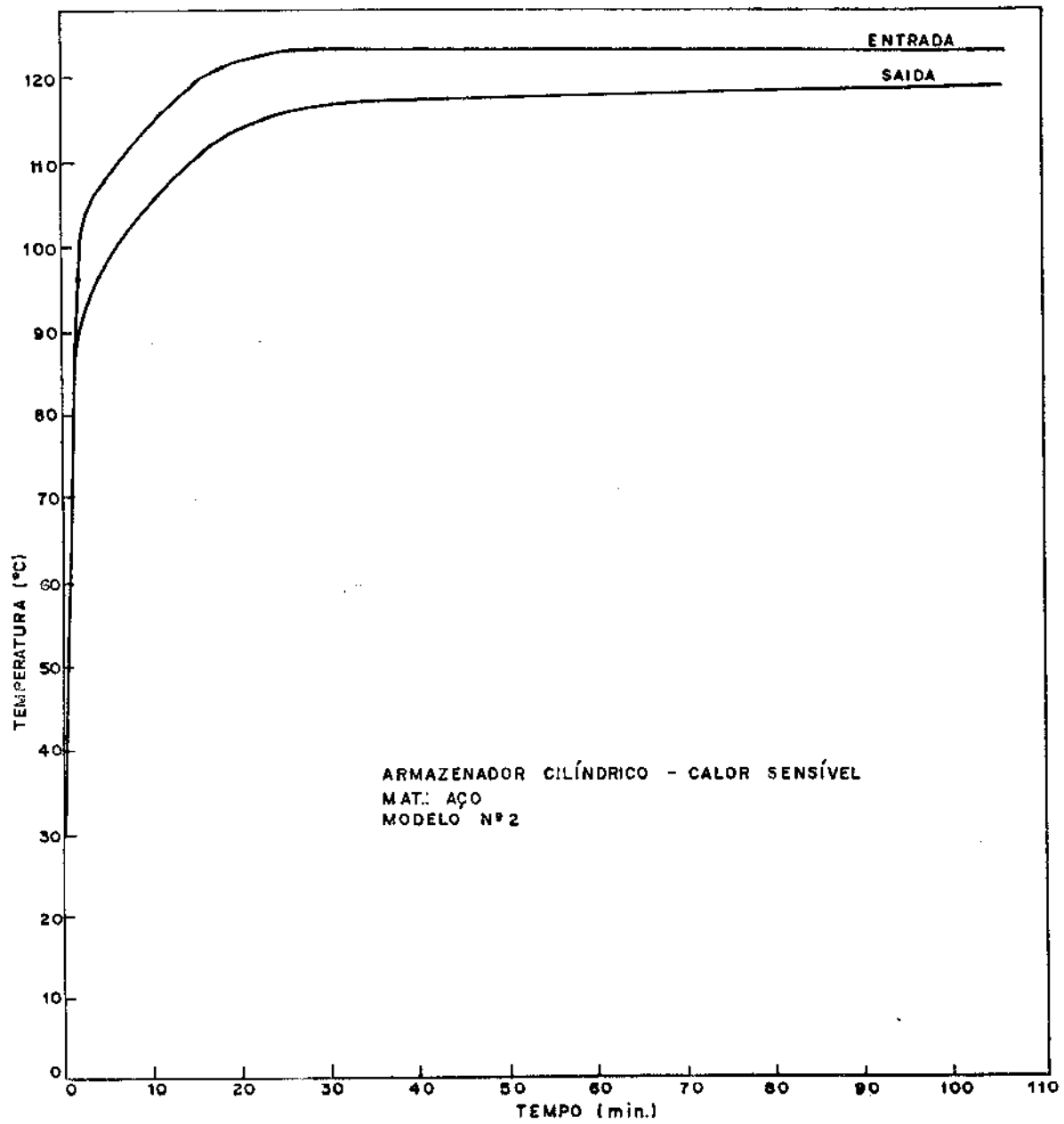


Figura 36 - Temperatura de Entrada e Saída do
Fluido (Ensaio nº 4)

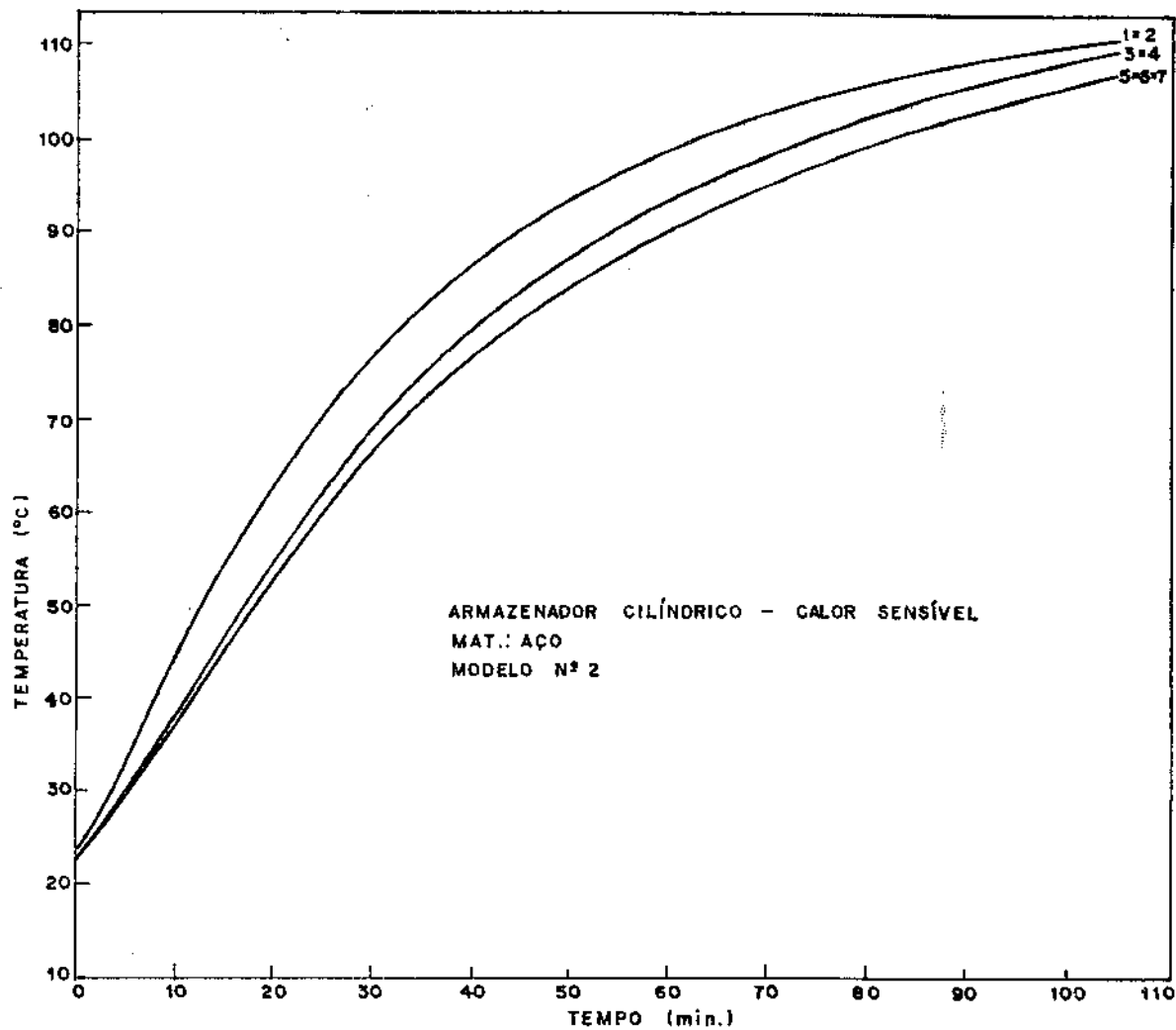


Figura 37 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 4)

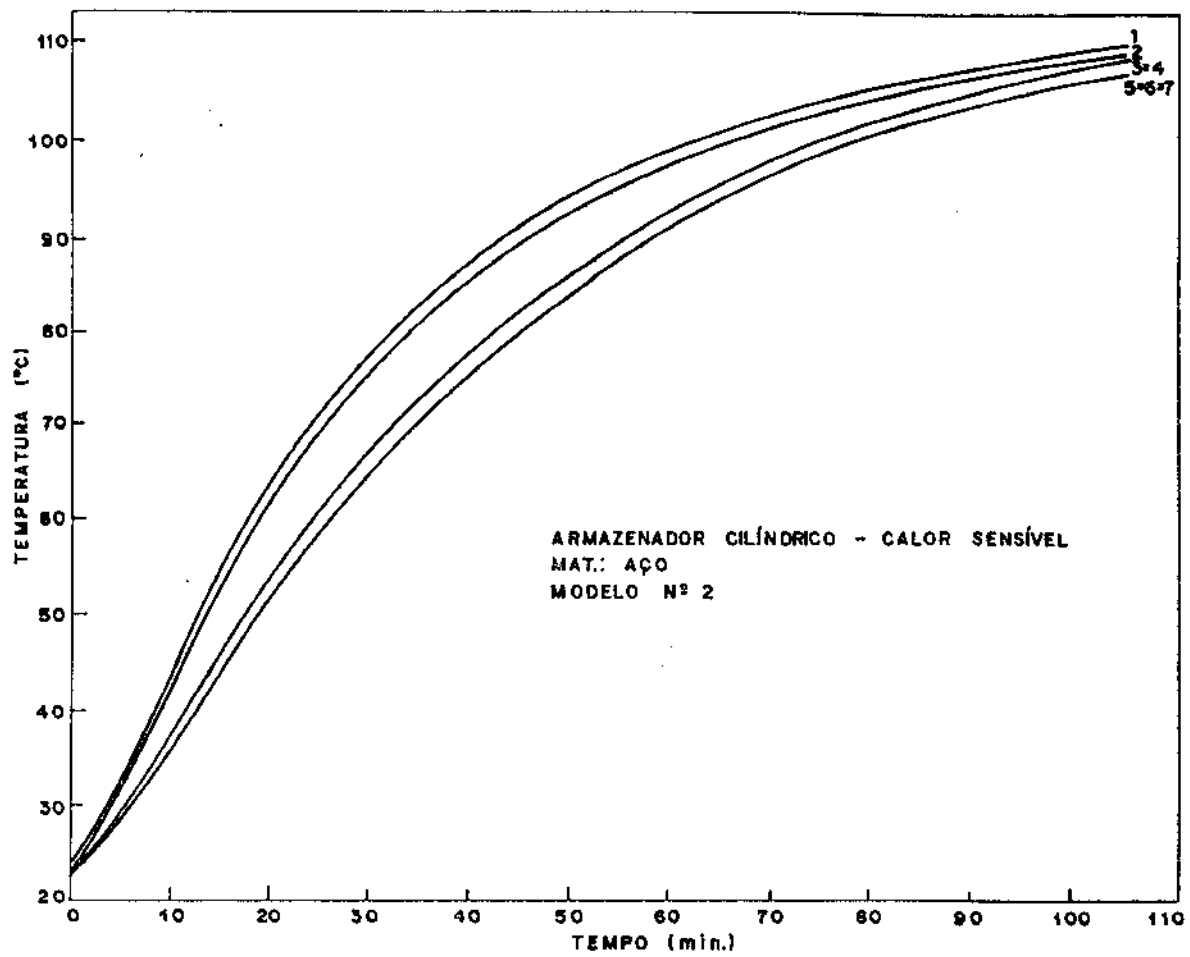


Figura 38 - Temperatura do Material a 3 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

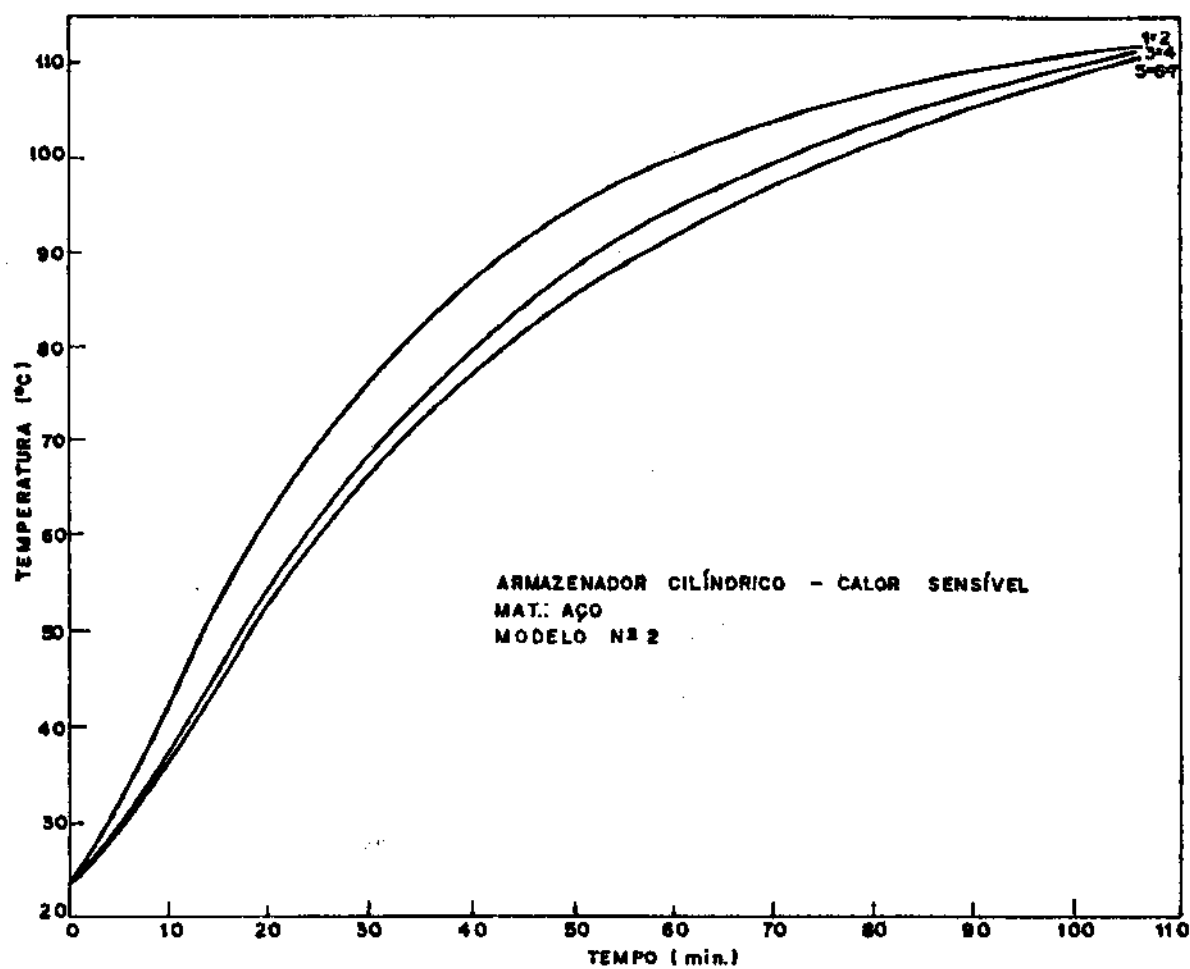


Figura 39 - Temperatura do Material $\tilde{a}$ 7 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

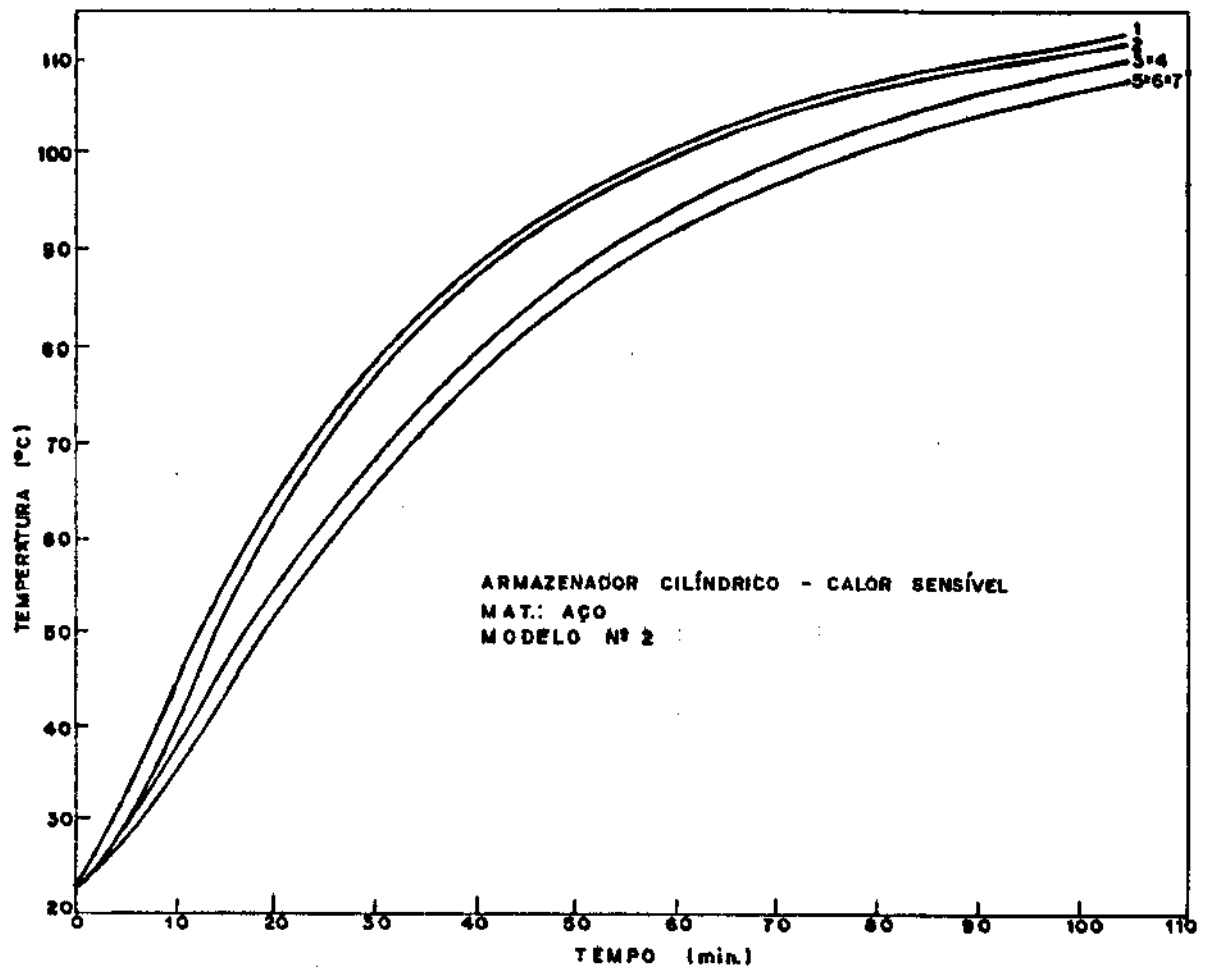


Figura 40 - Temperatura do Material a 10 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

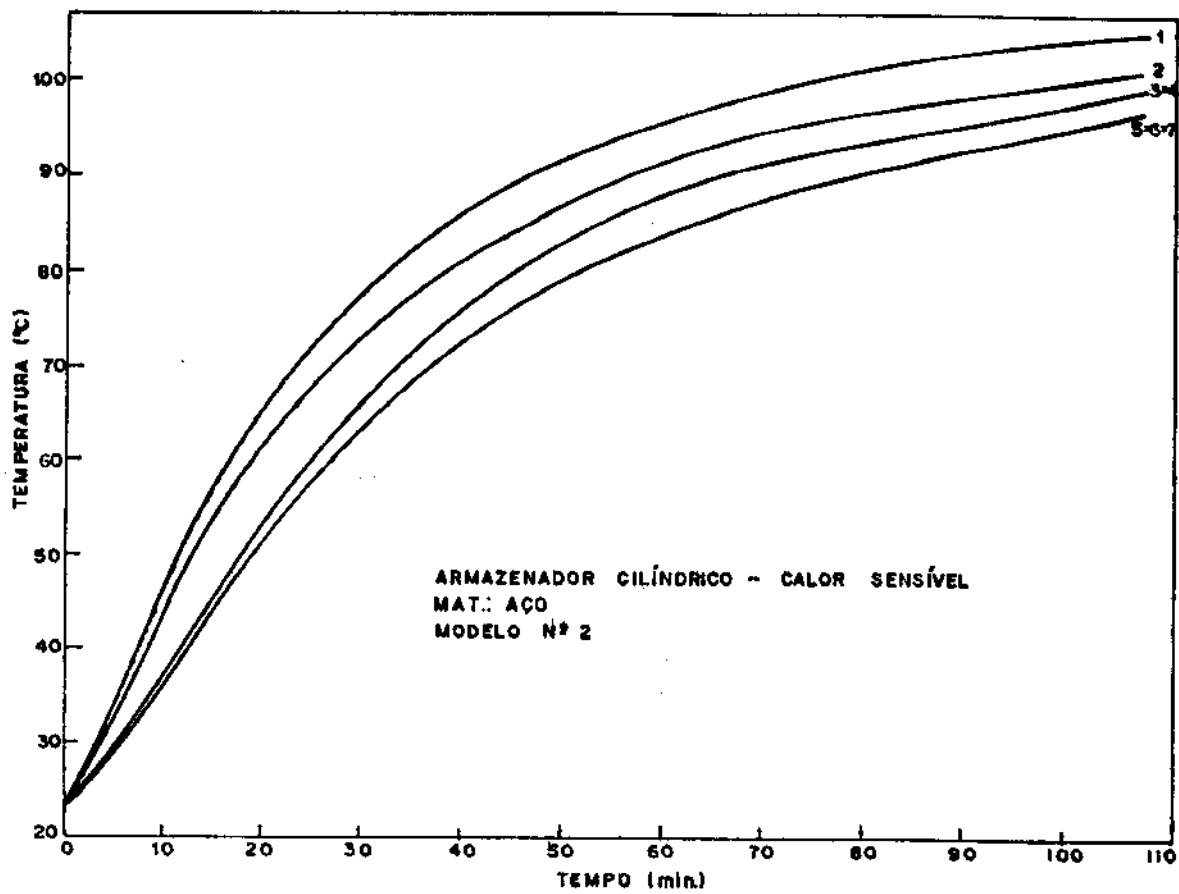


Figura 41 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

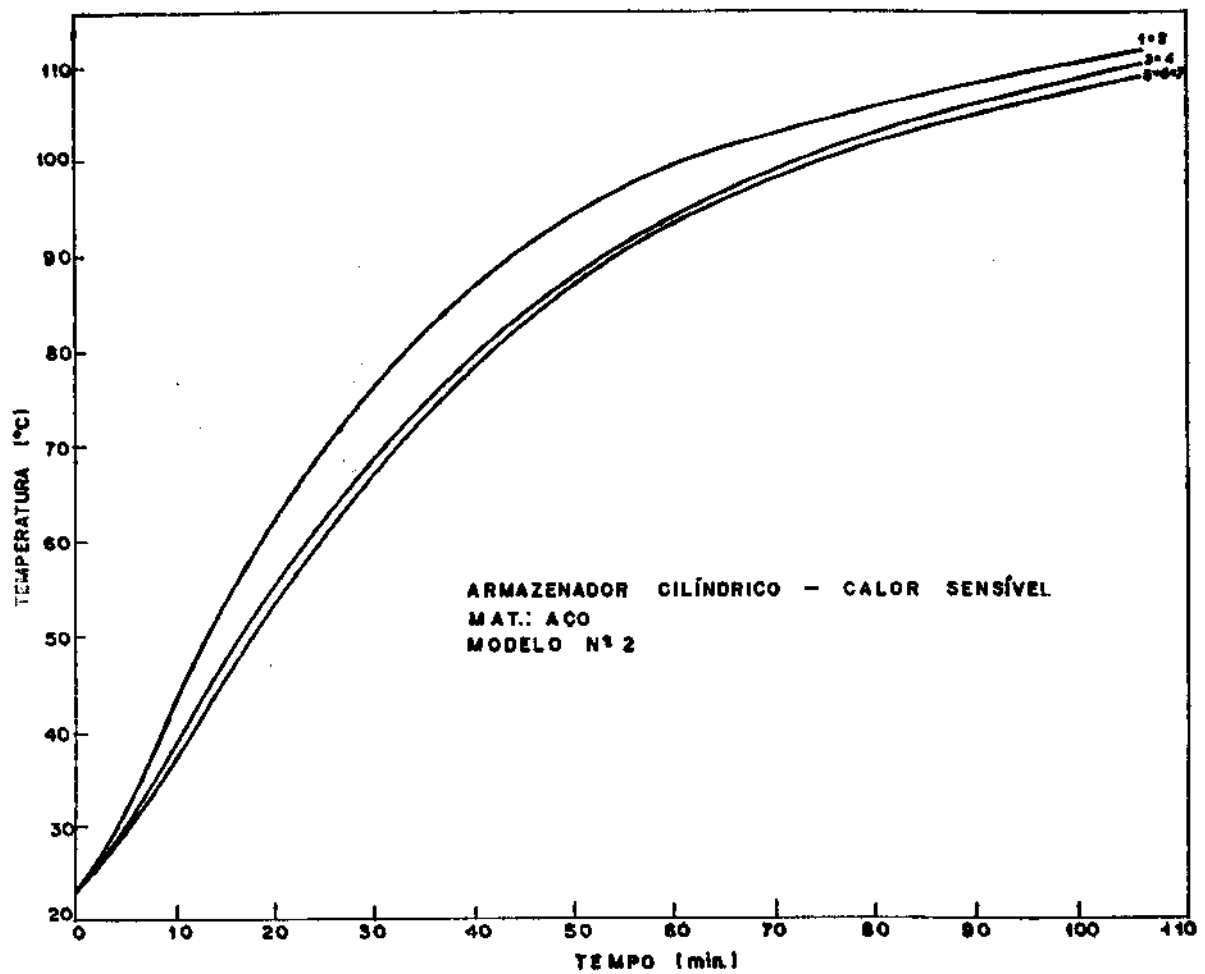


Figura 42 - Temperatura do Material à 25 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

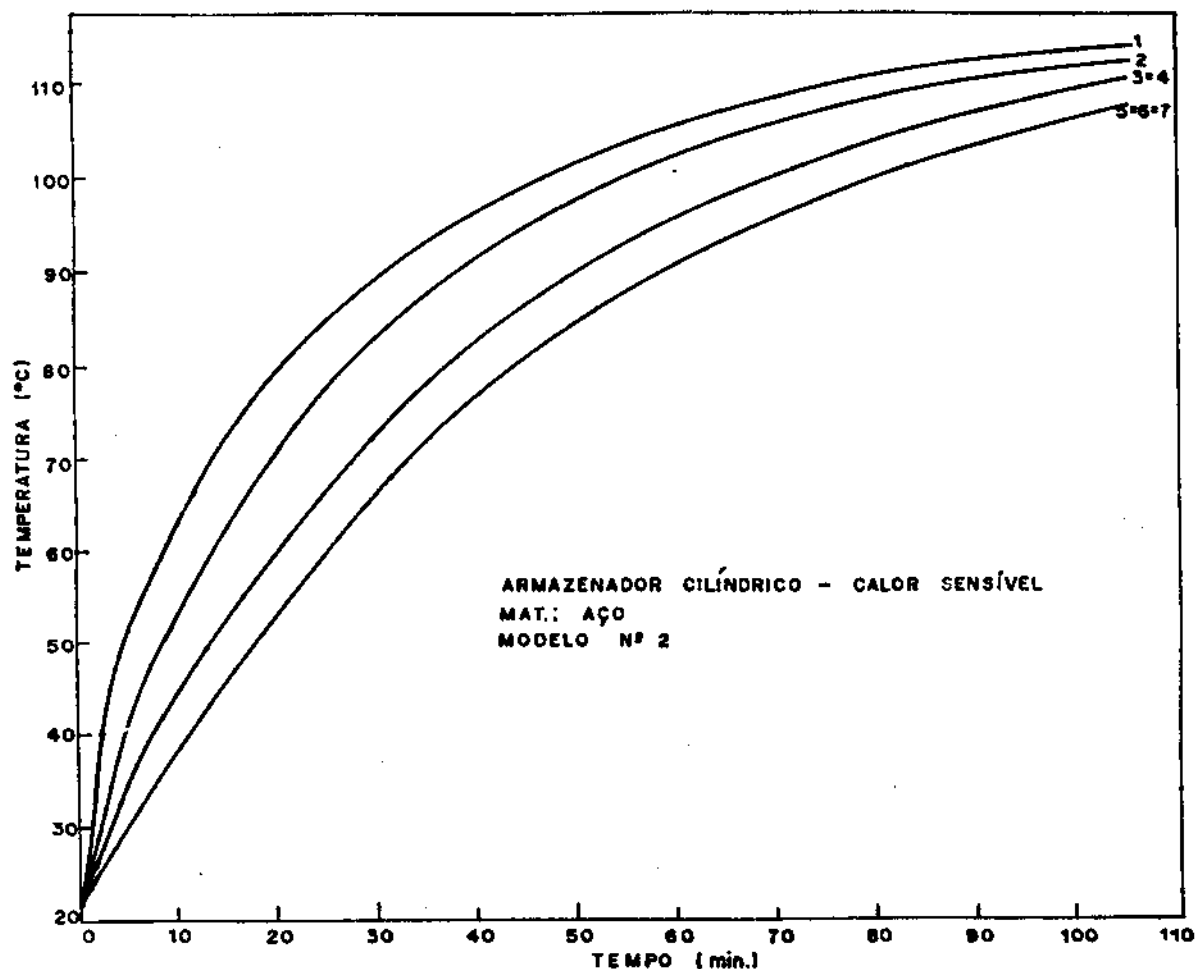


Figura 43 - Temperatura do Material a 35 mm da Superfície (Ensaio nº 4)

e) Ensaio de Descarregamento do Modelo nº 2

e.1) Dados e Resultados do Ensaio nº 5

$$\bar{t}_f = 52,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 81,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 24,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0588 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 70,30 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_{ei} = 25,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

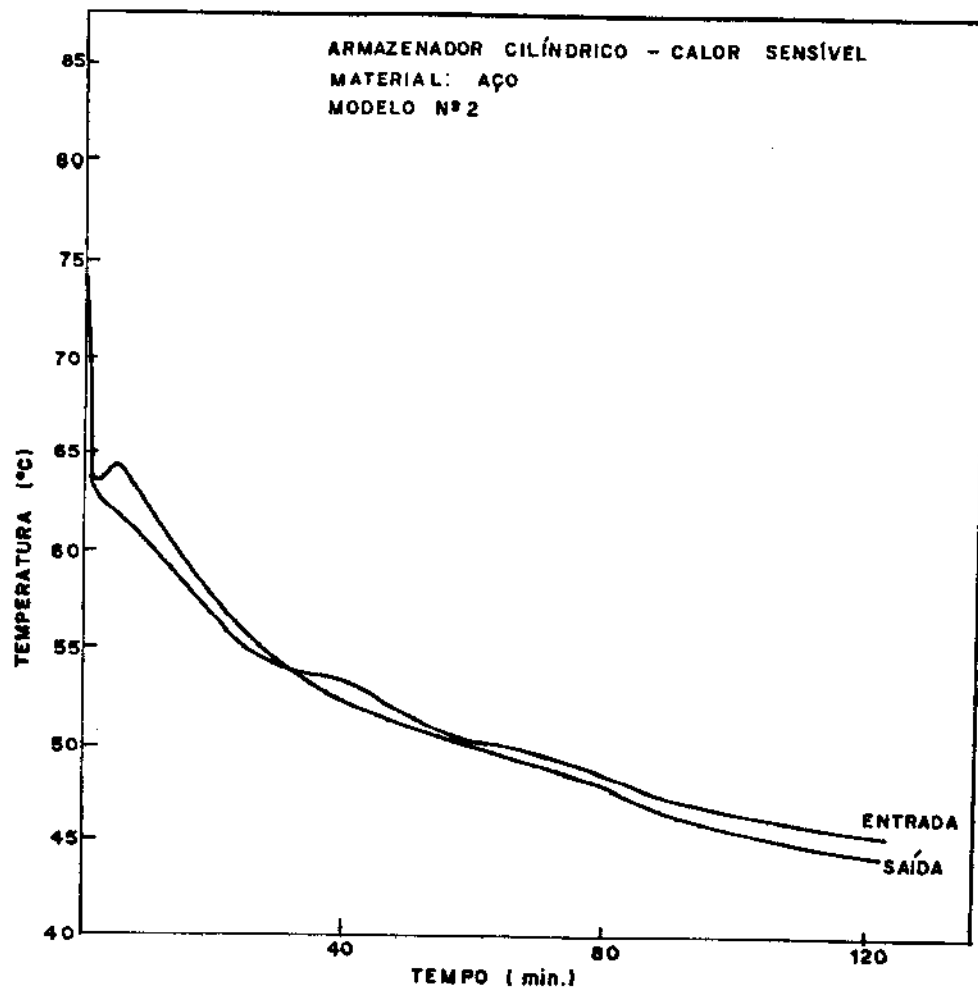


Figura 44 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 5)

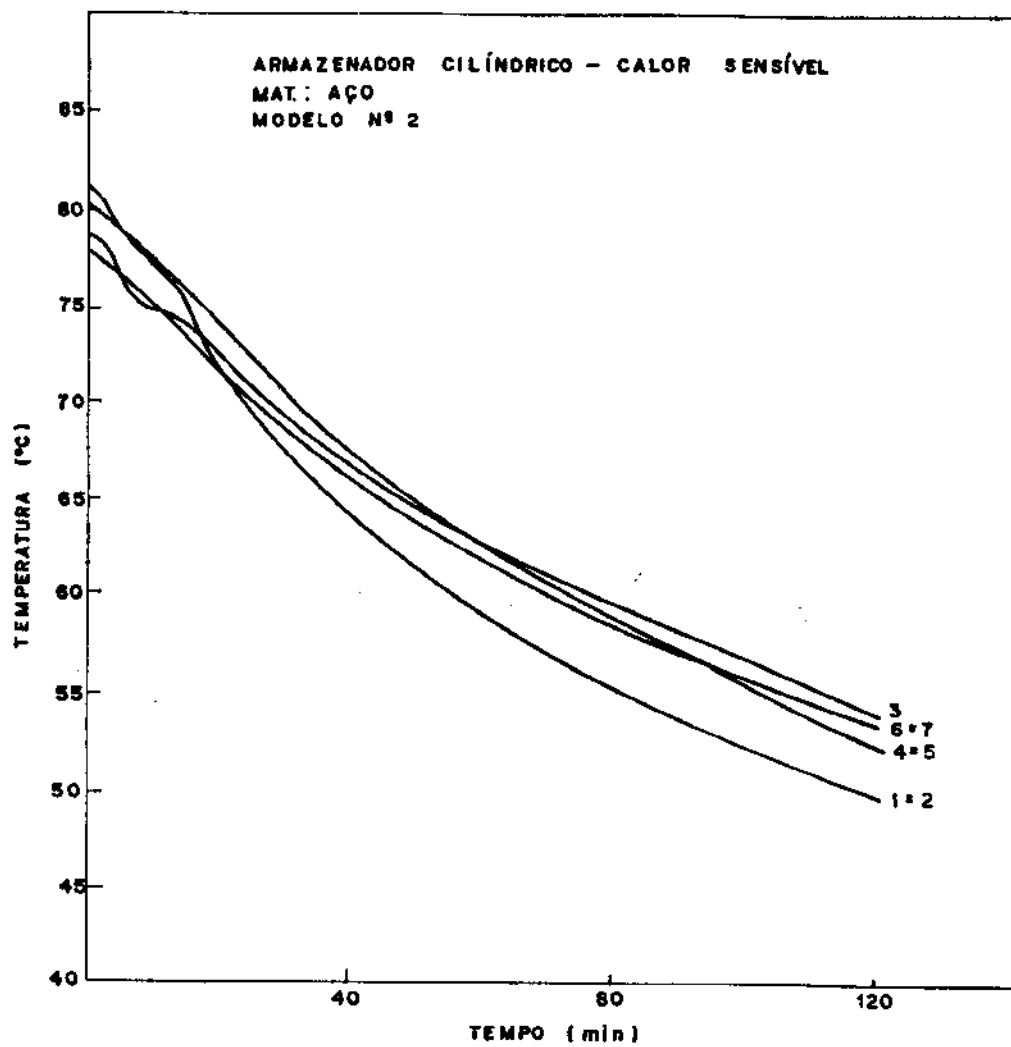


Figura 45 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 5)

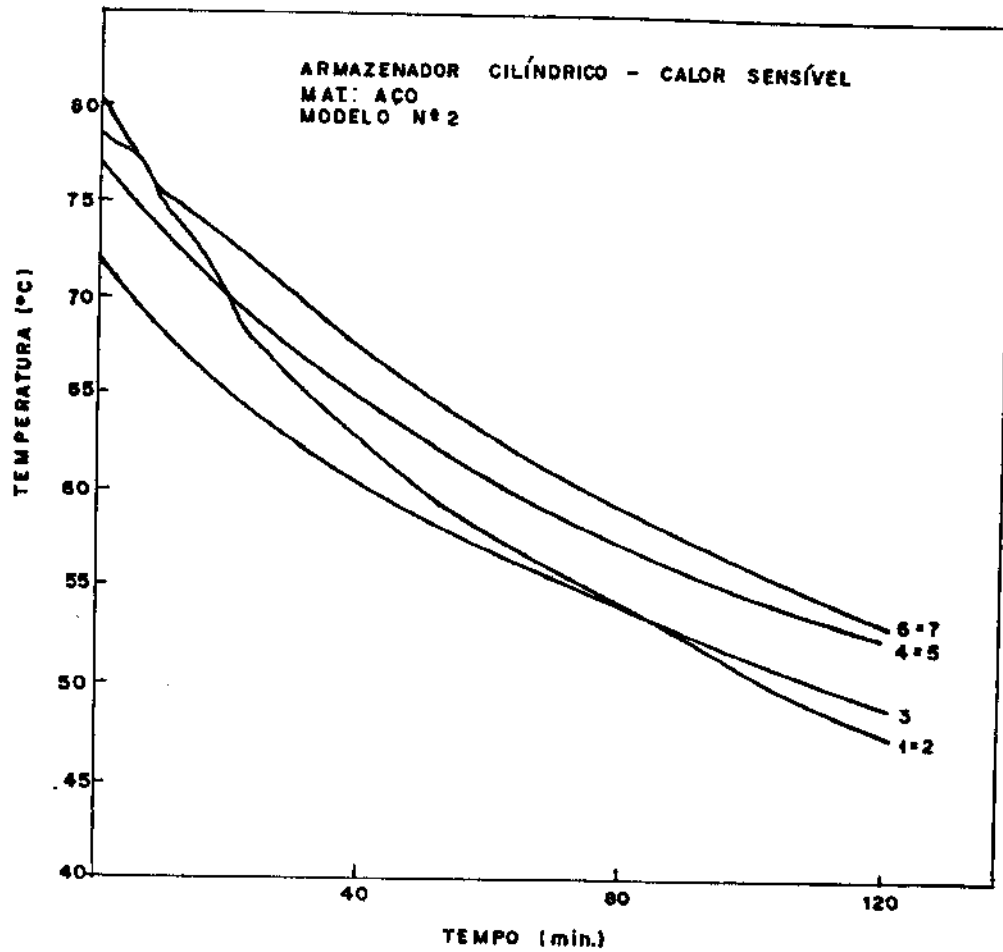


Figura 46 - Temperatura do Material a 3 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

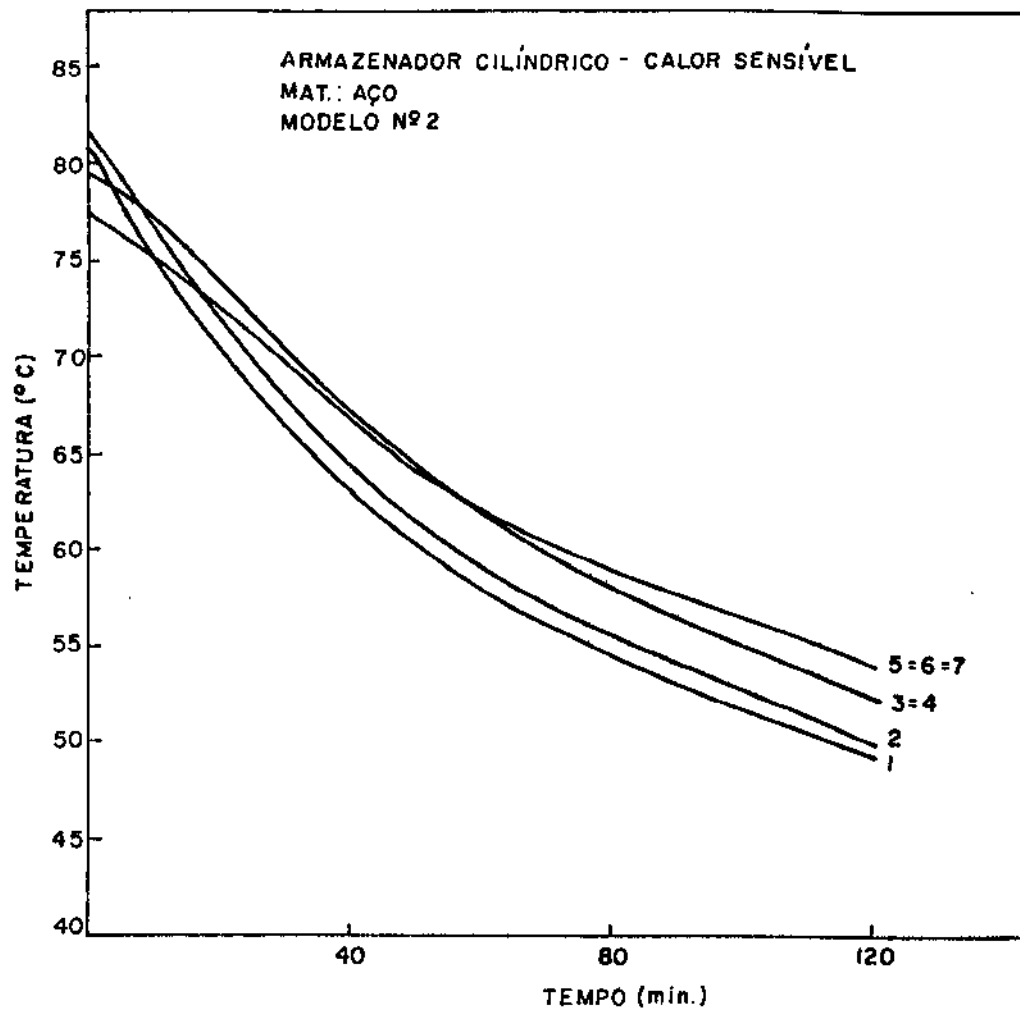


Figura 47 - Temperatura do Material a 7 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

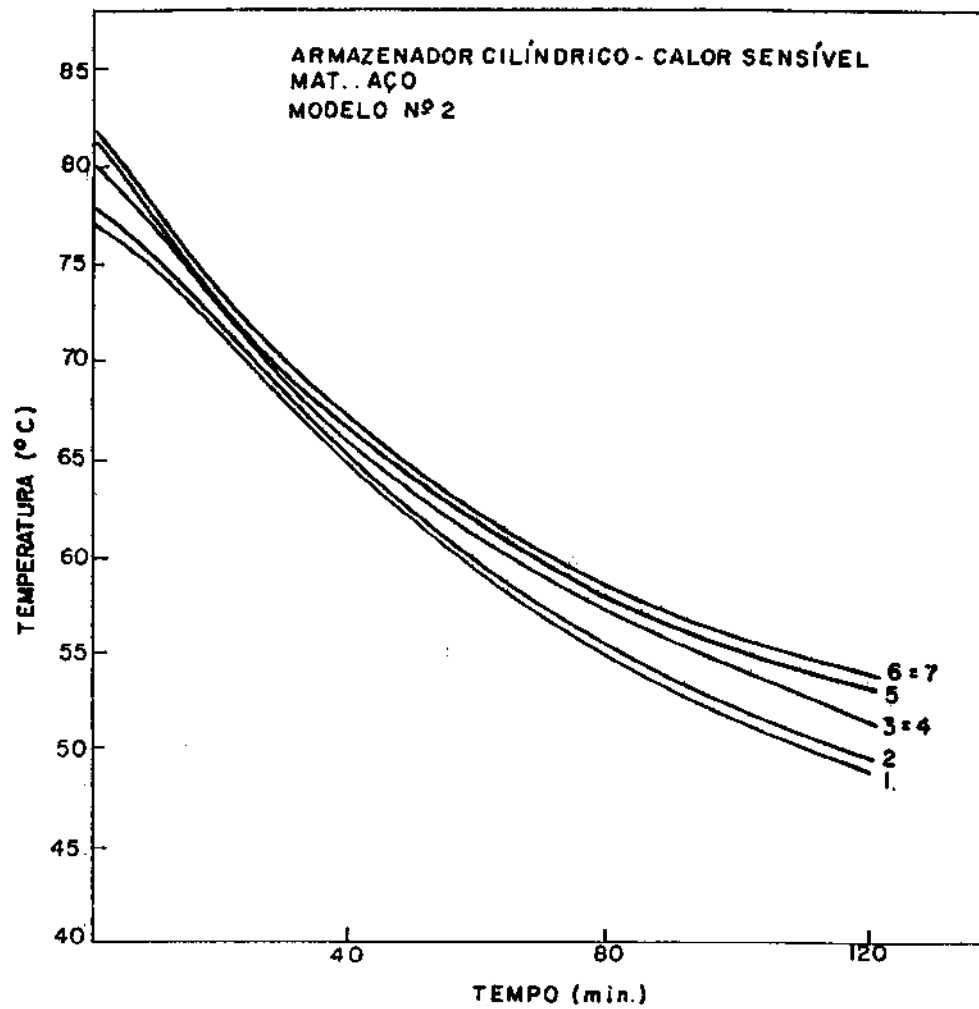


Figura 48 - Temperatura do Material a 10 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

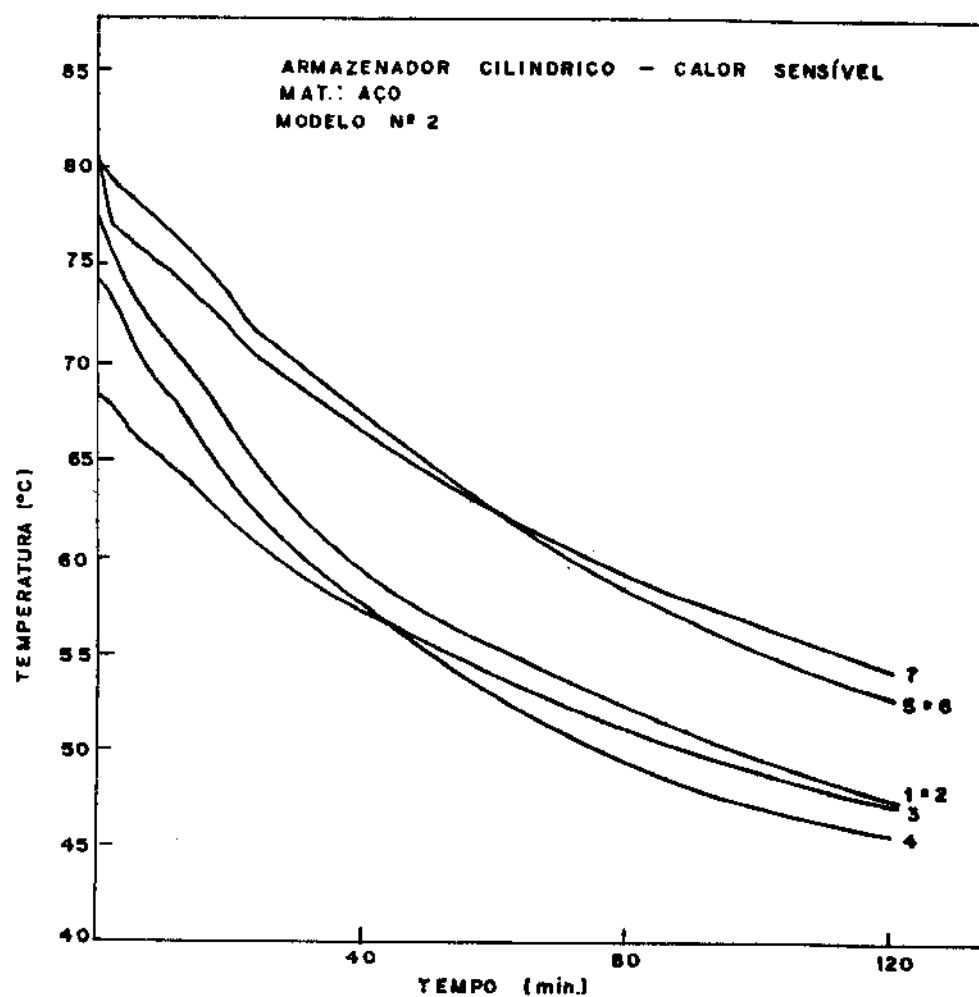


Figura 49 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

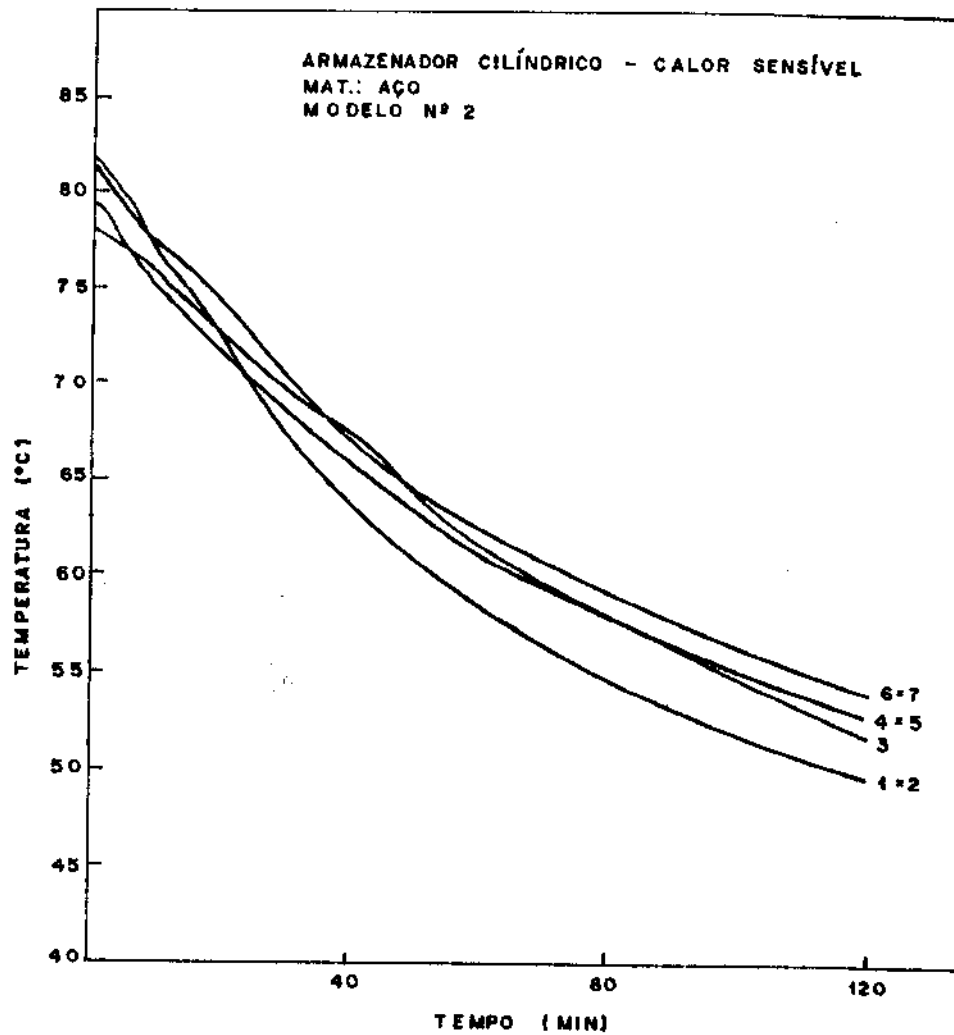


Figura 50 - Temperatura do Material a 25 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

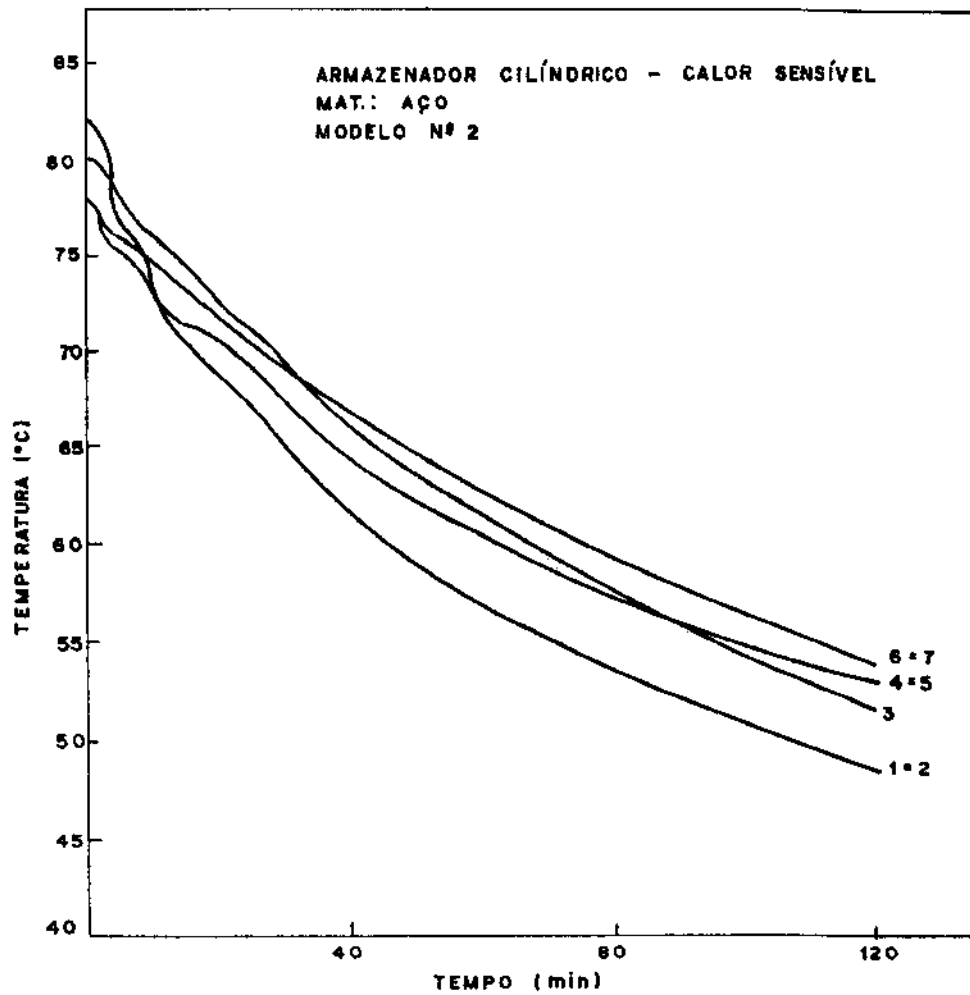
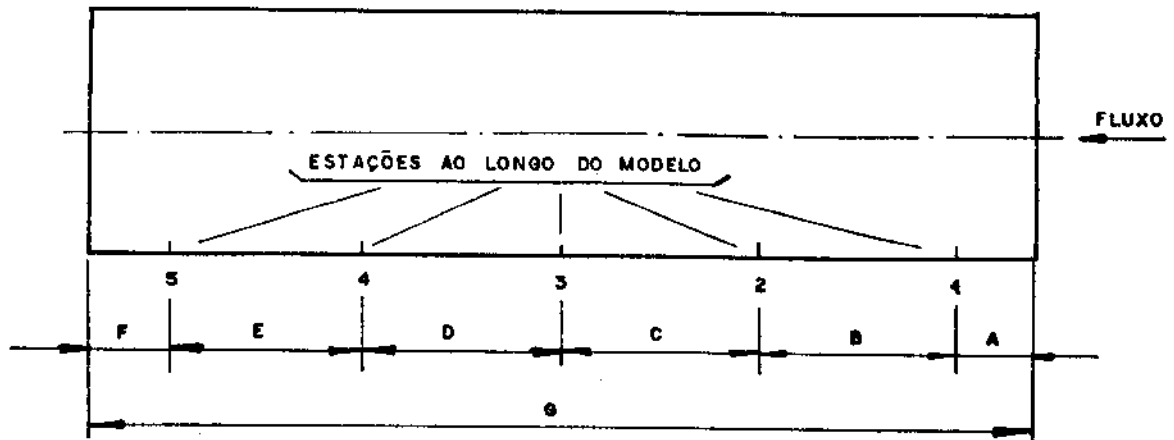


Figura 51 - Temperatura do Material a 35 mm da Superfície (Ensaio nº 5)

6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS MODELOS CONCRETO-AR

a) Distribuição dos pontos de medição da temperatura nos modelos de concreto (nº 3,4,5)



Nº DO MODELO \ DIMENSÃO (mm)	A	B	C	D	E	F	G
3	7	133	266	266	266	7	945
4	9	399	133	133	133	120	927
5	140	266	133	133	266	10	948

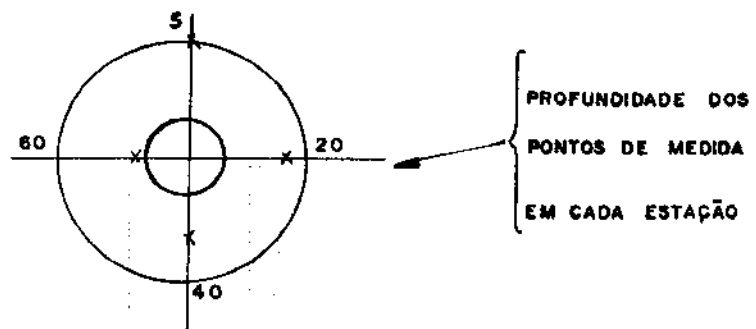


Figura 52 - Esquema da Distribuição dos Pontos de Medida de Temperatura nos Modelos nº 3,4,5

b) Ensaio de Carregamento do Modelo nº 3

b.1) Dados e Resultados do Ensaio nº 6

$$\bar{t}_f = 100,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 29,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 23,57 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

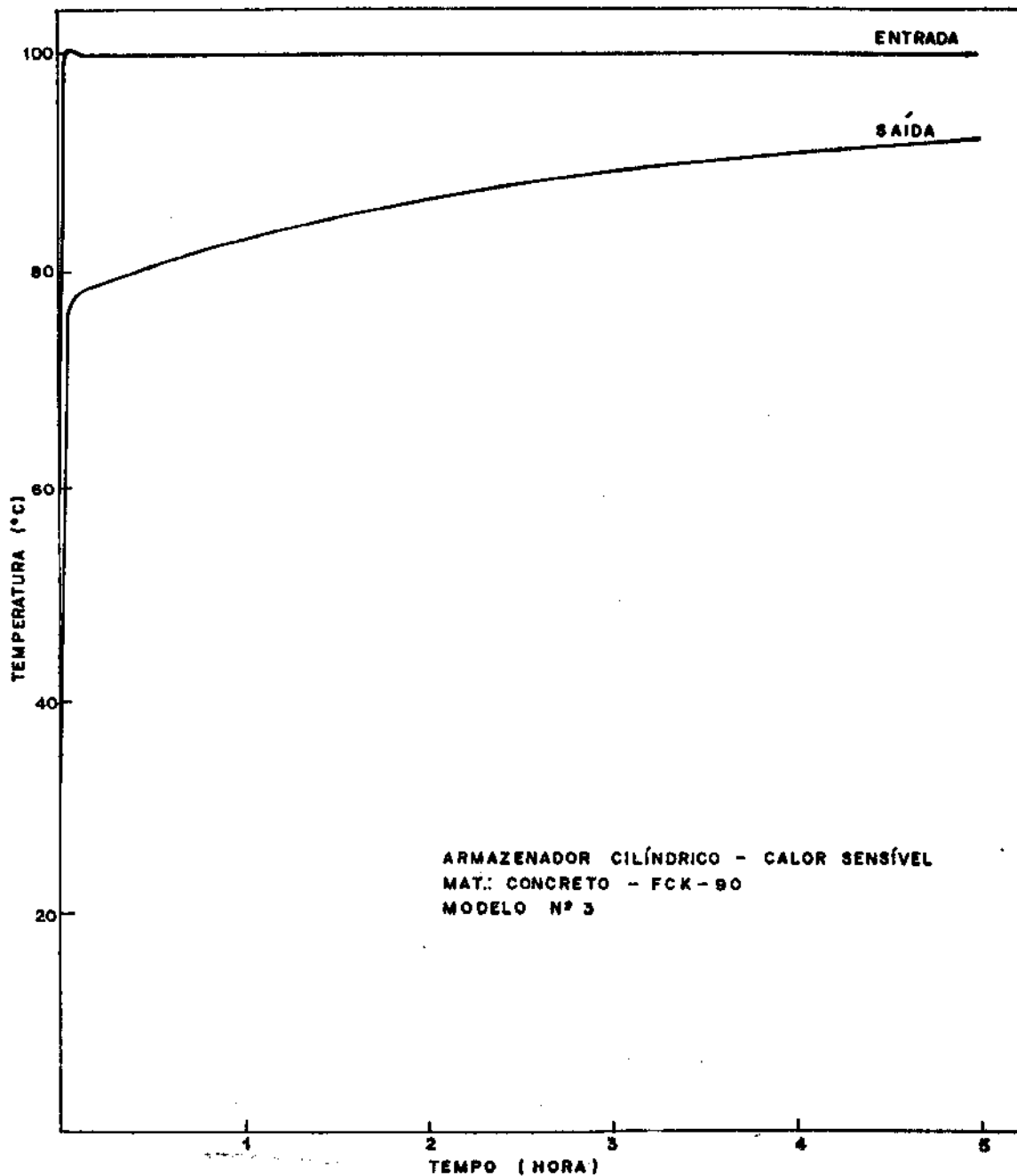


Figura 53 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 6)

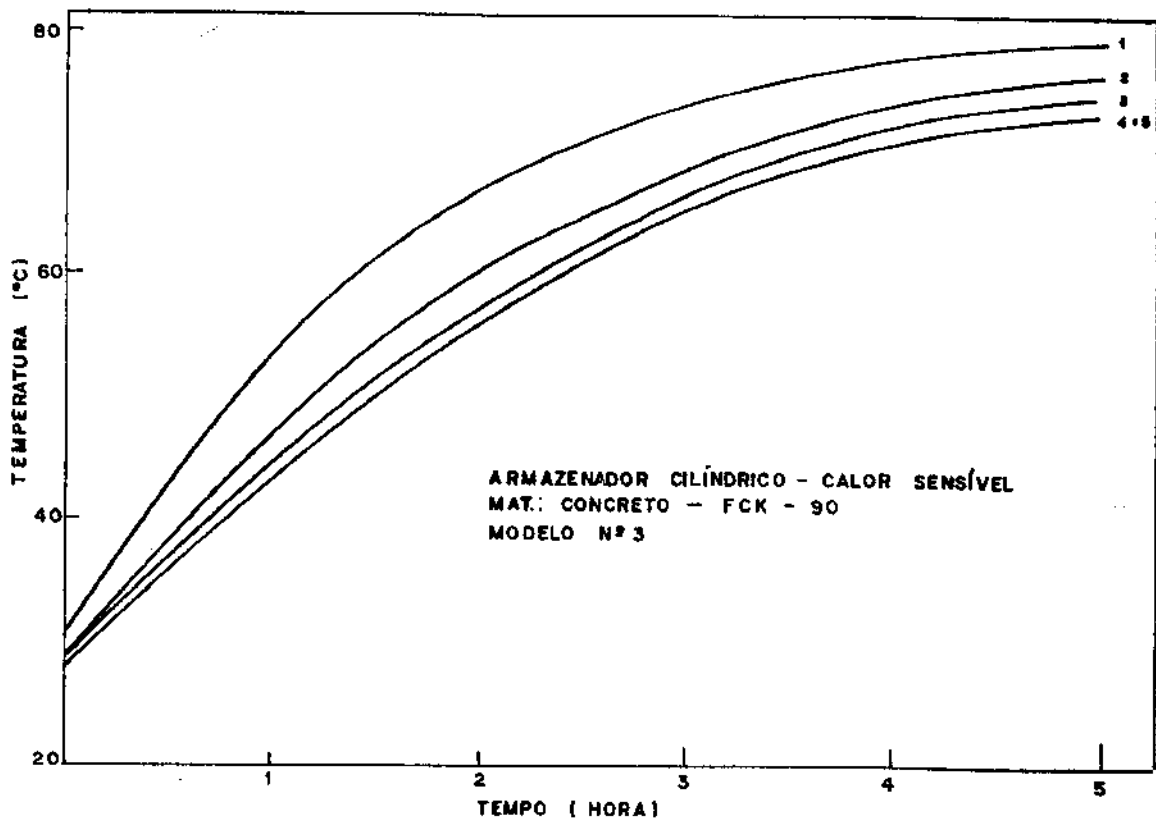


Figura 54 - Temperatura do Material na Superfície (Ensaio nº 6)

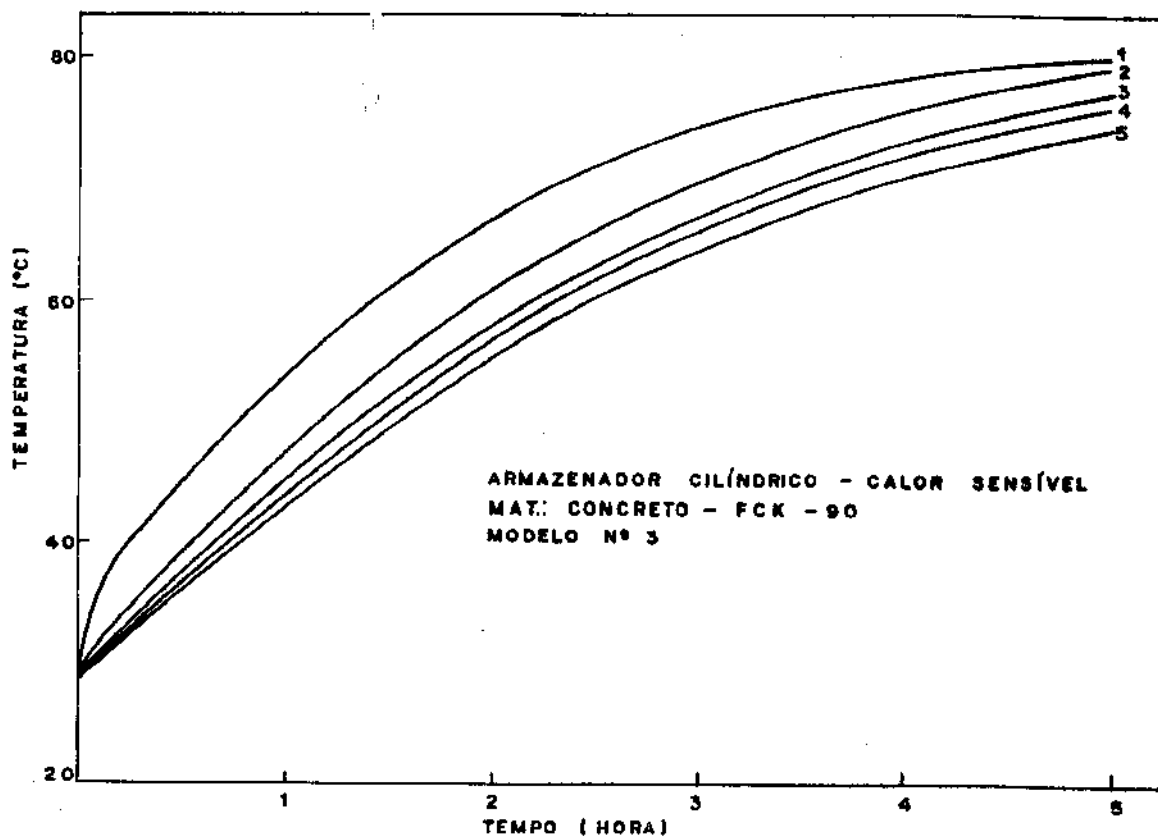


Figura 55 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 6)

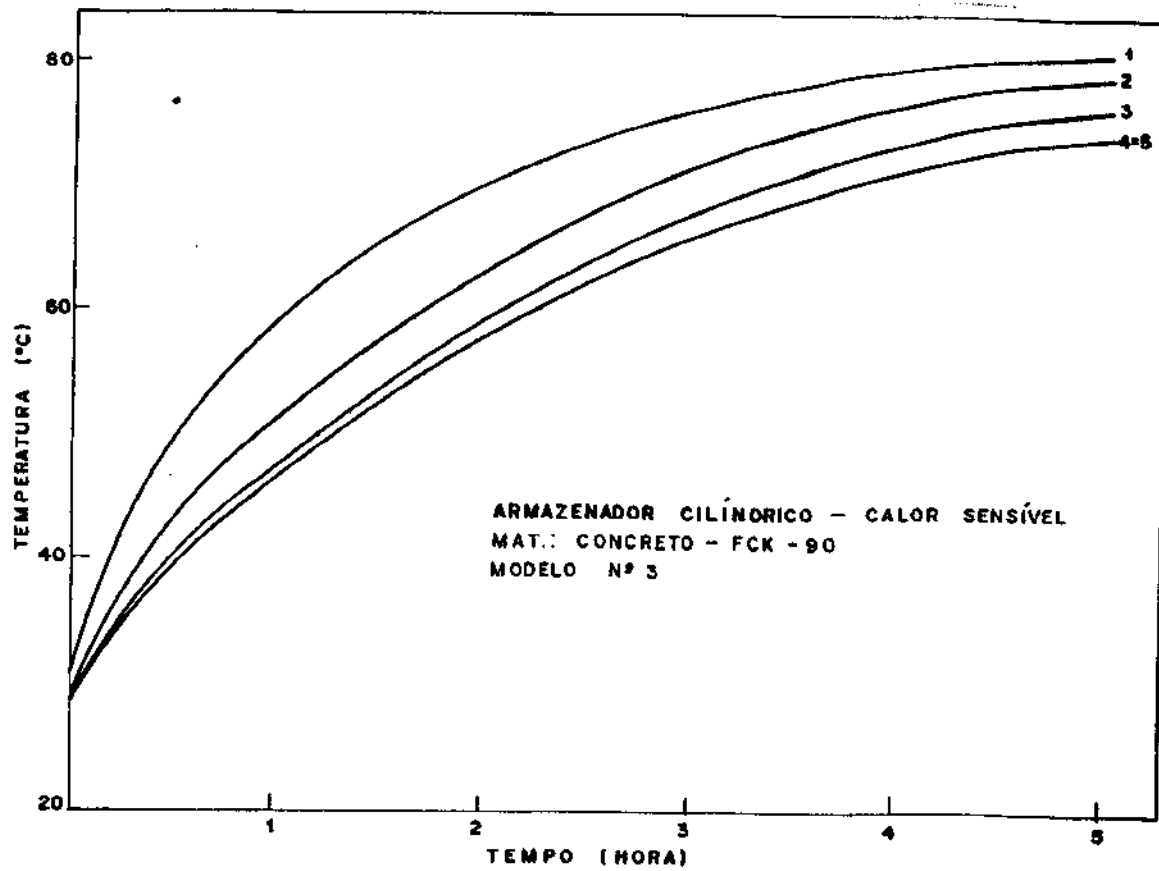


Figura 56 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 6)

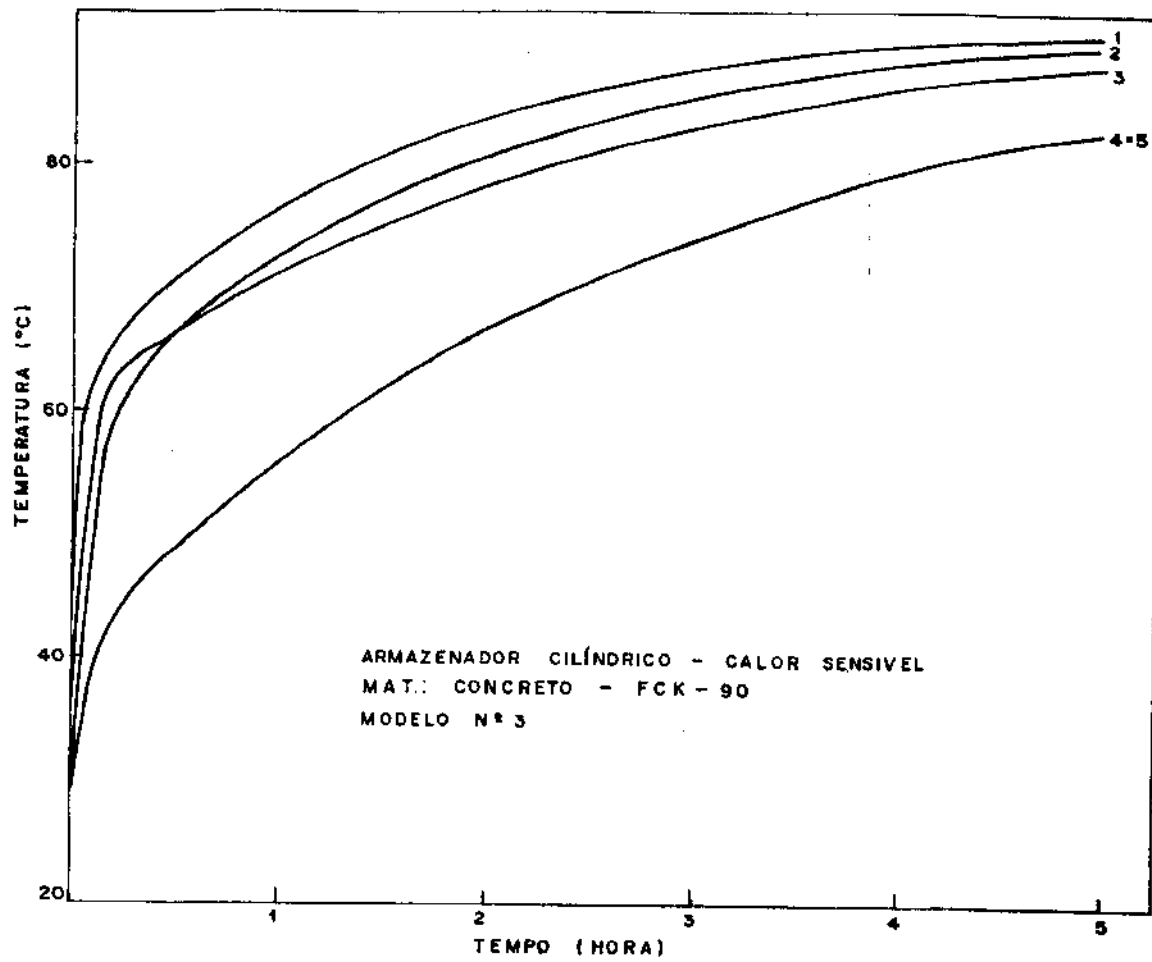


Figura 57 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 6)

c) Ensaio de Carregamento do Modelo nº 4

c.1) Dados e Resultados do Ensaio nº 7

$$\bar{t}_f = 70,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 28,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 28,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 23,53 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

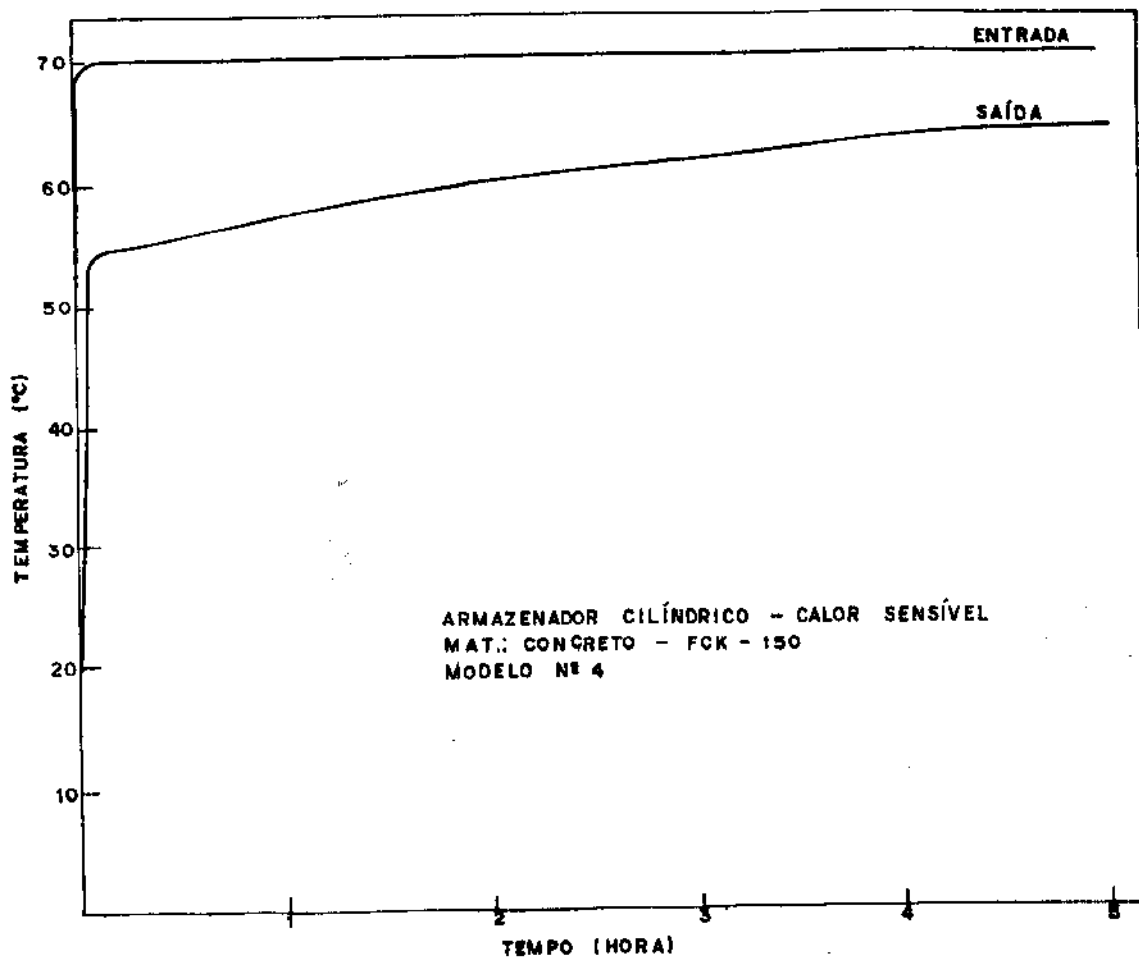


Figura 58 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 7)

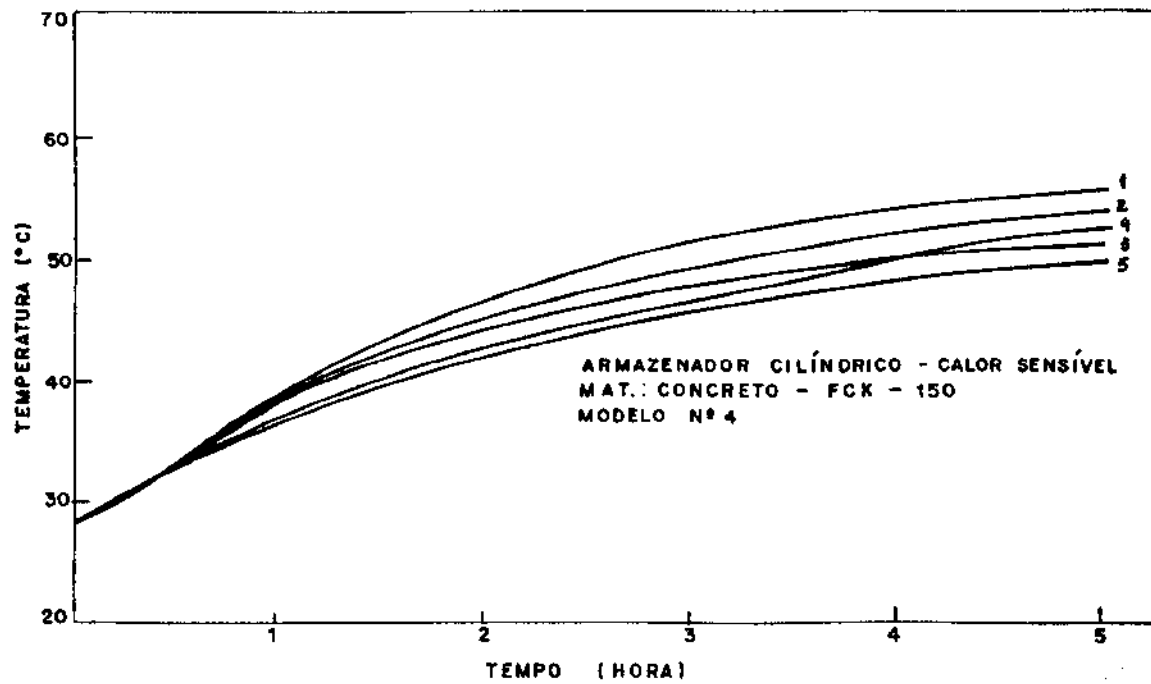


Figura 59 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 7)

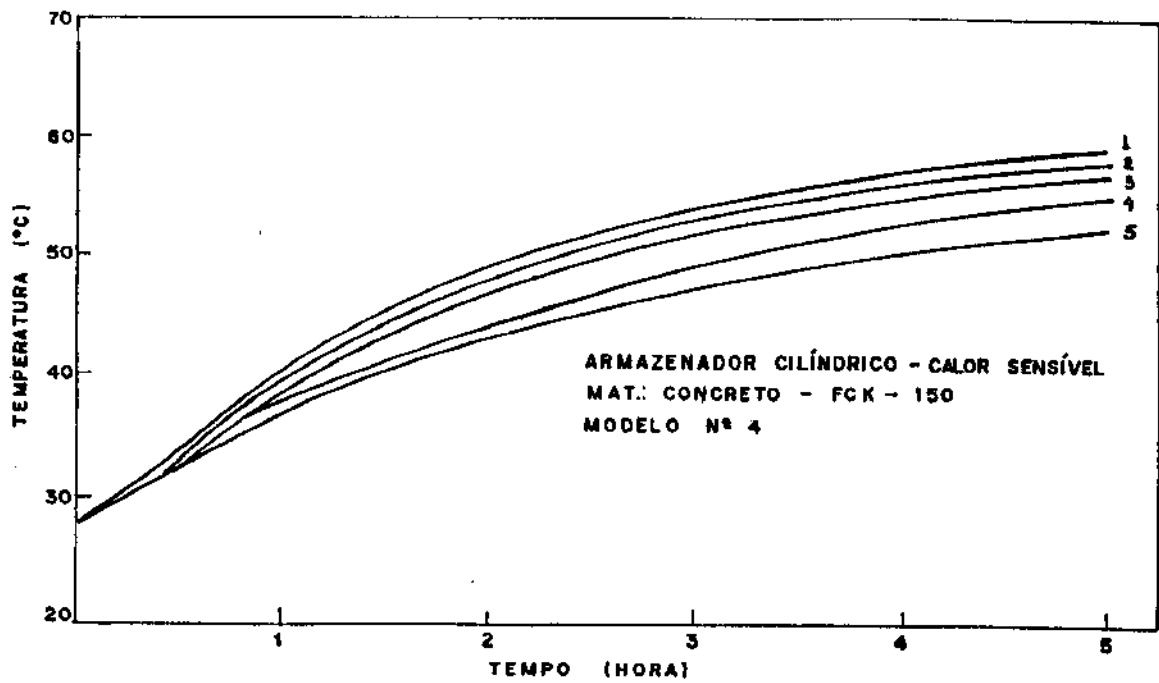


Figura 60 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície
(Ensaio nº 7)

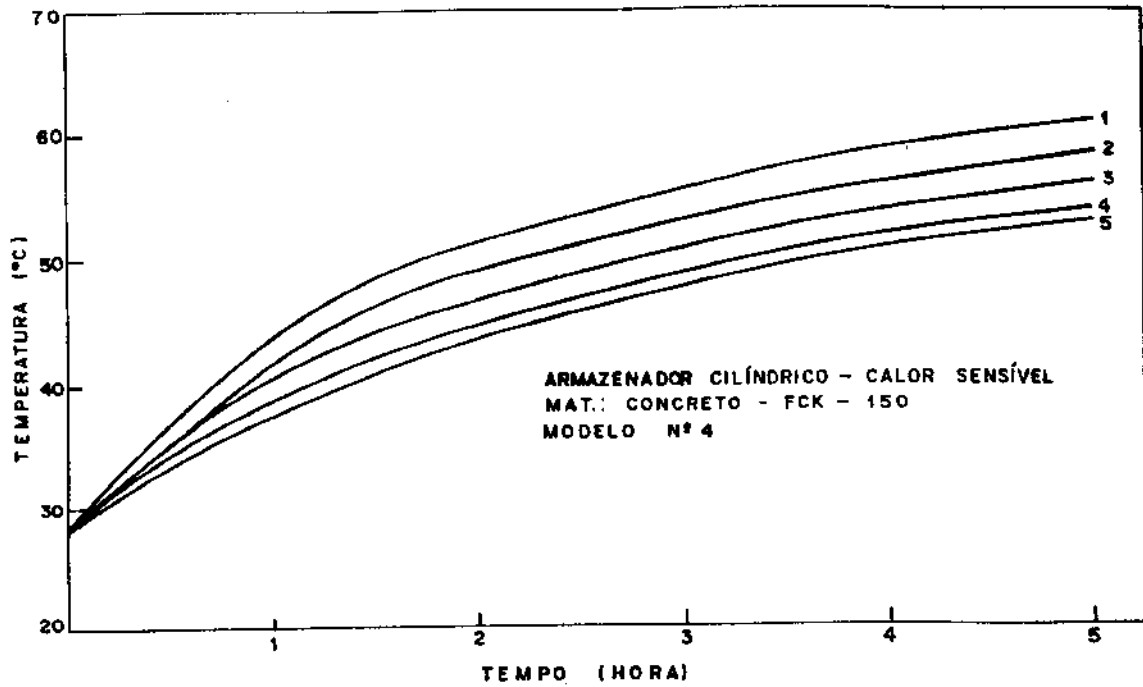


Figura 61 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 7)

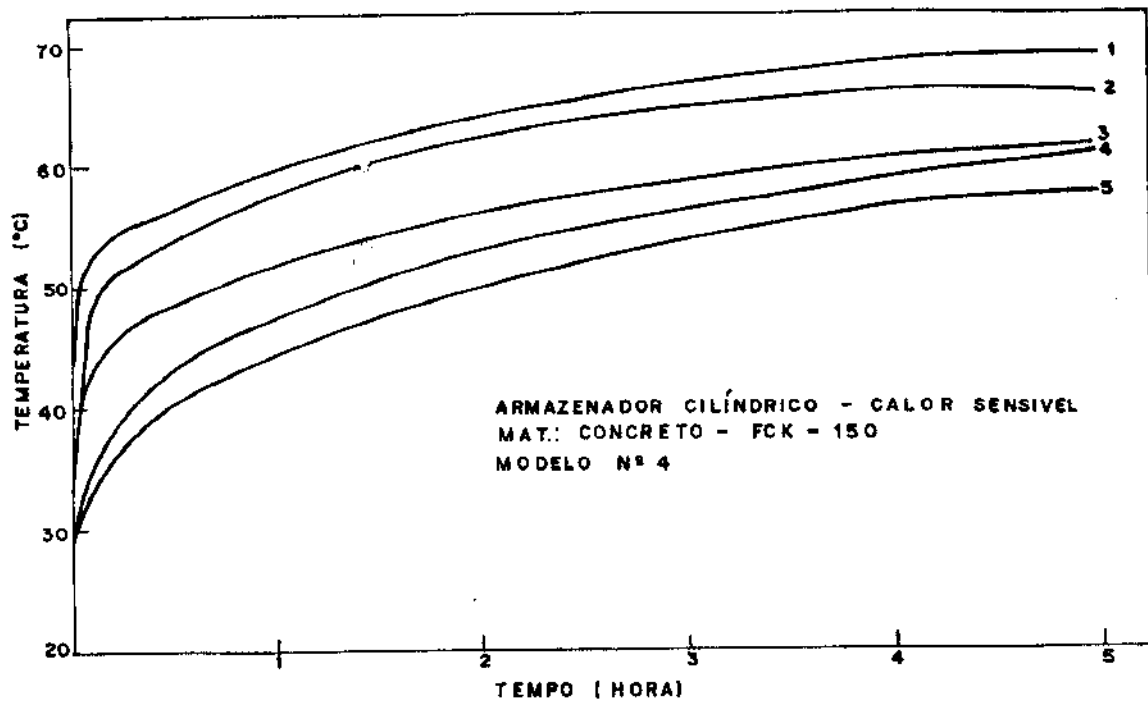


Figura 62 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 7)

c.2) Dados e Resultados do Ensaio nº 8

$$\bar{t}_f = 80,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 26,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 27,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 24,32 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

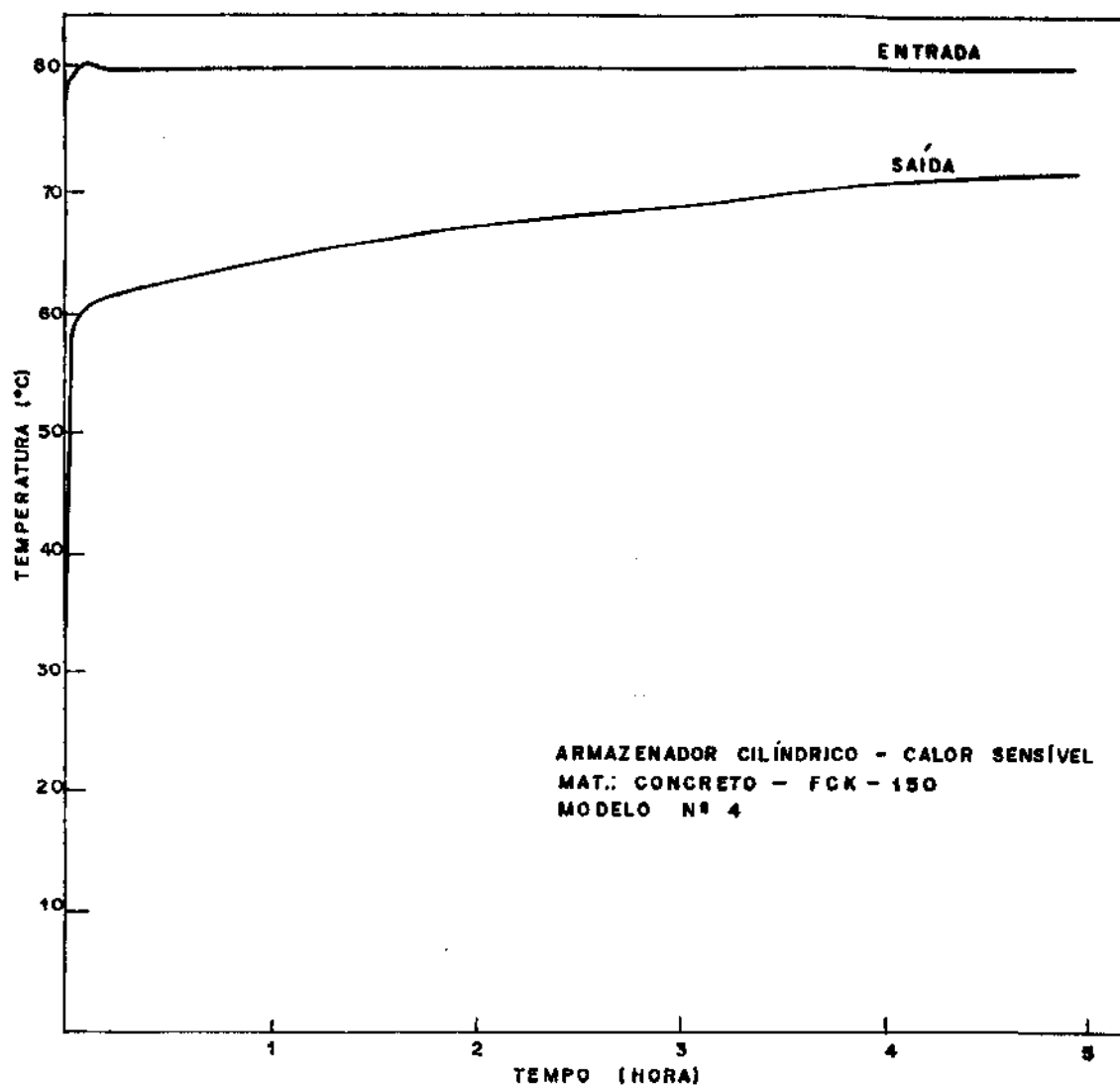


Figura 63 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 8)

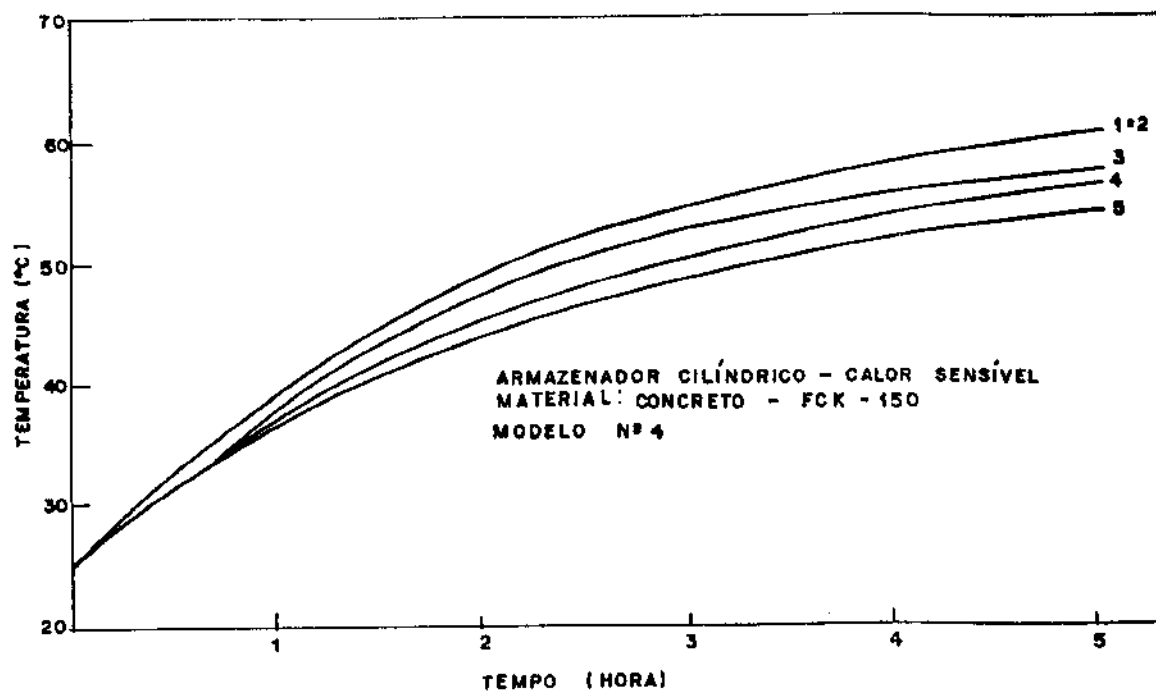


Figura 64 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 8)

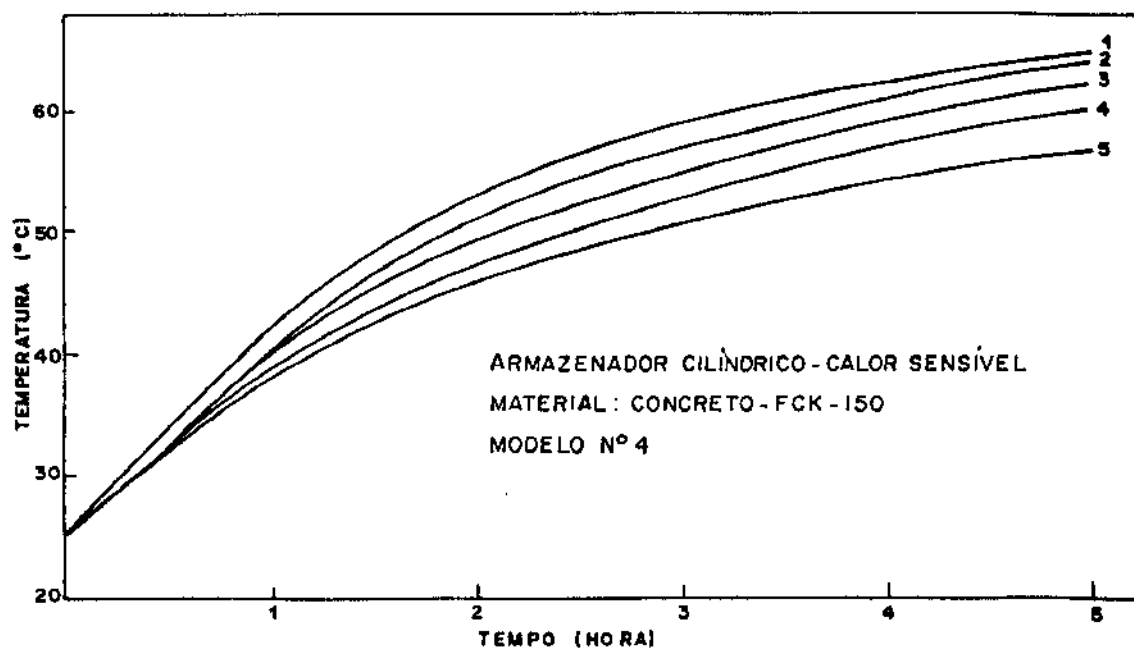


Figura 65 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 8)

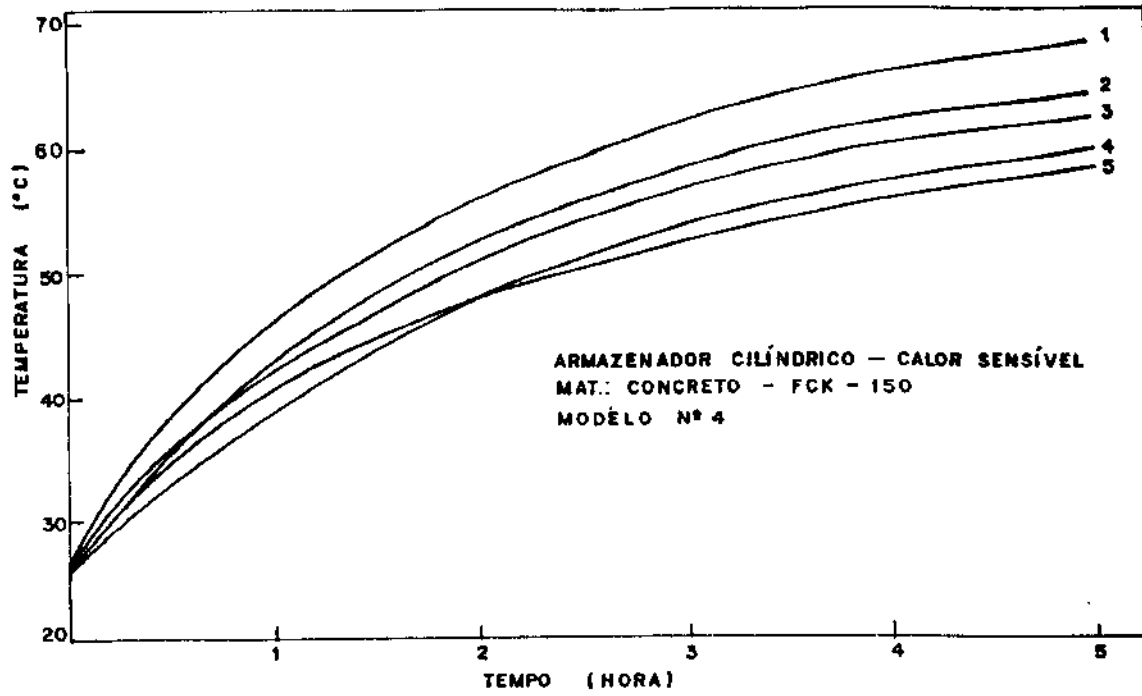


Figura 66 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 8)

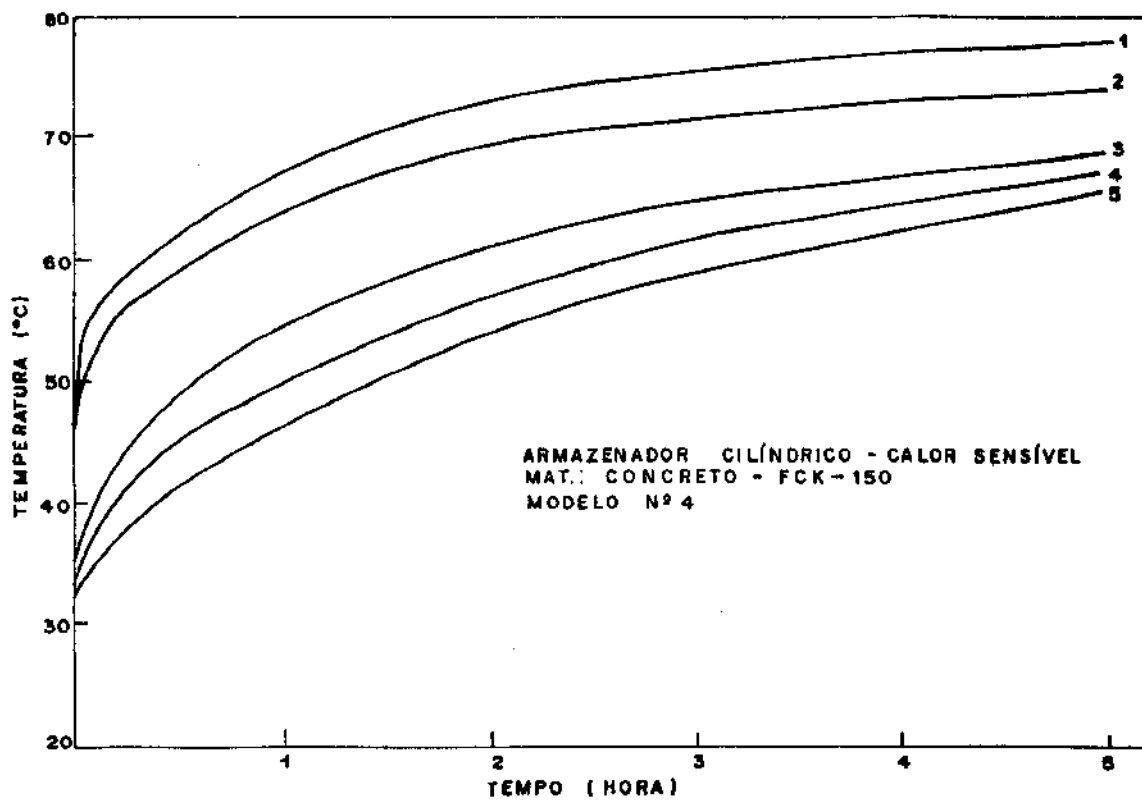


Figura 67 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 8)

c.3) Dados e Resultados do Ensaio nº 9

$$\bar{t}_f = 90,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 27,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

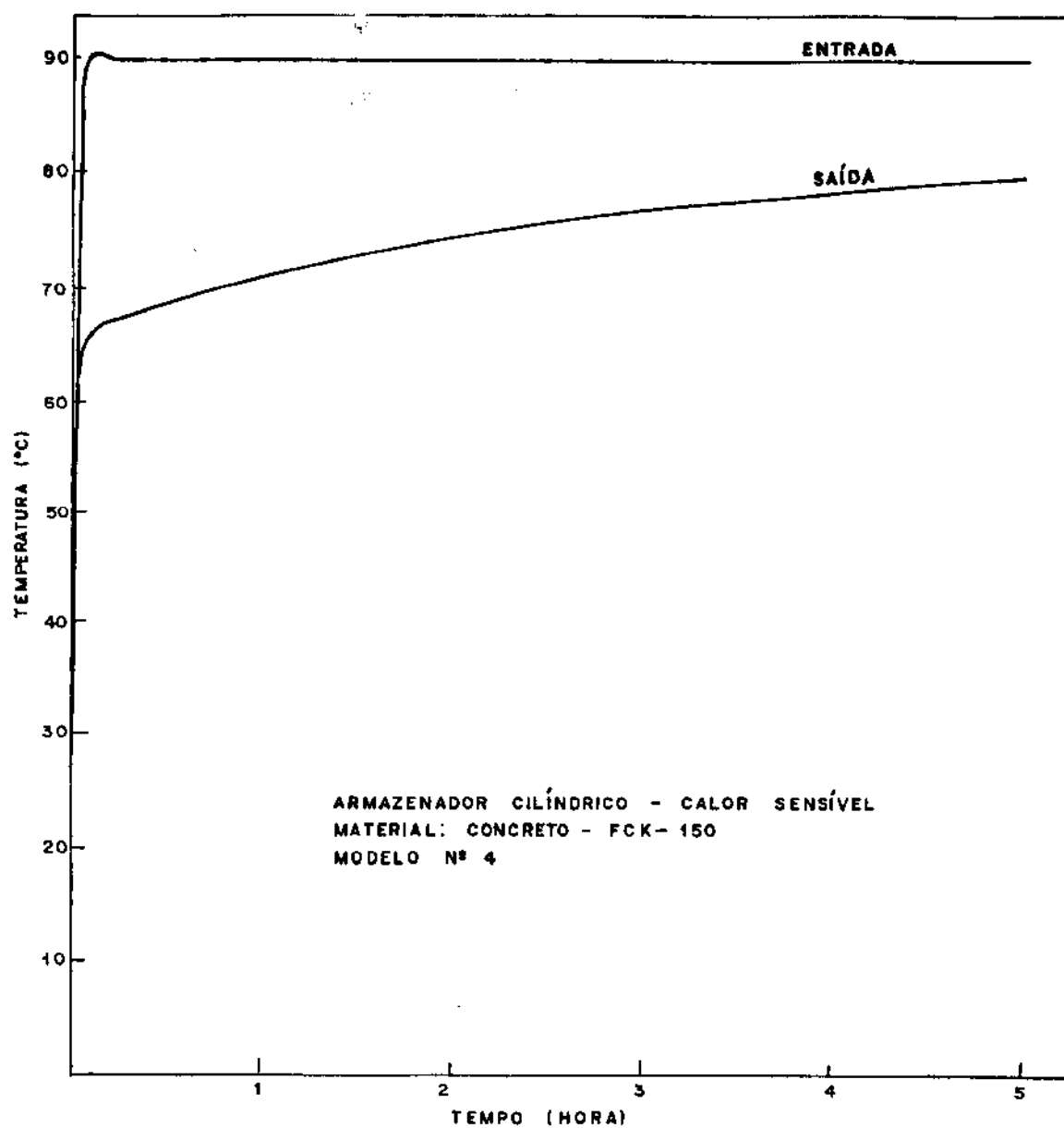


Figura 68 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 9)

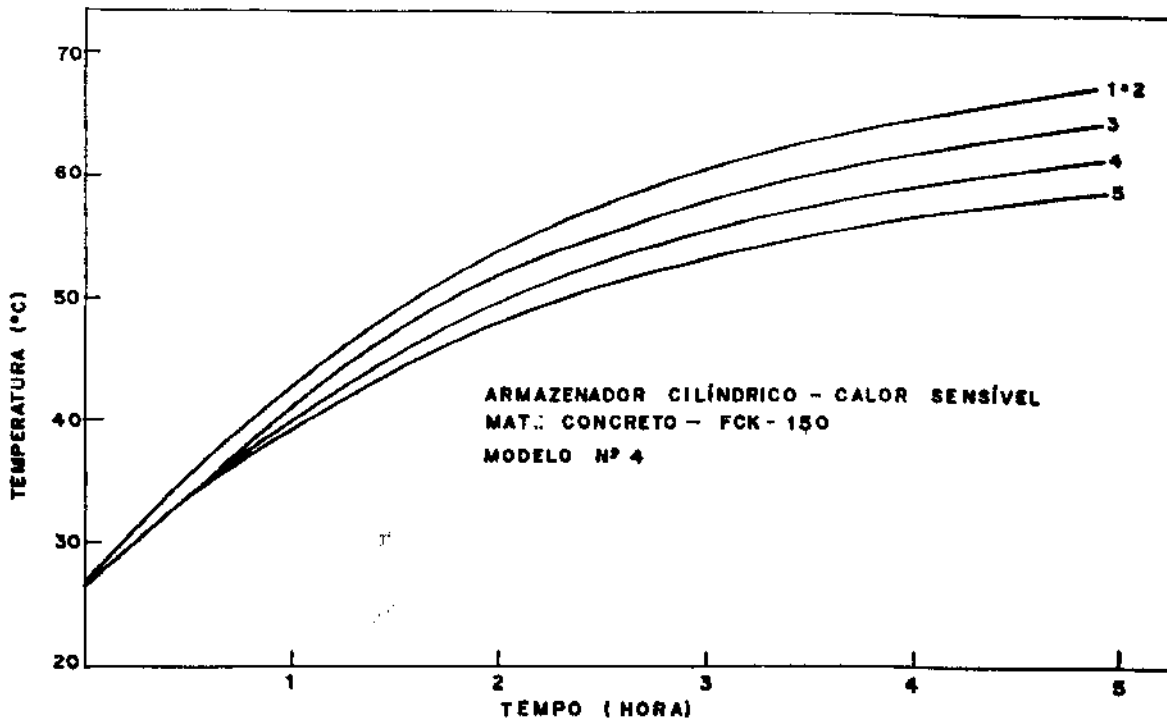


Figura 69 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 9)

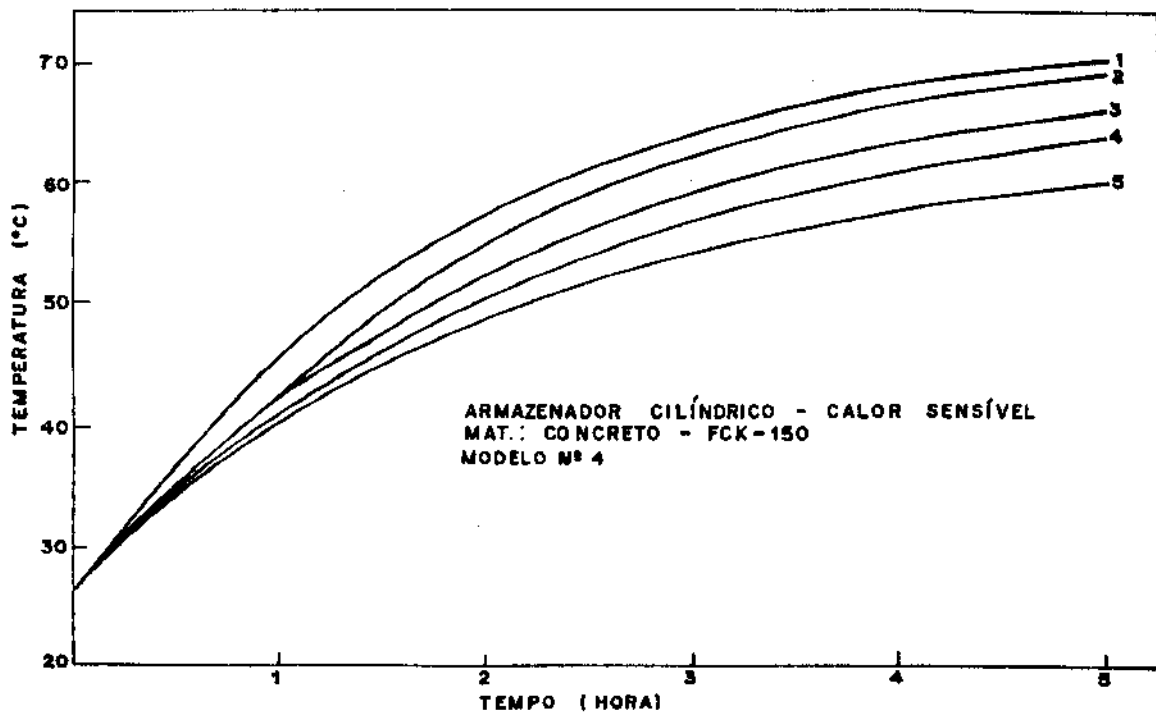


Figura 70 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 9)

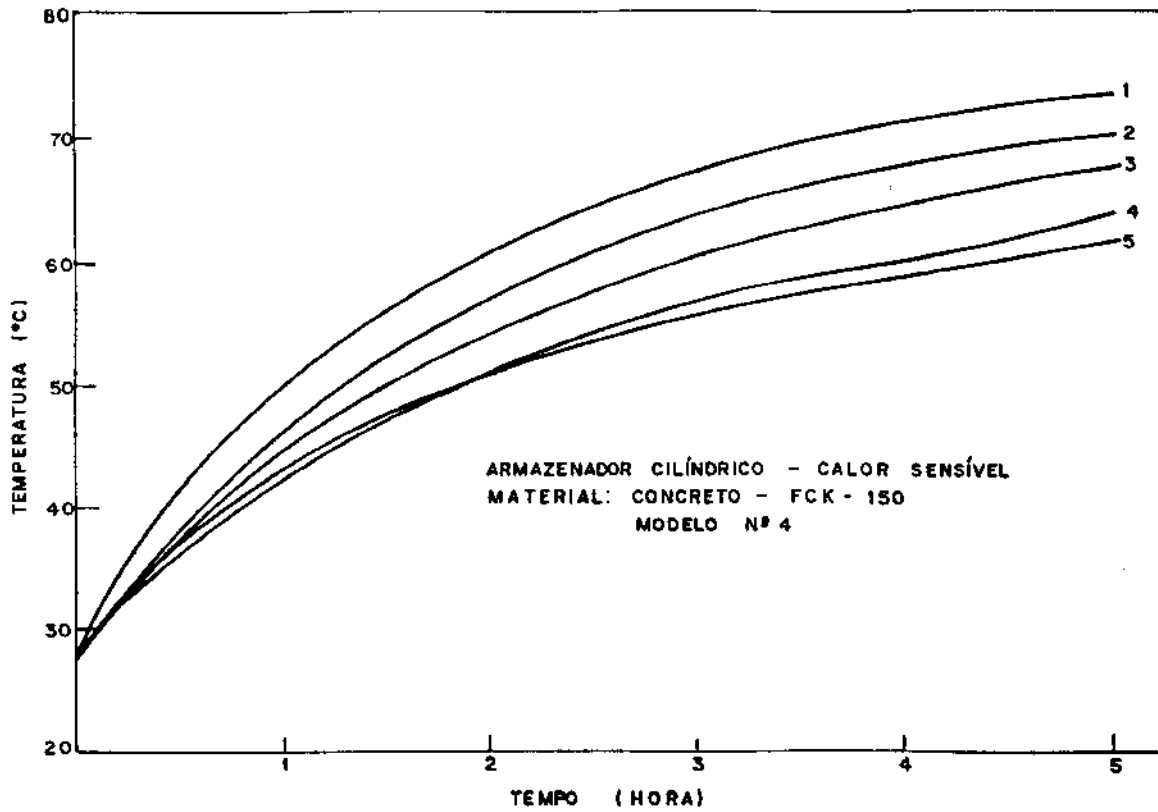


Figura 71 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 9)

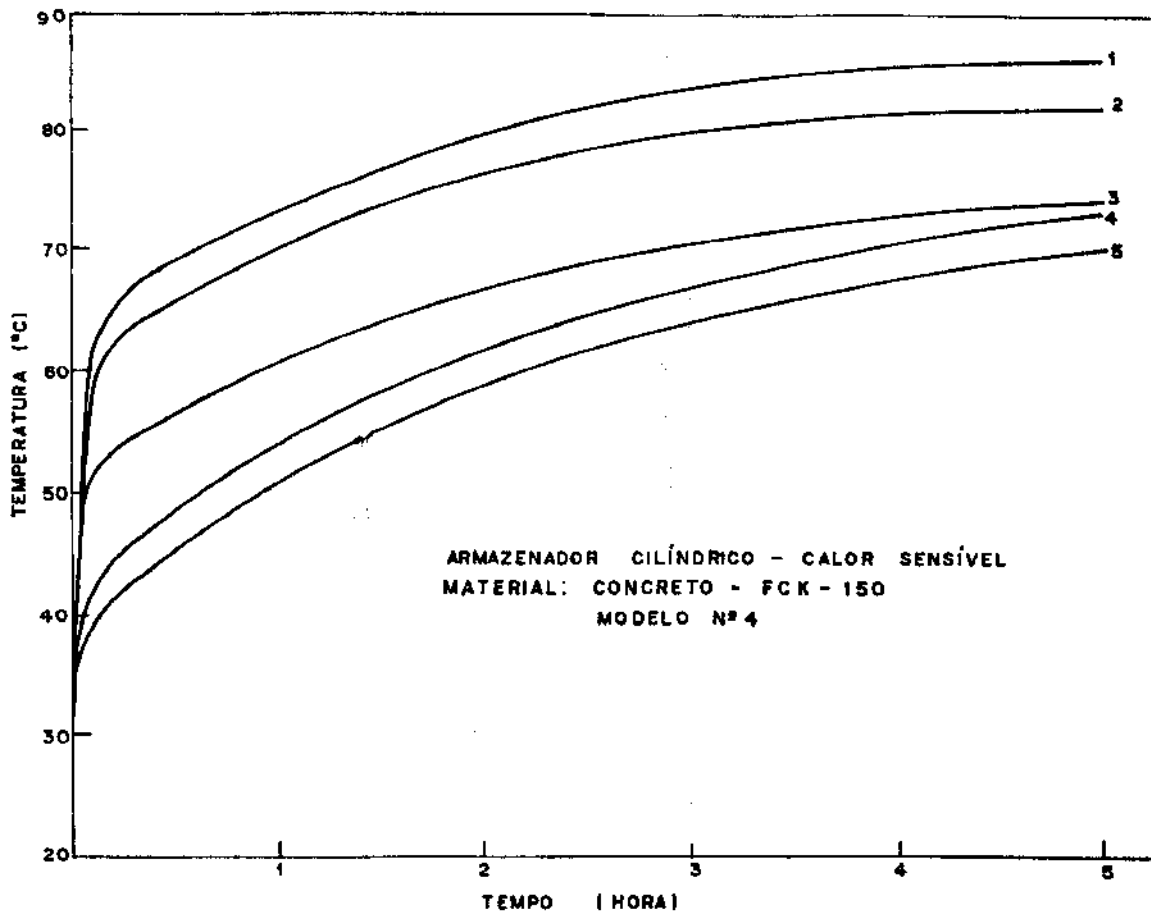


Figura 72 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 9)

c.4) Dados e Resultados do Ensaio nº 10

$$\bar{t}_f = 100,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 27,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 24,39 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

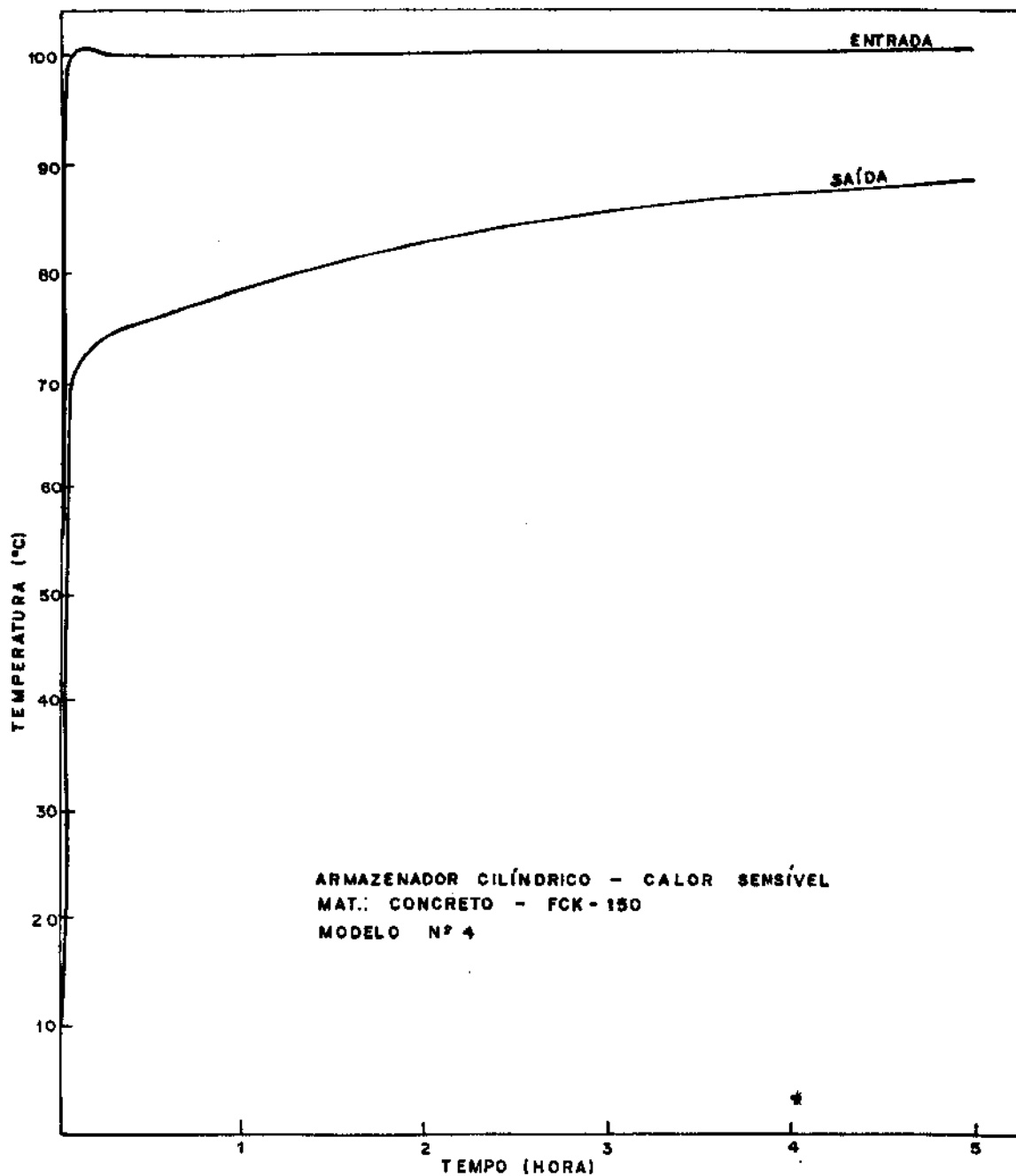


Figura 73 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 10)

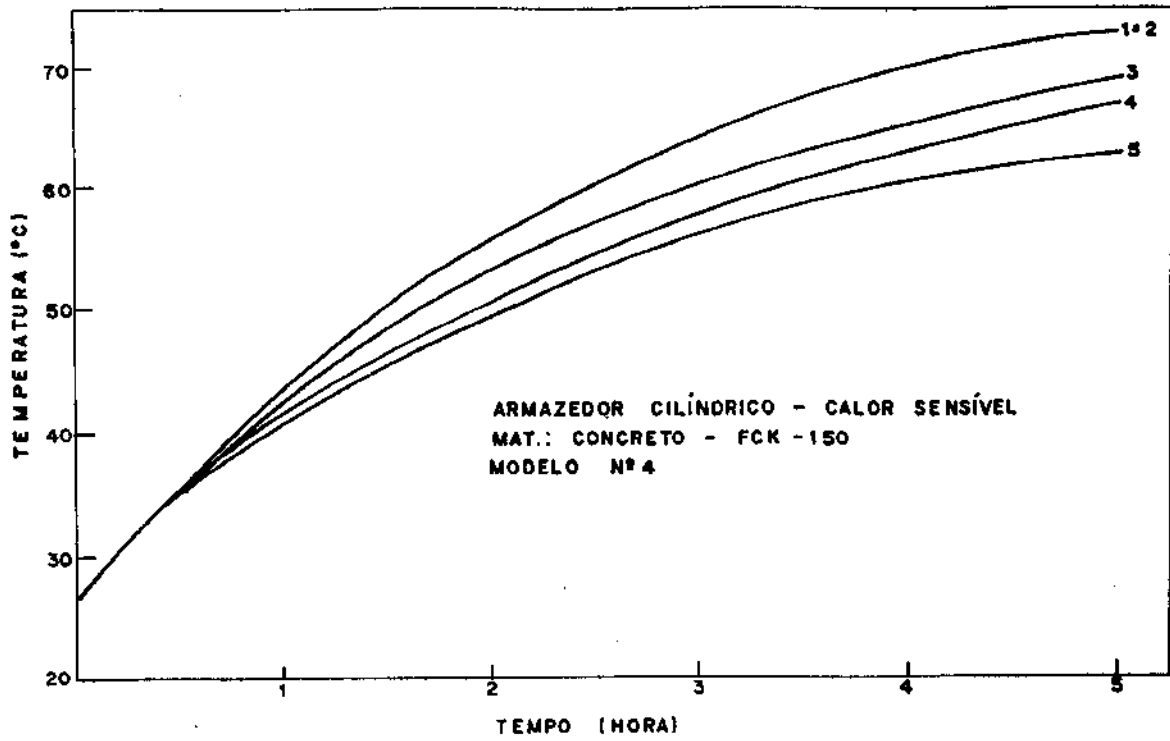


Figura 74 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 10)

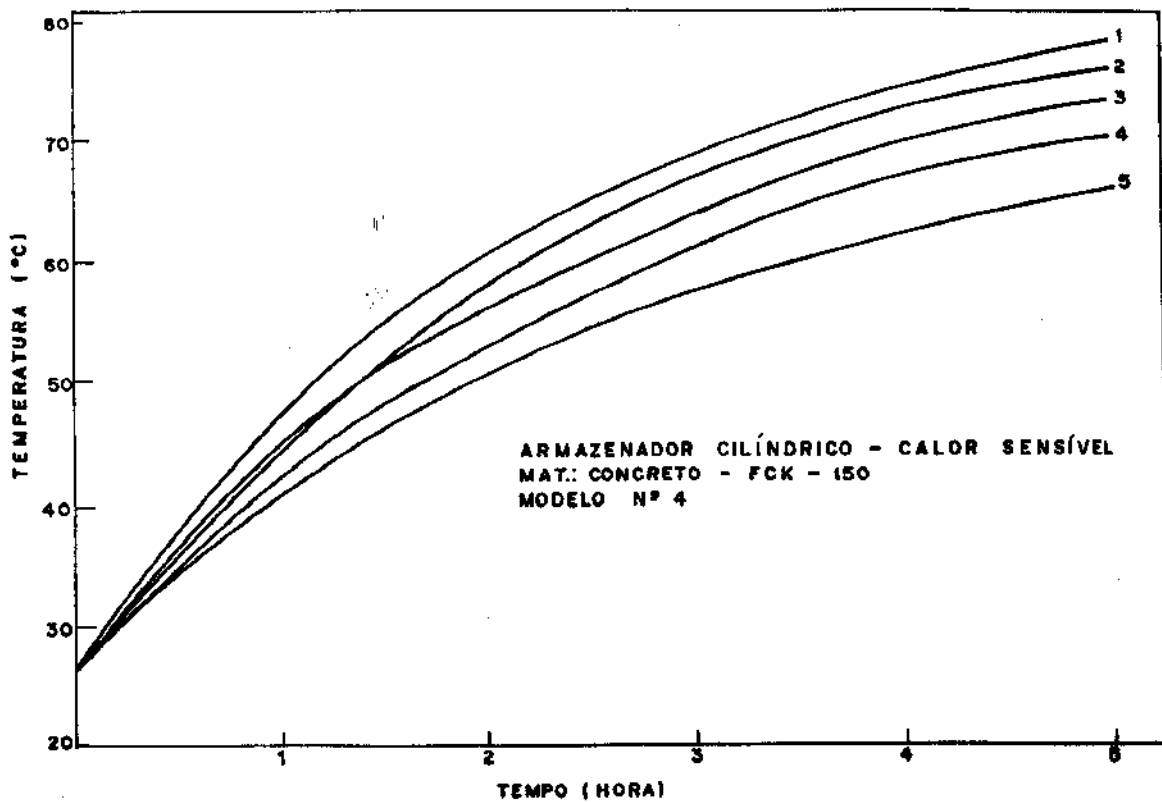


Figura 75 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 10)

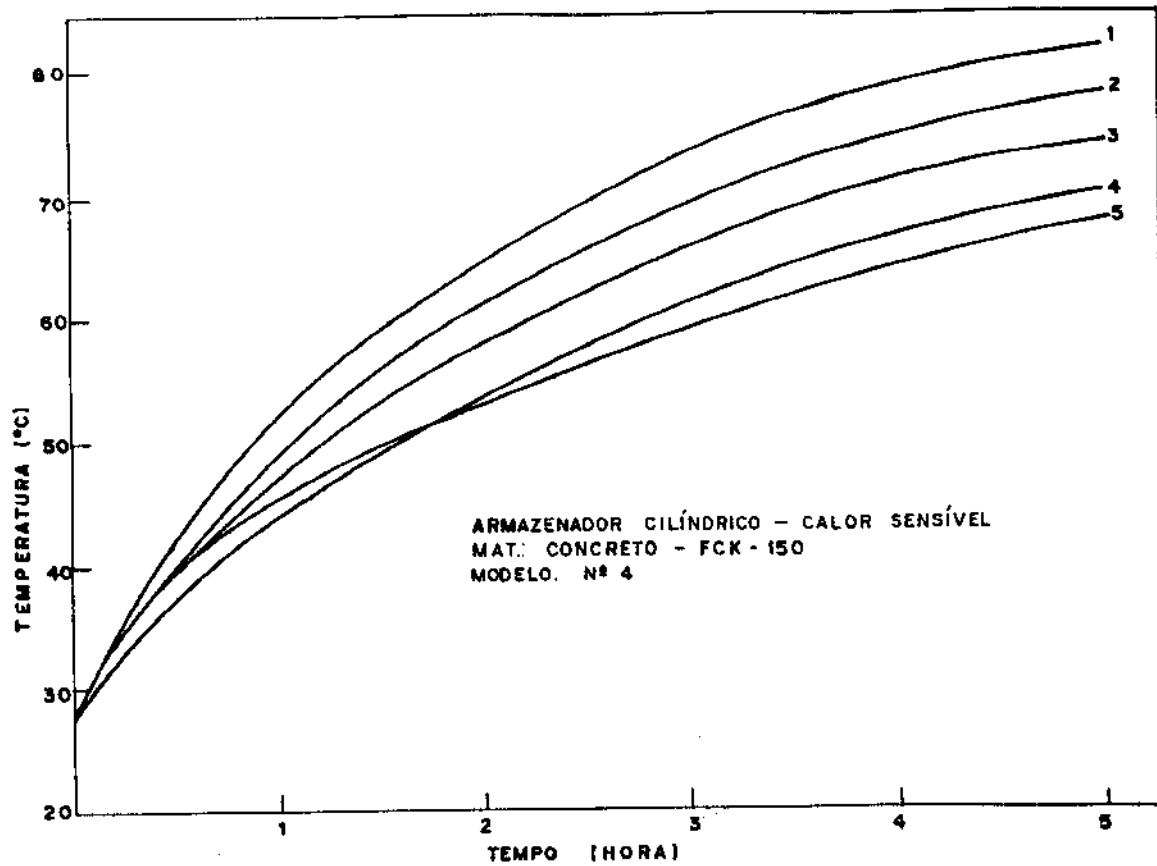


Figura 76 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 10)

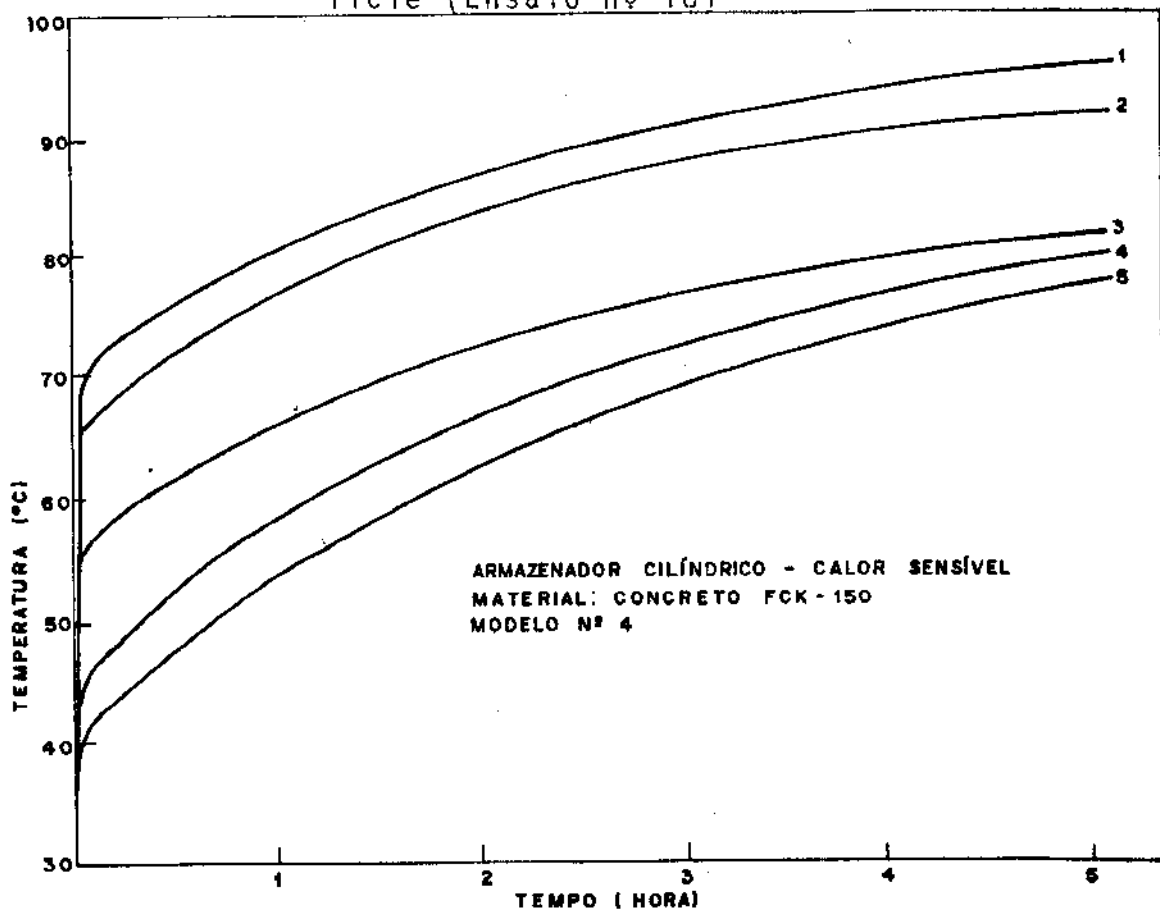


Figura 77 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 10)

d) Ensaio de Carregamento do Modelo nº 5

d.1) Dados e Resultados do Ensaio nº 11

$$\bar{T}_f = 100,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{T}_o = 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{T}_a = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0071 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 22,67 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

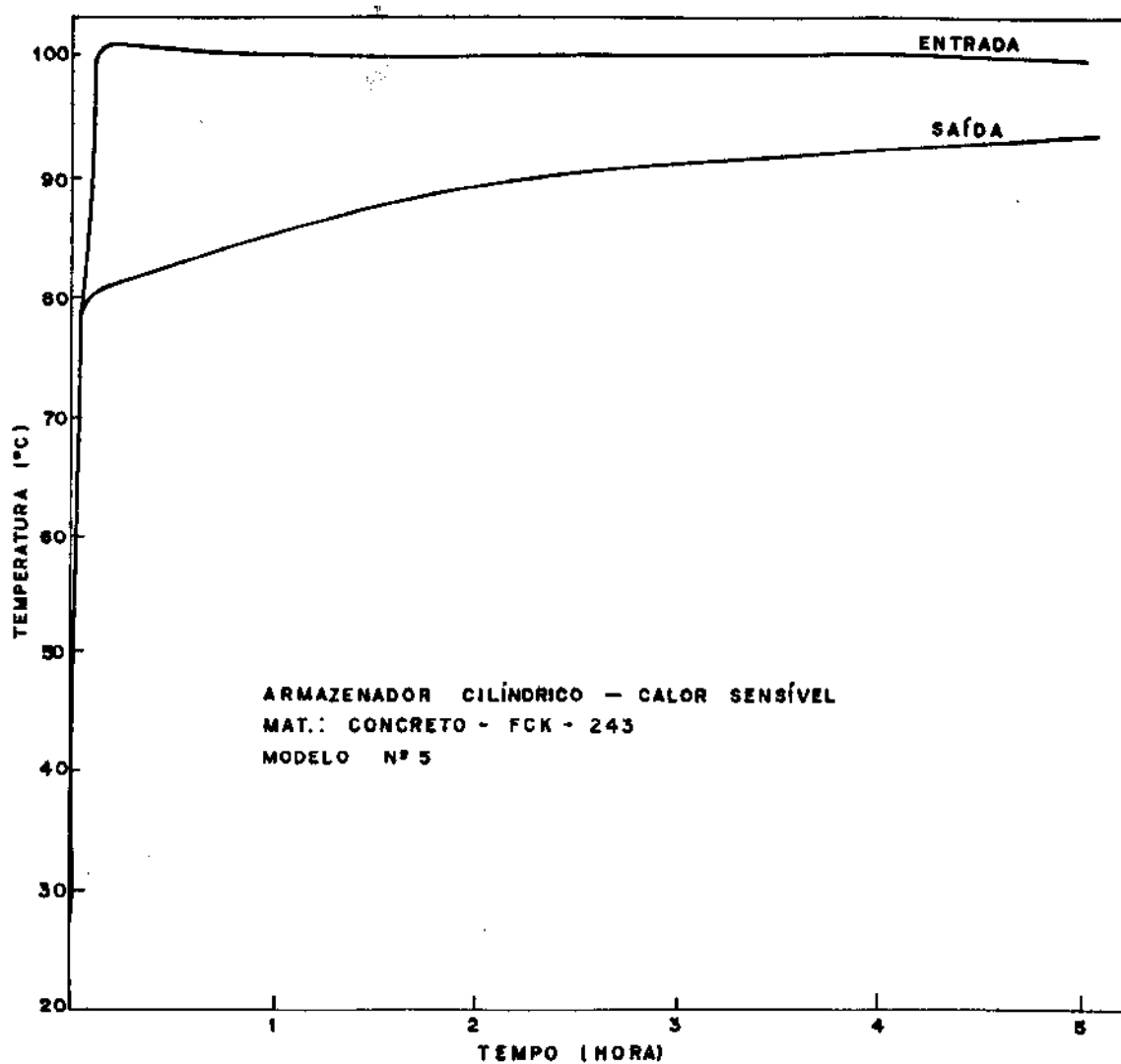


Figura 78 - Temperatura de Entrada e Saída do Fluido
(Ensaio nº 11)

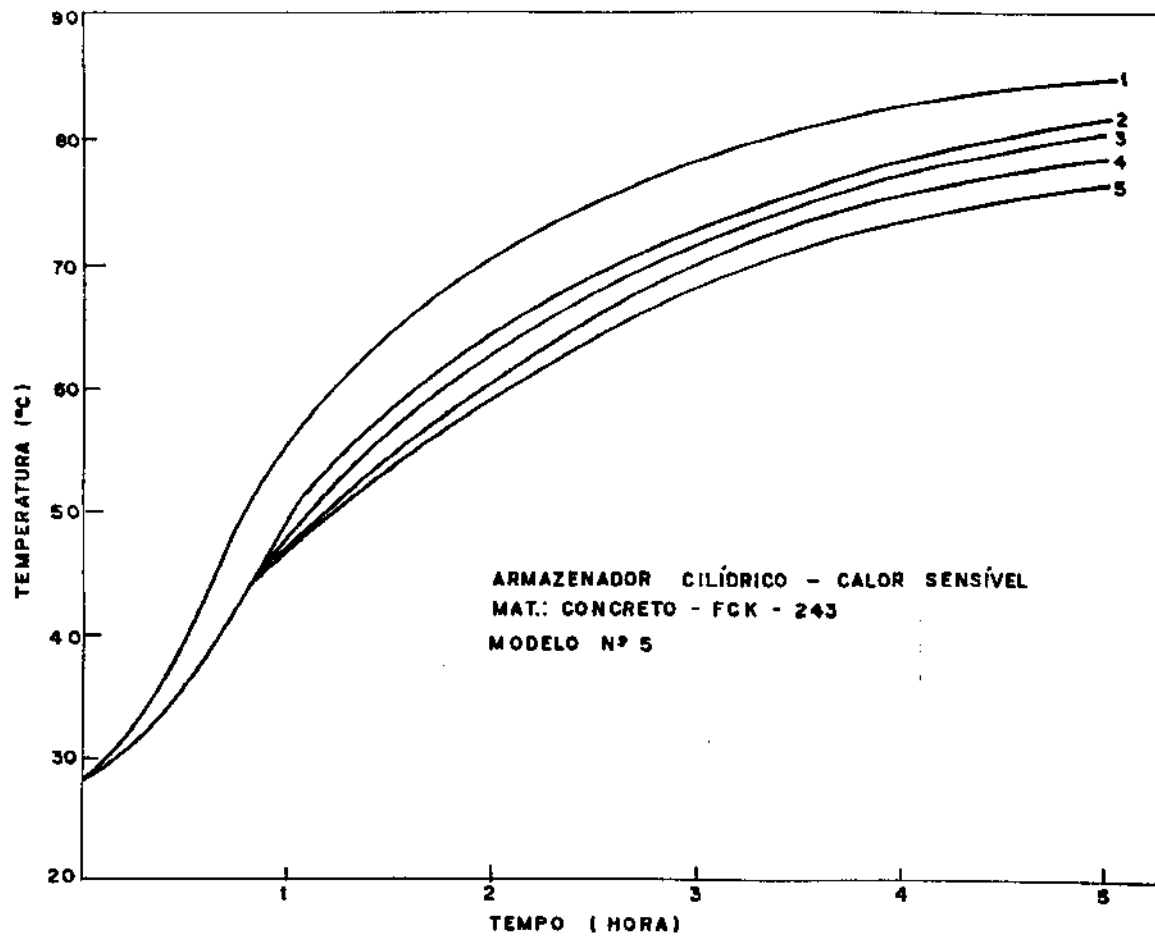


Figura 79 - Temperatura do Material na Superfície
(Ensaio nº 11)

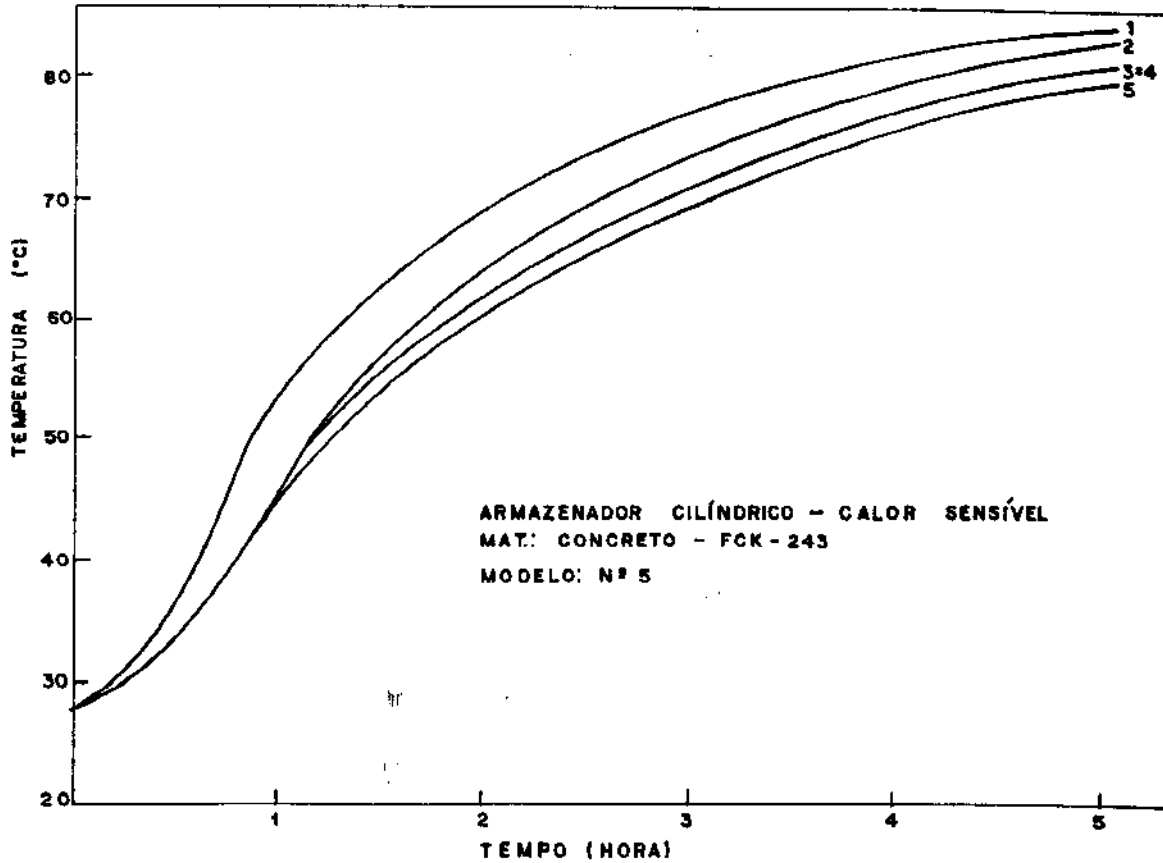


Figura 80 - Temperatura do Material a 20 mm da Superfície (Ensaio nº 11)

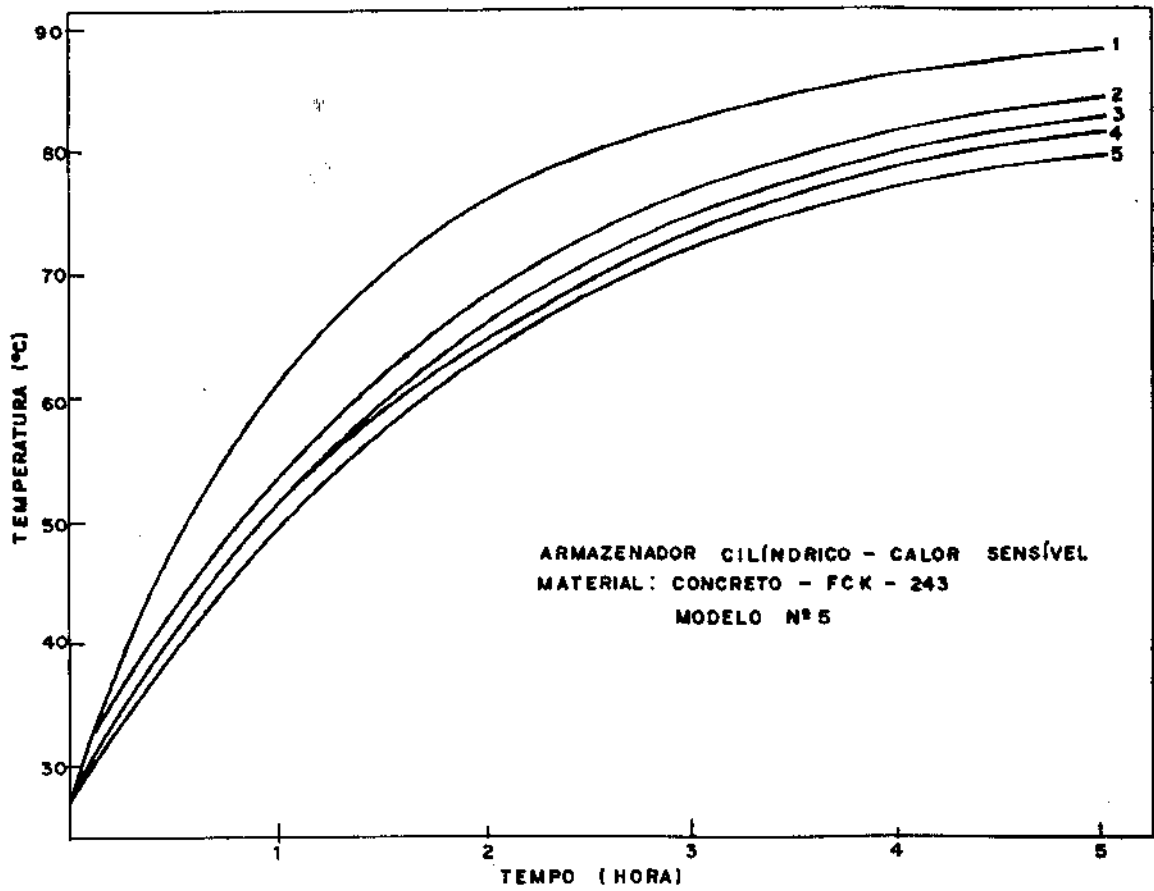


Figura 81 - Temperatura do Material a 40 mm da Superfície (Ensaio nº 11)

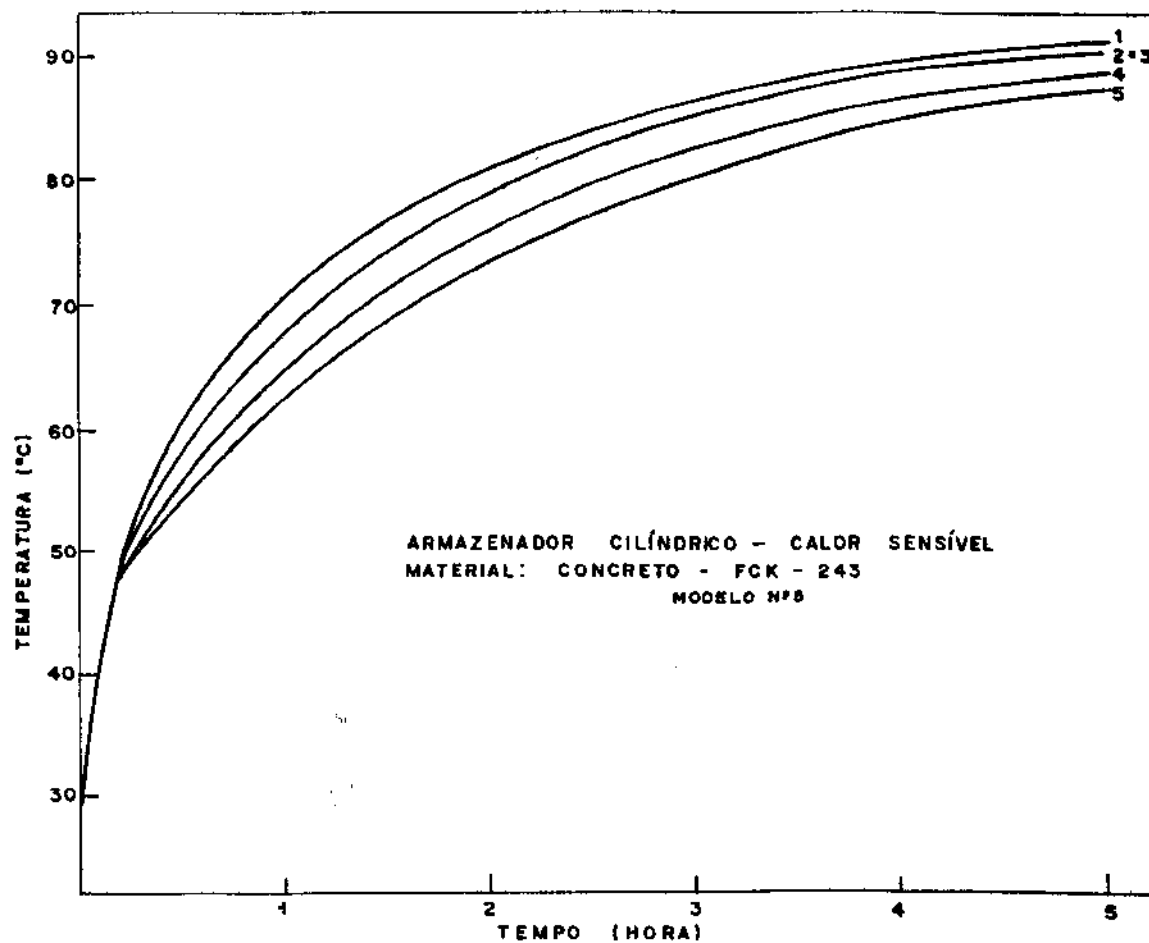


Figura 82 - Temperatura do Material a 60 mm da Superfície (Ensaio nº 11)

6.4. RESULTADOS DO MODELO TEÓRICO

a) Resultados para o Modelo nº 1

Dados relativos ao ensaio nº 1

$$\bar{t}_f = 98,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 22,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 23,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0672 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 66,52 \text{ w/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

NO INSTANTE= 0.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	Tf	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.99340	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.98665	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4	0.98034	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.97367	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6	0.96745	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
7	0.96106	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.95472	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.94843	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.94217	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11	0.93595	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

NO INSTANTE= 240.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	IF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.43958	0.43734	0.43548	0.43395	0.43271	0.43173	0.43100	0.43050	0.43021	0.43011	0.43021
2	1.00000	0.43958	0.43734	0.43548	0.43395	0.43271	0.43173	0.43100	0.43050	0.43021	0.43011	0.43021
3	0.99999	0.43958	0.43734	0.43548	0.43395	0.43271	0.43173	0.43100	0.43050	0.43021	0.43011	0.43021
4	0.99999	0.43958	0.43735	0.43548	0.43395	0.43271	0.43174	0.43101	0.43050	0.43021	0.43012	0.43021
5	0.99999	0.43958	0.43735	0.43549	0.43395	0.43271	0.43174	0.43101	0.43050	0.43021	0.43012	0.43021
6	0.99999	0.43958	0.43735	0.43549	0.43395	0.43271	0.43174	0.43101	0.43051	0.43022	0.43012	0.43022
7	0.99998	0.43959	0.43735	0.43549	0.43396	0.43272	0.43174	0.43101	0.43051	0.43022	0.43012	0.43022
8	0.99998	0.43959	0.43736	0.43549	0.43396	0.43272	0.43175	0.43102	0.43051	0.43022	0.43013	0.43022
9	0.99998	0.43959	0.43736	0.43550	0.43396	0.43272	0.43175	0.43102	0.43051	0.43022	0.43013	0.43022
10	0.99998	0.43960	0.43736	0.43550	0.43397	0.43273	0.43175	0.43102	0.43052	0.43023	0.43013	0.43023
11	0.99997	0.43959	0.43736	0.43550	0.43396	0.43272	0.43175	0.43102	0.43052	0.43022	0.43013	0.43022

NO INSTANTE= 480.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	IF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.69951	0.69822	0.69714	0.69626	0.69554	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69410
2	1.00000	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69554	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69410
3	1.00000	0.69951	0.69822	0.69714	0.69626	0.69554	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69410
4	1.00000	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69554	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69411
5	0.99999	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69555	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69411
6	0.99999	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69555	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69411
7	0.99999	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69554	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69410
8	0.99999	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69555	0.69498	0.69456	0.69427	0.69410	0.69405	0.69411
9	0.99999	0.69952	0.69823	0.69715	0.69627	0.69555	0.69499	0.69457	0.69428	0.69411	0.69406	0.69411
10	0.99999	0.69952	0.69823	0.69715	0.69627	0.69555	0.69499	0.69457	0.69428	0.69411	0.69406	0.69411
11	0.99998	0.69951	0.69822	0.69715	0.69626	0.69555	0.69499	0.69457	0.69428	0.69411	0.69405	0.69411

NO INSTANTE= 720.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	IF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
2	1.00000	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
3	1.00000	0.84509	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
4	1.00000	0.84509	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
5	1.00000	0.84509	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
6	1.00000	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
7	1.00000	0.84509	0.84439	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
8	0.99999	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
9	0.99999	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84294	0.84264	0.84241	0.84225	0.84216	0.84213	0.84216
10	0.99999	0.84510	0.84440	0.84382	0.84334	0.84295	0.84264	0.84241	0.84226	0.84216	0.84214	0.84217
11	0.99999	0.84510	0.84440	0.84381	0.84333	0.84295	0.84264	0.84241	0.84226	0.84216	0.84213	0.84216

NO INSTANTE= 960.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	IF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.92226	0.92190	0.92160	0.92135	0.92115	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92073	0.92074
2	1.00000	0.92226	0.92190	0.92160	0.92135	0.92115	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92073	0.92074
3	1.00000	0.92226	0.92190	0.92159	0.92135	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92073	0.92074
4	1.00000	0.92226	0.92190	0.92159	0.92135	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92073	0.92074
5	1.00000	0.92226	0.92189	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074
6	1.00000	0.92226	0.92189	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074
7	1.00000	0.92226	0.92189	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074
8	1.00000	0.92226	0.92190	0.92159	0.92135	0.92115	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92073	0.92074
9	1.00000	0.92226	0.92189	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074
10	1.00000	0.92226	0.92190	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074
11	1.00000	0.92226	0.92189	0.92159	0.92134	0.92114	0.92099	0.92087	0.92079	0.92074	0.92072	0.92074

NO INSTANTE= 1200.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	If	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
2	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
3	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
4	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
5	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
6	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
7	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
8	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
9	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
10	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084
11	1.00000	0.96160	0.96142	0.96127	0.96114	0.96104	0.96096	0.96090	0.96086	0.96084	0.96083	0.96084

NO INSTANTE= 1440.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
2	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
3	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
4	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
5	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
6	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
7	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
8	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
9	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
10	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083
11	1.00000	0.98121	0.98112	0.98104	0.98098	0.98093	0.98089	0.98086	0.98084	0.98083	0.98083	0.98083

b) Resultados para o Modelo nº 2

Dados relativos ao ensaio nº 3

w

$$\bar{t}_f = 115,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_o = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_a = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_f = 0,0588 \text{ Kg/s}$$

$$\bar{h}_c = 70,68 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

VC INSTANTE= 0.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	IT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.99246	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.98493	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4	0.97739	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.97014	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
6	0.96267	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
7	0.95561	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.94640	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.94125	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.93416	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11	0.92711	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

NO INSTANTE= 240.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19087	0.18647	0.18351	0.18132	0.18130	0.18184
2	1.00000	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19087	0.18647	0.18351	0.18133	0.18130	0.18184
3	0.99999	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19087	0.18647	0.18351	0.18133	0.18130	0.18184
4	0.99999	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19087	0.18647	0.18351	0.18133	0.18130	0.18184
5	0.99999	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19087	0.18647	0.18351	0.18133	0.18131	0.18184
6	0.99998	0.24709	0.22904	0.21542	0.20496	0.19693	0.19088	0.18647	0.18351	0.18133	0.18131	0.18185
7	0.99998	0.24709	0.22905	0.21542	0.20497	0.19694	0.19088	0.18648	0.18351	0.18133	0.18131	0.18185
8	0.99998	0.24710	0.22905	0.21543	0.20497	0.19694	0.19088	0.18648	0.18352	0.18133	0.18131	0.18185
9	0.99997	0.24710	0.22905	0.21543	0.20497	0.19694	0.19088	0.18648	0.18352	0.18134	0.18131	0.18185
10	0.99997	0.24710	0.22905	0.21543	0.20497	0.19694	0.19088	0.18648	0.18352	0.18134	0.18131	0.18185
11	0.99997	0.24710	0.22905	0.21543	0.20497	0.19694	0.19088	0.18648	0.18352	0.18134	0.18131	0.18185

NO INSTANTE= 480.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.41136	0.39659	0.38563	0.37713	0.37060	0.36568	0.36210	0.35970	0.35833	0.35791	0.35835
2	1.00000	0.41136	0.39670	0.38563	0.37713	0.37061	0.36568	0.36210	0.35970	0.35833	0.35791	0.35835
3	0.99999	0.41136	0.39670	0.38563	0.37713	0.37061	0.36568	0.36210	0.35970	0.35833	0.35791	0.35835
4	0.99999	0.41136	0.39670	0.38563	0.37713	0.37061	0.36568	0.36211	0.35970	0.35834	0.35791	0.35835
5	0.99999	0.41136	0.39670	0.38563	0.37713	0.37061	0.36568	0.36211	0.35970	0.35833	0.35791	0.35835
6	0.99999	0.41136	0.39670	0.38563	0.37714	0.37061	0.36569	0.36211	0.35970	0.35834	0.35791	0.35835
7	0.99998	0.41136	0.39670	0.38563	0.37713	0.37061	0.36568	0.36211	0.35970	0.35834	0.35791	0.35835
8	0.99998	0.41137	0.39670	0.38564	0.37714	0.37061	0.36569	0.36211	0.35971	0.35834	0.35792	0.35836
9	0.99998	0.41136	0.39670	0.38564	0.37714	0.37061	0.36569	0.36211	0.35970	0.35834	0.35791	0.35835
10	0.99998	0.41137	0.39671	0.38564	0.37714	0.37062	0.36569	0.36211	0.35971	0.35834	0.35792	0.35836
11	0.99997	0.41137	0.39670	0.38564	0.37714	0.37061	0.36569	0.36211	0.35971	0.35834	0.35792	0.35836

VE INSTANTE= 720.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.54362	0.53135	0.52297	0.51614	0.51090	0.50695	0.50407	0.50214	0.50104	0.50070	0.50106
2	1.00000	0.54363	0.53136	0.52297	0.51615	0.51091	0.50695	0.50408	0.50215	0.50106	0.50072	0.50107
3	1.00000	0.54362	0.53135	0.52297	0.51614	0.51090	0.50695	0.50407	0.50214	0.50104	0.50070	0.50106
4	0.99999	0.54363	0.53136	0.52298	0.51615	0.51091	0.50696	0.50409	0.50215	0.50106	0.50072	0.50107
5	0.99999	0.54363	0.53135	0.52297	0.51614	0.51090	0.50695	0.50407	0.50214	0.50105	0.50071	0.50106
6	0.99999	0.54363	0.53136	0.52298	0.51615	0.51091	0.50696	0.50409	0.50216	0.50106	0.50072	0.50108
7	0.99999	0.54363	0.53136	0.52297	0.51614	0.51090	0.50695	0.50408	0.50214	0.50105	0.50071	0.50106
8	0.99998	0.54363	0.53136	0.52298	0.51615	0.51091	0.50696	0.50409	0.50216	0.50106	0.50072	0.50108
9	0.99998	0.54363	0.53136	0.52297	0.51615	0.51091	0.50695	0.50408	0.50215	0.50105	0.50071	0.50107
10	0.99998	0.54363	0.53136	0.52298	0.51615	0.51091	0.50696	0.50409	0.50215	0.50106	0.50072	0.50107
11	0.99998	0.54363	0.53136	0.52297	0.51615	0.51091	0.50696	0.50408	0.50215	0.50106	0.50072	0.50107

VC INSTANTE = 960.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.64897	0.63963	0.63259	0.62716	0.62302	0.61949	0.61761	0.61609	0.61522	0.61496	0.61525
2	1.00000	0.64899	0.63966	0.63261	0.62720	0.62305	0.61992	0.61765	0.61612	0.61526	0.61500	0.61529
3	1.00000	0.64897	0.63963	0.63259	0.62717	0.62302	0.61949	0.61761	0.61608	0.61522	0.61496	0.61524
4	0.99999	0.64899	0.63966	0.63261	0.62720	0.62305	0.61992	0.61765	0.61612	0.61526	0.61500	0.61529
5	0.99999	0.64897	0.63964	0.63259	0.62716	0.62302	0.61949	0.61762	0.61609	0.61522	0.61496	0.61525
6	0.99999	0.64899	0.63966	0.63261	0.62720	0.62305	0.61992	0.61764	0.61612	0.61525	0.61499	0.61528
7	0.99999	0.64897	0.63964	0.63259	0.62718	0.62303	0.61990	0.61762	0.61609	0.61523	0.61497	0.61526
8	0.99999	0.64899	0.63966	0.63261	0.62720	0.62305	0.61991	0.61764	0.61611	0.61525	0.61499	0.61528
9	0.99999	0.64898	0.63965	0.63260	0.62719	0.62304	0.61990	0.61763	0.61610	0.61524	0.61498	0.61527
10	0.99998	0.64898	0.63965	0.63261	0.62720	0.62304	0.61991	0.61764	0.61611	0.61525	0.61498	0.61527
11	0.99998	0.64898	0.63965	0.63260	0.62719	0.62304	0.61991	0.61763	0.61611	0.61524	0.61498	0.61527

VE INSTANTE= 1200.000 SEG

* TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.73188	0.72455	0.71902	0.71477	0.71151	0.70905	0.70726	0.70606	0.70536	0.70517	0.70540
2	1.00000	0.73195	0.72453	0.71911	0.71466	0.71161	0.70915	0.70737	0.70617	0.70538	0.70529	0.70552
3	1.00000	0.73188	0.72456	0.71902	0.71478	0.71151	0.70905	0.70727	0.70607	0.70539	0.70518	0.70541
4	1.00000	0.73195	0.72453	0.71910	0.71466	0.71160	0.70914	0.70736	0.70616	0.70549	0.70528	0.70551
5	0.99999	0.73189	0.72457	0.71904	0.71479	0.71153	0.70907	0.70726	0.70608	0.70540	0.70520	0.70542
6	0.99999	0.73194	0.72452	0.71909	0.71484	0.71159	0.70913	0.70734	0.70615	0.70547	0.70527	0.70549
7	0.99999	0.73190	0.72458	0.71905	0.71480	0.71154	0.70908	0.70730	0.70610	0.70542	0.70521	0.70544
8	0.99999	0.73193	0.72460	0.71908	0.71483	0.71157	0.70911	0.70733	0.70613	0.70545	0.70525	0.70548
9	0.99999	0.73191	0.72459	0.71906	0.71481	0.71155	0.70909	0.70731	0.70611	0.70543	0.70523	0.70546
10	0.99999	0.73192	0.72460	0.71907	0.71482	0.71156	0.70911	0.70732	0.70612	0.70545	0.70524	0.70547
11	0.99999	0.73192	0.72459	0.71907	0.71482	0.71156	0.70910	0.70732	0.70612	0.70544	0.70524	0.70546

NO INSTANTE= 1440.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.79641	0.79071	0.78640	0.78310	0.78056	0.77865	0.77726	0.77632	0.77579	0.77563	0.77580
2	1.00000	0.79659	0.79092	0.78663	0.78334	0.78081	0.77891	0.77753	0.77661	0.77609	0.77593	0.77612
3	1.00000	0.79642	0.79073	0.78643	0.78312	0.78059	0.77868	0.77729	0.77635	0.77583	0.77566	0.77584
4	1.00000	0.79657	0.79089	0.78660	0.78330	0.78078	0.77887	0.77749	0.77656	0.77604	0.77589	0.77607
5	1.00000	0.79645	0.79076	0.78646	0.78316	0.78063	0.77872	0.77733	0.77640	0.77587	0.77571	0.77589
6	0.99999	0.79654	0.79085	0.78656	0.78327	0.78074	0.77883	0.77745	0.77652	0.77600	0.77584	0.77602
7	0.99999	0.79648	0.79079	0.78649	0.78319	0.78066	0.77875	0.77736	0.77643	0.77591	0.77575	0.77593
8	0.99999	0.79651	0.79083	0.78654	0.78324	0.78071	0.77880	0.77741	0.77649	0.77596	0.77580	0.77598
9	0.99999	0.79649	0.79080	0.78651	0.78321	0.78068	0.77877	0.77739	0.77646	0.77593	0.77577	0.77595
10	0.99999	0.79650	0.79082	0.78652	0.78323	0.78069	0.77879	0.77740	0.77647	0.77595	0.77579	0.77597
11	0.99999	0.79650	0.79081	0.78652	0.78322	0.78069	0.77878	0.77740	0.77647	0.77594	0.77578	0.77596

NO INSTANTE= 1680.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.84611	0.84172	0.83839	0.83534	0.83338	0.83240	0.83132	0.83060	0.83019	0.83006	0.83019
2	1.00000	0.84655	0.84220	0.83891	0.83659	0.83446	0.83300	0.83195	0.83124	0.83085	0.83074	0.83089
3	1.00000	0.84618	0.84179	0.83848	0.83593	0.83397	0.83250	0.83143	0.83071	0.83030	0.83017	0.83031
4	1.00000	0.84648	0.84211	0.83882	0.83629	0.83435	0.83289	0.83183	0.83113	0.83073	0.83061	0.83076
5	1.00000	0.84625	0.84187	0.83856	0.83602	0.83407	0.83260	0.83153	0.83081	0.83041	0.83029	0.83042
6	1.00000	0.84641	0.84204	0.83874	0.83621	0.83426	0.83280	0.83174	0.83103	0.83063	0.83051	0.83065
7	1.00000	0.84630	0.84193	0.83862	0.83608	0.83414	0.83267	0.83160	0.83089	0.83049	0.83037	0.83051
8	0.99999	0.84636	0.84199	0.83869	0.83615	0.83421	0.83274	0.83168	0.83096	0.83056	0.83045	0.83059
9	0.99999	0.84633	0.84196	0.83866	0.83612	0.83417	0.83270	0.83164	0.83093	0.83053	0.83041	0.83055
10	0.99999	0.84635	0.84197	0.83867	0.83613	0.83419	0.83272	0.83165	0.83094	0.83054	0.83042	0.83056
11	0.99999	0.84634	0.84197	0.83867	0.83613	0.83418	0.83272	0.83165	0.83094	0.83054	0.83042	0.83056

NO INSTANTE= 1920.000 SEG

TEMPERATURA DO MATERIAL

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.00000	0.88400	0.88061	0.87805	0.87609	0.87457	0.87343	0.87259	0.87202	0.87175	0.87159	0.87168
2	1.00000	0.88493	0.88163	0.87914	0.87723	0.87577	0.87467	0.87388	0.87336	0.87307	0.87300	0.87312
3	1.00000	0.88419	0.88033	0.87828	0.87633	0.87483	0.87370	0.87287	0.87232	0.87200	0.87190	0.87200
4	1.00000	0.88475	0.88143	0.87893	0.87701	0.87554	0.87443	0.87363	0.87309	0.87280	0.87271	0.87283
5	1.00000	0.88435	0.88109	0.87847	0.87653	0.87504	0.87391	0.87310	0.87255	0.87224	0.87215	0.87225
6	1.00000	0.88461	0.88128	0.87877	0.87684	0.87536	0.87424	0.87344	0.87290	0.87259	0.87251	0.87262
7	1.00000	0.88445	0.88111	0.87859	0.87665	0.87516	0.87404	0.87323	0.87269	0.87238	0.87229	0.87240
8	1.00000	0.88453	0.88120	0.87868	0.87675	0.87526	0.87415	0.87334	0.87279	0.87249	0.87240	0.87251
9	0.99999	0.88449	0.88116	0.87864	0.87670	0.87522	0.87410	0.87329	0.87275	0.87244	0.87235	0.87247
10	0.99999	0.88451	0.88117	0.87865	0.87672	0.87523	0.87412	0.87331	0.87276	0.87246	0.87237	0.87248
11	0.99999	0.88450	0.88117	0.87865	0.87671	0.87523	0.87411	0.87330	0.87276	0.87246	0.87237	0.87248

6.5. RESUMO DOS ENSAIOS E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

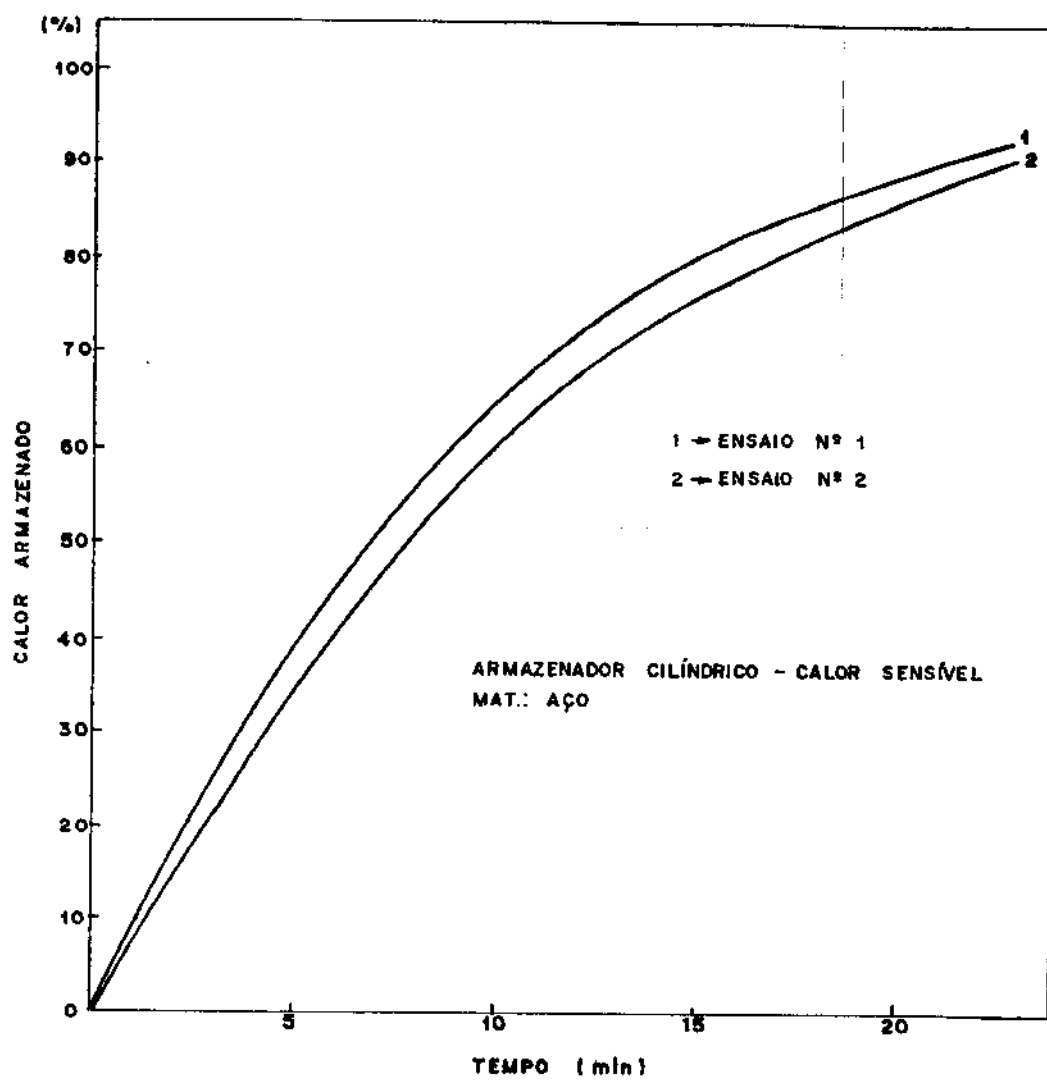


Figura 83 - Curvas de Carregamento do Modelo nº 1

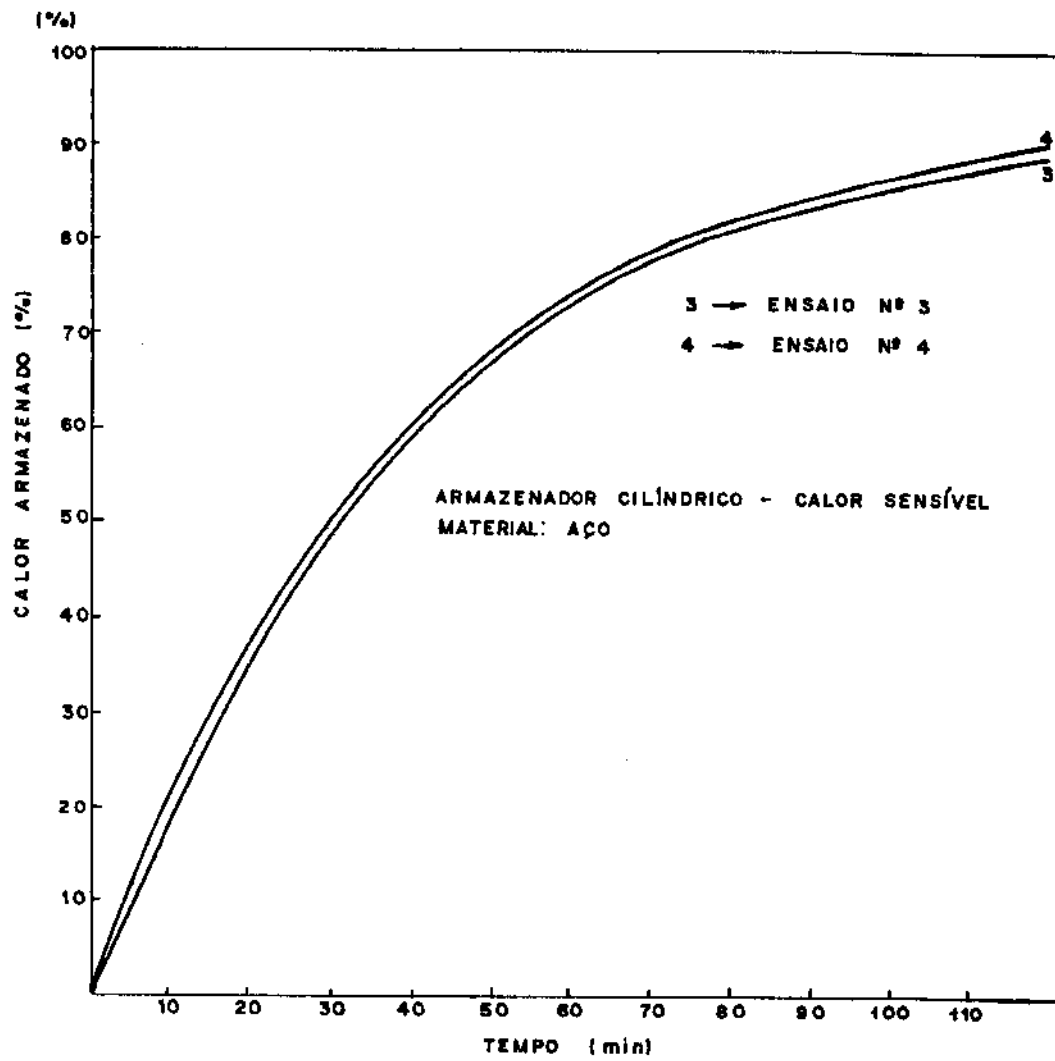


Figura 84 - Curvas de Carregamento do Modelo nº 2

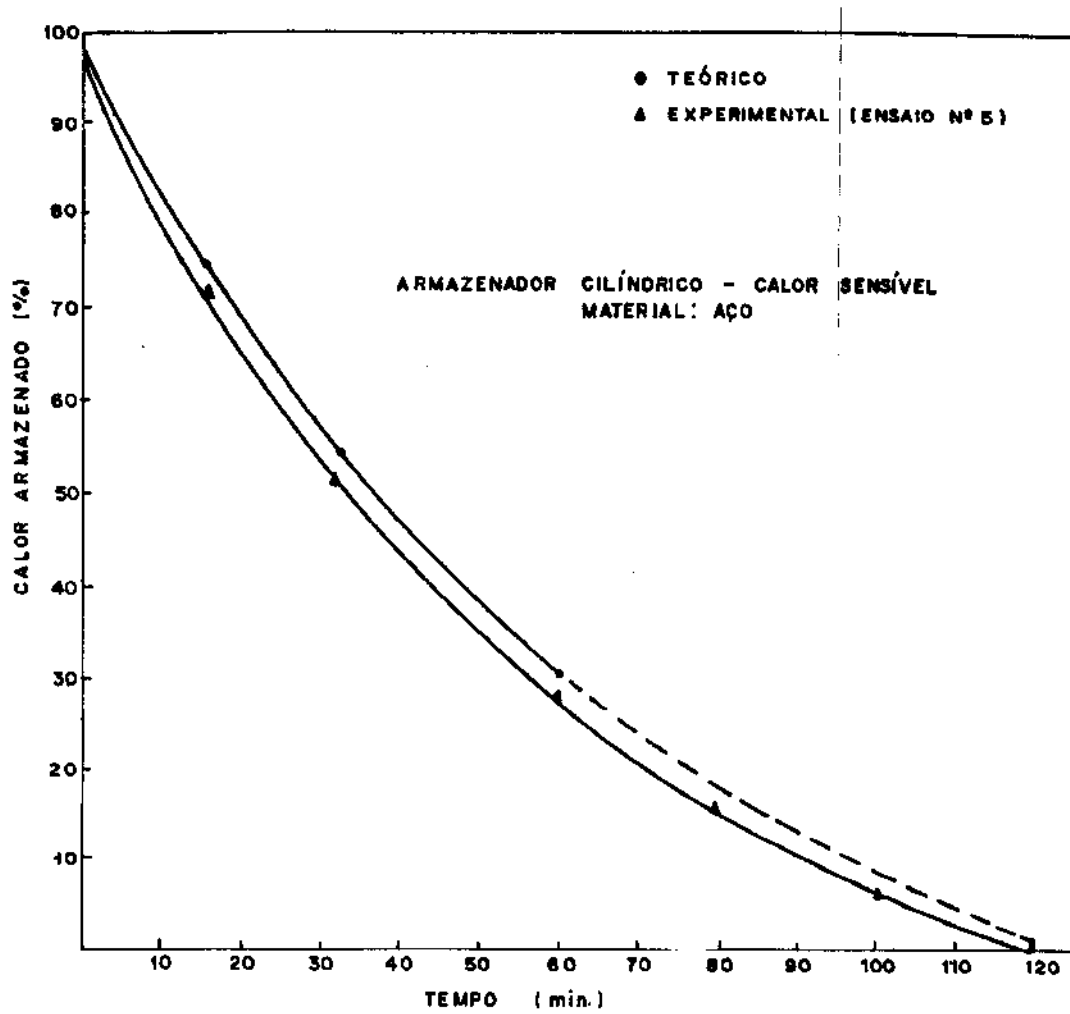


Figura 85 - Curvas de Descarregamento do Modelo nº 2

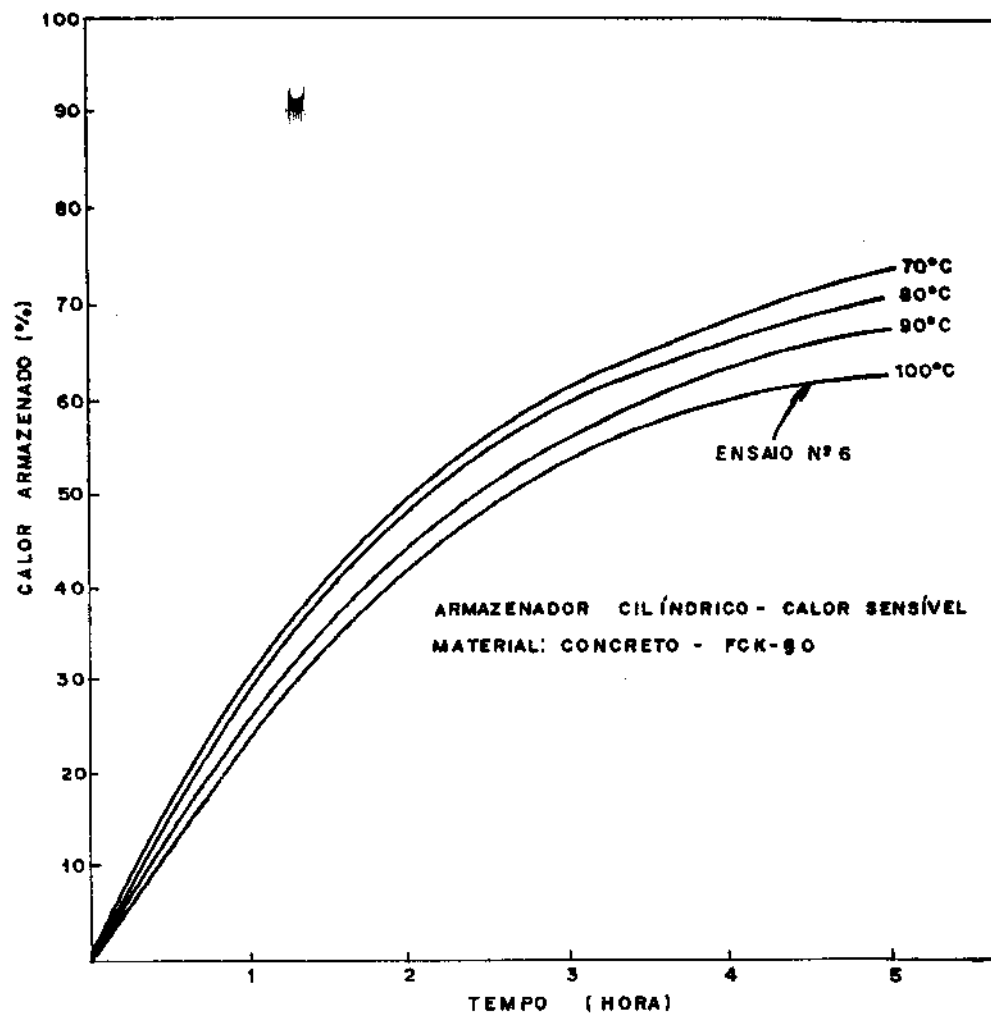


Figura 86 - Curvas de Carregamento do Modelo nº 3

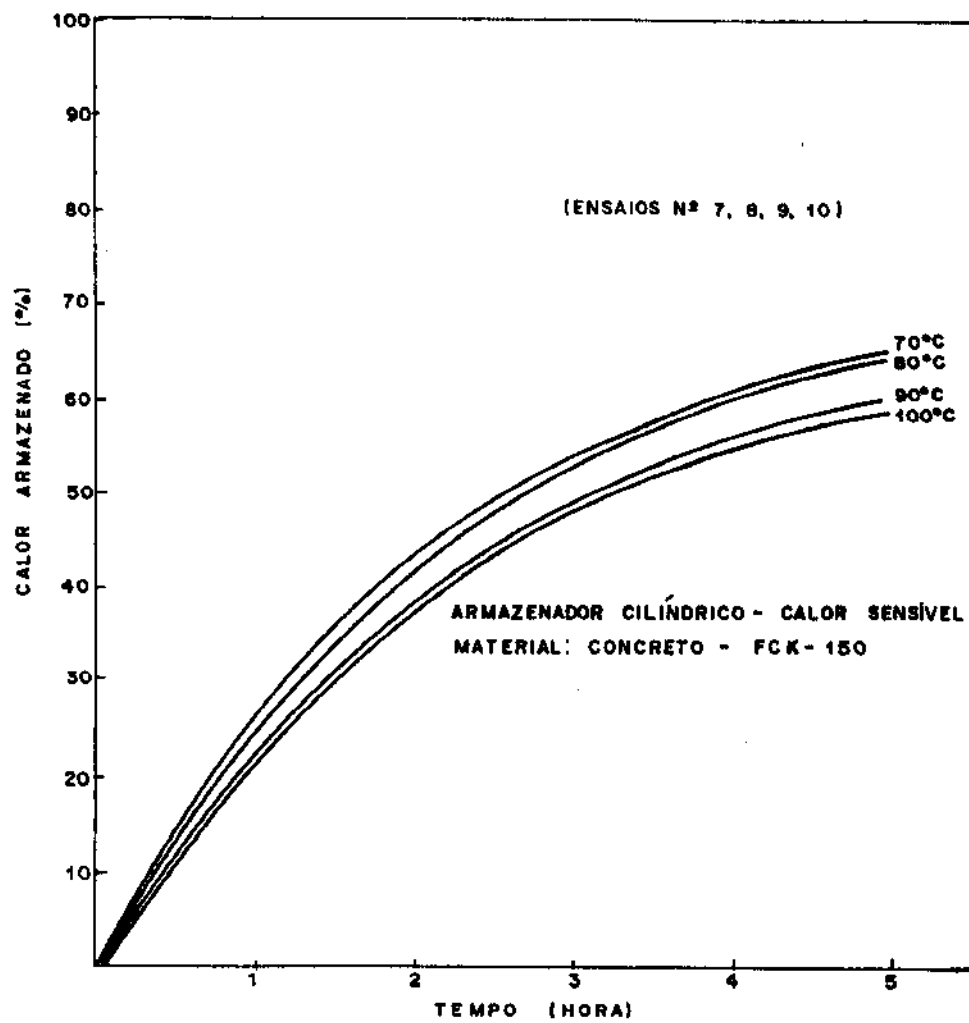


Figura 87 - Curvas de Carregamento do Modelo n° 4

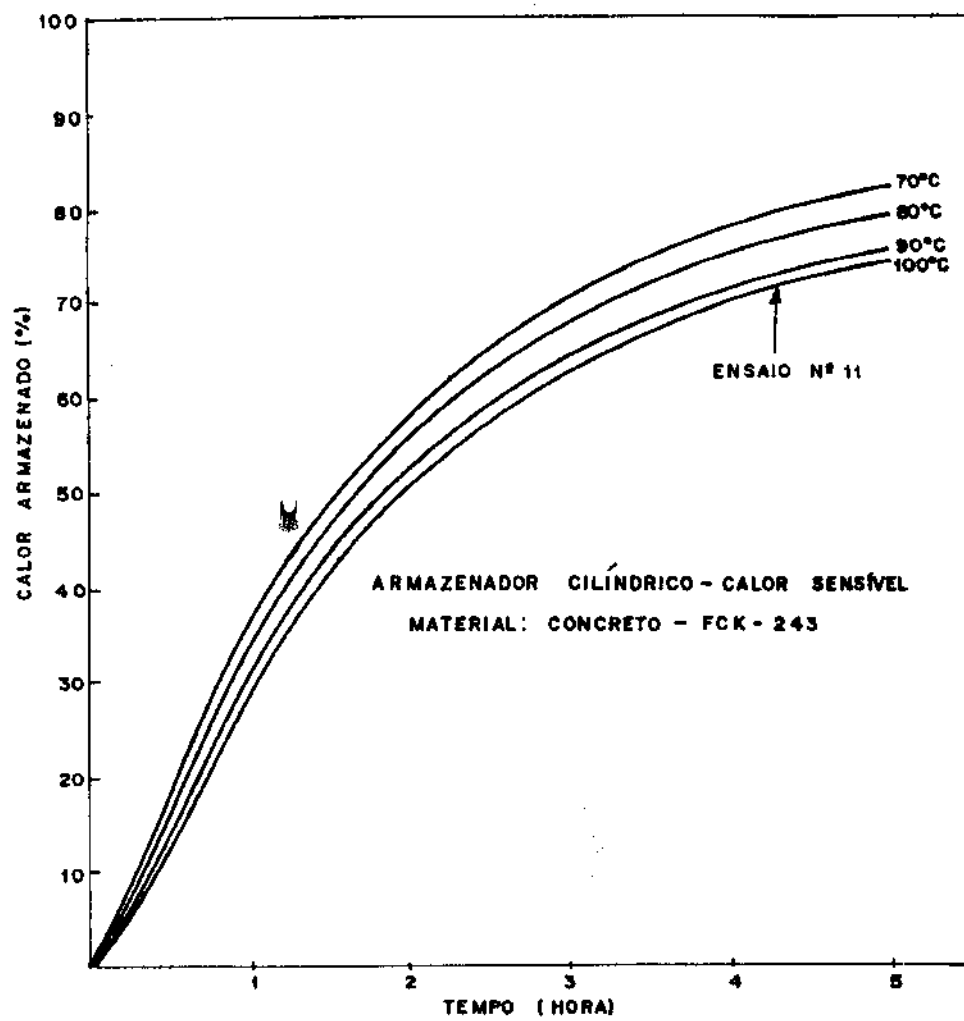


Figura 88 - Curvas de Carregamento do Modelo nº 5

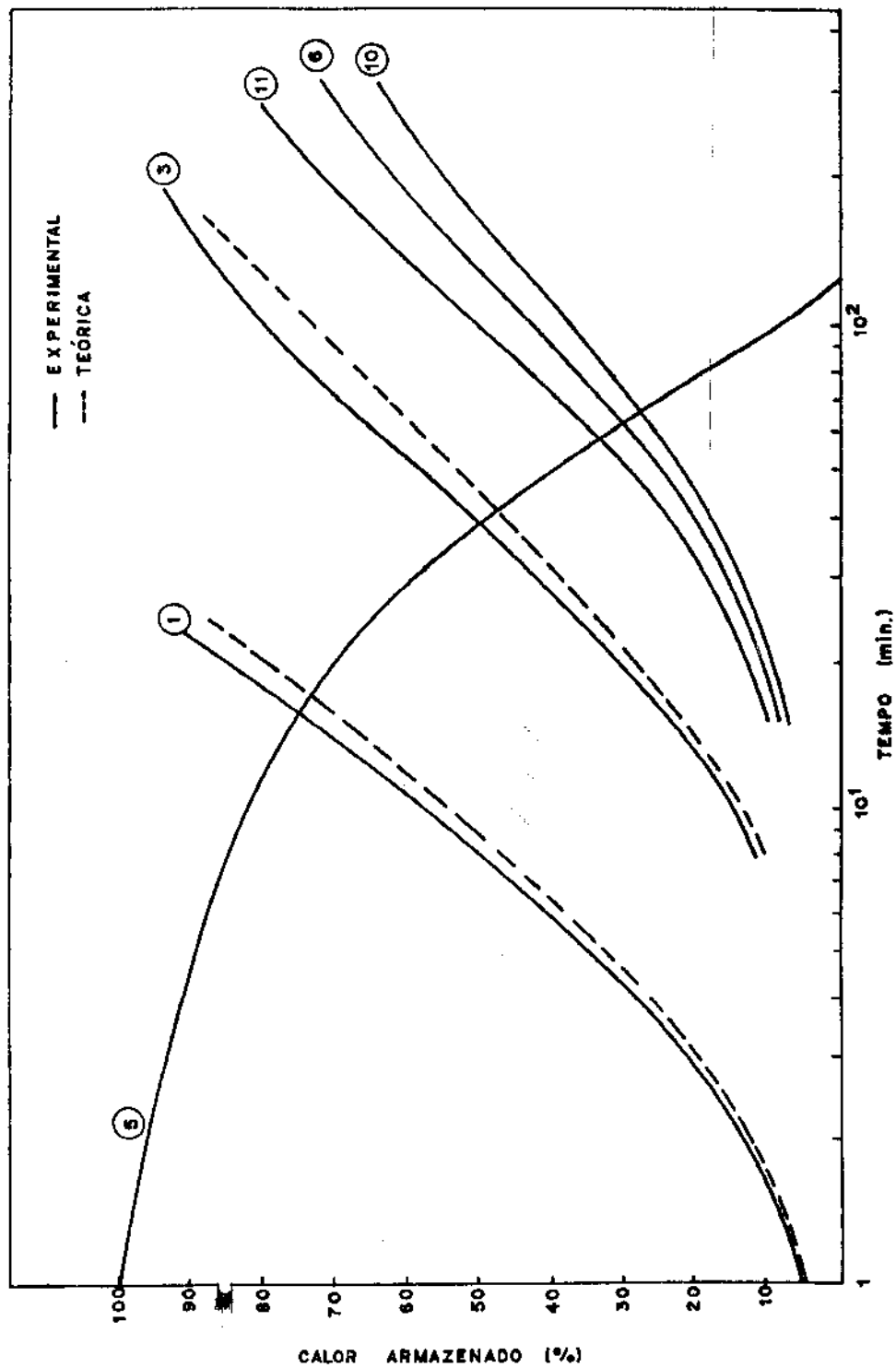


Figura 89 - Curvas Teóricas e Experimentais dos Ensaio

6.6. DESEMPENHO DOS ARMAZENADORES

a) Modelo nº 1

Espessura do Isolante: 40 [mm]

Superfície Externa do Isolante: 0,461 [m²]

Material Isolante: Lã de Vidro

Coefficiente de Condutibilidade Térmica do Isolante: $3,83 \times 10^{-2}$ [w/m°C]

Capacidade Térmica do Material Armazenador: $4,07 \times 10^6$ [J/m³°C]

Volume do Material Armazenador: $2,00 \times 10^{-3}$ [m³]

ITEM	UNIDADE	ENSAIO Nº 1	ENSAIO Nº 2
$\bar{t}_0$	°C	22,0	21,3
$\bar{t}_f$	°C	98,6	94,2
Δt_1	°C	76,6	72,9
$\bar{t}_{ei}$	°C	27,1	26,5
$\bar{t}_a$	°C	23,0	23,2
Δt_2	°C	4,1	3,3
$\bar{t}_{fi}$	°C	99,7	99,1
$\bar{t}_{fs}$	°C	96,4	95,9
Δt_3	°C	3,3	3,2
θ_e	s	1380	1380
$\dot{m}_f$	Kg/s	0,0672	0,0651
ρ_f	Kg/m ³	840	840
c_f	J/Kg°C	2183	2183
$\bar{h}_c$	w/m ² °C	66,52	65,66
$\bar{h}_{ei}$	w/m ² °C	17,07	16,28
Q_{taxa}	w	451,83	430,00
Q_{pi}	w	32,27	24,76
Q_{TR}	w	484,10	454,76
ϵ	%	6,66	5,44

TABELA 20 - Resumo dos Valores para os Ensaíos do Modelo nº 1

b) Modelo nº 2

Espessura do Isolante: 40 [mm]

Superfície Externa do Isolante: 0,679 [m²]

Material Isolante: Lã de Vidro

Coeficiente de Condutibilidade Térmica do

Isolante: $3,83 \times 10^{-2}$ [w/m°C]

Capacidade Térmica do Material Armazena-

dor: $4,07 \times 10^6$ [J/m³°C]

Volume do Material Armazenador: $11,35 \times 10^{-3}$ [m³]

ITEM	UNIDADE	ENSAIO Nº 3	ENSAIO Nº 4
$\bar{t}_o$	°C	23,2	21,3
$\bar{t}_f$	°C	115,2	120,1
Δt_1	°C	92,0	98,8
$\bar{t}_{ei}$	°C	28,0	26,8
$\bar{t}_a$	°C	24,2	22,0
Δt_2	°C	3,8	4,8
$\bar{t}_{fi}$	°C	124,5	124,5
$\bar{t}_{fs}$	°C	119,0	118,5
Δt_3	°C	5,5	6,0
Θ_e	s	6240	6240
m_f	Kg/s	0,0588	0,0588
ρ_f	Kg/m ³	840	840
c_f	J/Kg°C	2183	2183
$\bar{h}_c$	w/m ² °C	70,68	71,80
$\bar{h}_{ei}$	w/m ² °C	9,65	11,89
Q_{taxa}	w	681,07	731,41
Q_{pi}	w	24,91	38,75
Q_{TR}	w	705,98	770,16
ϵ	%	3,53	5,03

TABELA 21 - Resumo dos Valores para os Ensaios do Modelo nº 2

c) Modelo nº 3, nº 4 e nº 5

Para que possamos comparar os desempenhos relativos a cada modelo concreto-ar, tomaremos os ensaios realizados para a temperatura de 100°C.

Espessura do Isolante: 40 [mm]

Material Isolante: Lã de Rocha

Coeficiente de Condutibilidade Térmica do

Isolante: $6,03 \times 10^{-2}$ [w/m°C]

ITEM	UNIDADE	ENSAIO Nº 6	ENSAIO Nº 10	ENSAIO Nº 11
S_{ei}	m ²	0,668	0,655	0,670
ρ_m	Kg/m ³	2240	2244	2250
c_m	J/Kg°C	879	879	879
$\rho_m c_m$	J/m ³ °C	$1,968 \times 10^6$	$1,972 \times 10^6$	$1,977 \times 10^6$
V	m ³	$15,10 \times 10^{-3}$	$14,82 \times 10^{-3}$	$15,15 \times 10^{-3}$
K_m	w/m°C	1,075	1,080	1,085
$\bar{t}_o$	°C	29,0	27,3	26,0
$\bar{t}_f$	°C	100,0	100,0	100,0
Δt_1	°C	71,0	72,7	74,0
$\bar{t}_{ei}$	°C	29,0	29,7	29,0
$\bar{t}_a$	°C	26,5	26,5	27,5
Δt_2	°C	2,5	3,2	1,5
$\bar{t}_{fi}$	°C	100,0	100,0	100,0
$\bar{t}_{fs}$	°C	82,2	81,5	82,1
Δt_3	°C	17,8	18,5	17,9
θ_e	s	18.000	18.000	18.000
$\dot{m}_f$	Kg/s	0,0071	0,0071	0,0071

TABELA 22 - Resumo dos Valores para os Ensaios dos Modelos nº 3, nº 4 e nº 5

ITEM	UNIDADE	ENSAIO Nº 6	ENSAIO Nº 10	ENSAIO Nº 11
ρ_f	Kg/m ³	0,942	0,942	0,942
c_f	J/Kg°C	1022	1022	1022
$\bar{h}_c$	w/m ² °C	23,57	24,39	22,67
$\bar{h}_{ei}$	w/m ² °C	7,12	7,72	6,67
Q_{taxa}	w	117,27	118,06	123,18
Q_{pi}	w	11,89	16,18	6,70
Q_{TR}	w	129,16	134,24	129,88
ϵ	%	9,21	12,05	5,16

TABELA 22 - Continuação

6.7. DISCUSSÃO

Tomaremos para análise e discussão alguns ensaios que revelam o comportamento dos modelos. Para esta análise, calculamos alguns valores de parâmetros que completam os já apresentados nos gráficos e tabelas dos itens deste capítulo.

ITEM	UNIDADE	ENSAIO Nº 1	ENSAIO Nº 3	ENSAIO Nº 6
$\bar{v}$	m/s	0,130	0,087	14,20
Re	-	717,75	548,96	16.178
Pr	-	71,5	71,5	0,71
B_{iT}	-	0,0197	0,0809	1,762
B_{iR}	-	0,0178	0,0723	1,305
Nu	-	15,87	19,45	41,21
$\bar{h}_T$	w/m ² °C	73,68	79,02	27,55
$\bar{h}_R$	w/m ² °C	66,52	70,68	23,57
U	-	0,5	0,267	0,179
$\Delta\theta$	s	0,076	0,753	33,19

TABELA 23 - Valores Comparativos de Parâmetros dos Ensaaios

Os valores da capacidade térmica dos materiais dos armazenadores e dos fluidos transporte também são valores comparativos e que são apresentados na tabela a seguir, bem como o coeficiente de difusividade térmica.

ITEM	UNIDADE	ÓLEO TÉRMICO	AÇO	AR	CONCRETO
CAT	J/m ³ °C	1,83 x 10 ⁶	4,07 x 10 ⁶	96272	1,97x10 ⁶
α_m	m ² /s	-	12,86 x 10 ⁻⁶	-	0,546x10 ⁻⁶

TABELA 24 - Valores Comparativos de Parâmetros dos Materiais e Fluidos

Para que se note a influência da relação da su perfície externa do isolante pelo volume do material armazenado, a energia perdida, e a energia não disponível, apresentamos a tabela 25

ITEM	UNIDADE	MODELO Nº 1	MODELO Nº 2	MODELO Nº 3
S_{ei}/v	l/m	230,41	59,82	44,24
Q_{pi}	w	32,27	24,91	11,89
ϵ	%	6,66	3,53	9,21

TABELA 25 - Valores Comparativos dos Modelos quanto a Energia Não Disponível

Tendo estas tabelas complementares, passamos a discutir os ensaios tomados para análise, enumerando os pon tos que notamos ser de interesse para comentários:

a) Análise e Discussão do Modelo nº 1 (Ensaio nº 1)

- Durante a elaboração dos gráficos representativos do comportamento da temperatura contra o tempo, no material armazenador, nota-se (fig. 16 a 20) um decrêscimo da temperatura no sentido do fluxo do fluido transporte e no sentido do cres cimento do raio do tubo;

- O modelo possui sete estações de medida de temperatura no interior do material armazenador, com a numeração cres cente com a direção do fluxo do fluido transporte conforme esquema mostrado na figura 14, e na última estação, que recebe o nº 7, e na penúltima que recebe o nº 6, nota-se uma influência do efeito do final do tubo, que faz com que a temperatura aumente nestes pontos. Nota-se para a estação nº7, nas

figuras 16, 17, 18, 19 e 20 e para a estação 6, nas figuras 17, 19 e 20;

- A duração do ensaio, 23 [min], foi suficiente para carregar o armazenador com 92% do calor total possível, para uma taxa de 451,83 [w] e sendo que a energia não disponível ficou na faixa de 6,66%;

- Observa-se pela tabela 23, que a diferença entre o valor do coeficiente de película calculado teoricamente e o valor verificado experimentalmente, foi da ordem de 9,7%, portanto dentro de valores aceitáveis;

- Comparando os resultados teóricos e experimentais, figura 89, pode-se notar que o calor armazenado teórico fica abaixo do experimental, o que justifica-se, pela observação já feita nesta análise, de que nas duas últimas estações, houve um acréscimo da temperatura interna do material, o que não é previsto no modelo teórico.

Esta elevação da temperatura do material aumenta com o passar do tempo, contribuindo para que estas curvas mais se distanciem, como pode-se notar nesta figura já mencionada.

b) Análise e Discussão do Modelo nº 2

b.1) Ensaio nº 3

- Inicialmente pode-se dizer que o comportamento da variação da temperatura do material armazenador ao longo do comprimento e na direção radial, é semelhante ao modelo nº 1, o que pode-se verificar observando as fig. 29 a 35;

- Por possuir um volume maior, este modelo foi dividido em sua seção transversal em mais profundidades para que

se pudesse ter um melhor campo de medida de temperatura. A influência do efeito do final do tubo, não teve uma contribuição tão distinta para cada estação, mas também existiu, pois as três últimas estações tiveram o mesmo valor de temperatura em todas as profundidades medidas;

- A velocidade menor de passagem, consequentemente Re menor, fizeram com que as estações de medida de temperatura apresentassem valores de temperatura que se confundiam devido à grande proximidade o que nos forçou a plotar os gráficos apresentados nas figuras 29 a 35;

- Para 120 [min] de duração do ensaio, o modelo foi carregado em 89,5 %, com uma taxa de 681,07 [w], e apresentou energia não disponível na faixa de 3,53%;

- Na tabela 23, temos o coeficiente de película teórico e o experimental, cuja diferença foi de 10,55%, também diferença tolerada para este modelo.

- Na figura 89, que apresenta um gráfico semi-log. do calor armazenado versus o tempo, observa-se que o calor armazenado teórico fica abaixo do experimental, o que se justifica pela manutenção da temperatura nas estações constantes em grupos, já analisadas neste tópico e que não é previsto no modelo teórico. O efeito acumulativo desta diferença, contribuiu para que as curvas se distanciassem;

b.2) Ensaio nº 5

- Este ensaio de descarregamento, que foi realizado no modelo nº 2, foi escolhido dentre quatro ensaios de descarregamento realizados e apresentado aqui para que se observe a instabilidade do comportamento da temperatura do material que

acompanha a instabilidade da temperatura do fluido, vindo a estabilizar com o decorrer do tempo.

- O fluido utilizado para descarregamento, foi o mesmo óleo térmico utilizado para carregamento, tendo sua temperatura mais baixa, e como sua capacidade térmica é grande e próxima a do material armazenador, o tempo de descarregamento foi bem próximo ao de carregamento. (fig. 89)

c) Análise e Discussão dos Modelos nº 3, 4 e 5

- Estes modelos, cujo material armazenador é o concreto, têm, como já foi apresentado, composições diferentes e os resultados apresentados nos mostraram que há influência desta composição na quantidade percentual de calor armazenado. (fig. 89)

- Os ensaios nºs 6, 10 e 11, foram realizados para 100°C de temperatura do fluido transporte na entrada do tubo armazenador, e a tabela 26, a seguir, mostra alguns resultados das grandezas comparativas:

ITEM	UNIDADE	MODELO Nº 3 $f_{ck} 90$ ENSAIO Nº 6	MODELO Nº 4 $f_{ck} 150$ ENSAIO Nº 10	MODELO Nº 5 $f_{ck} 243$ ENSAIO Nº 11
$\bar{h}_c$	w/m ² °C	23,57	24,39	22,67
Q_{taxa}	w	117,27	118,06	123,18
Q_{TR}	w	129,16	134,24	129,88
ϵ	%	9,21	12,05	5,16

TABELA 26 - Algumas Grandezas Comparativas para os Ensaios dos Modelos de Concreto

- Para todos os modelos de concreto, verifica-se o decréscimo da temperatura do material no sentido do fluxo do fluido transporte e à medida que se afasta do centro do tubo na direção radial;

- Os modelos possuem cinco estações de medida de temperatura que devido a baixa difusividade térmica do concreto, não registraram o efeito de ponta do tubo, não havendo portanto a quebra da ordem lógica da diminuição da temperatura do material armazenador na direção do fluxo;

- Observa-se no entanto, que para os pontos de medida de temperatura próximos ao fluxo do fluido transporte, que a diferença de temperatura entre as estações é mais distinto como nas fig. 62, 67, 72 e 77.

- Uma constante em todos os ensaios dos modelos de concreto, foi o fato de que a temperatura nos minutos iniciais do ensaio, cresceu junto em todas as estações, o que se observa por exemplo, mais claramente, nas fig. 59, 64, 74, cujas curvas representam a temperatura na superfície do armazenador.

- A duração dos ensaios dos modelos de concreto foi de cinco horas, (fig. 86, 87 e 88) e carregou os armazenadores com 62% para o ensaio nº 6, 59% para o ensaio nº 10 e 74,5% para o ensaio nº 11 e pela tabela 26, verifica-se os valores da taxa de armazenamento e a energia não disponível para cada um deles.

- As figuras 86, 87 e 88, mostram os resultados dos ensaios para quatro temperaturas de entrada do fluido transporte e observa-se que com o aumento desta temperatura, para o tempo de ensaio igual para todos os modelos, o calor armazenado percentual diminui. Justifica-se esta diminuição

pelo aumento da diferença de temperatura entre o ambiente e a temperatura do fluido transporte e com isto as perdas também.

CAPITULO VII

CAPÍTULO 7 PROJETO ANALÍTICO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO

7.1. INTRODUÇÃO

O estudo apresentado neste capítulo, tem como base um trocador de calor para armazenamento de calor sensível e posterior ou simultâneo aquecimento de um segundo fluido, separados por superfícies de contorno cilíndricas, como é mostrado esquematicamente nas fig. 90 e 91.

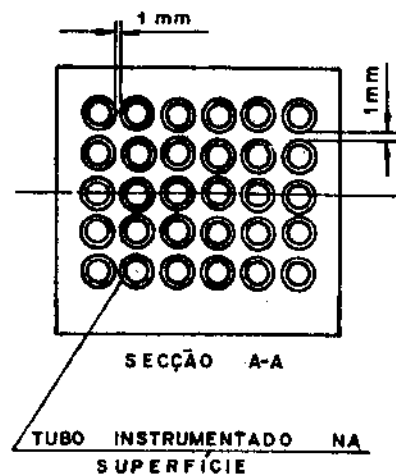


Figura 90 - Esquema da Seção Transversal do Armazenador

As fig. 92 e 93 apresentam as dimensões dos espelhos fixo e móvel, respectivamente, e a distribuição real dos tubos no armazenador.

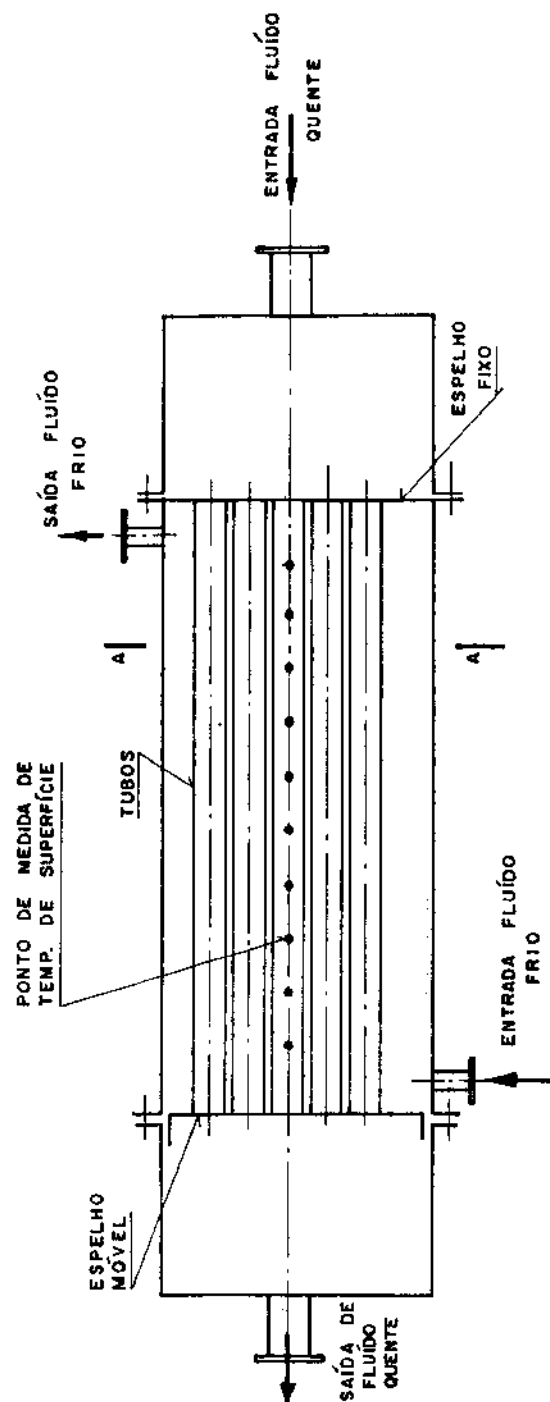


FIG. (1) ESQUEMA DO ARMAZENADOR

Figura 91 - Esquema do Armazenador

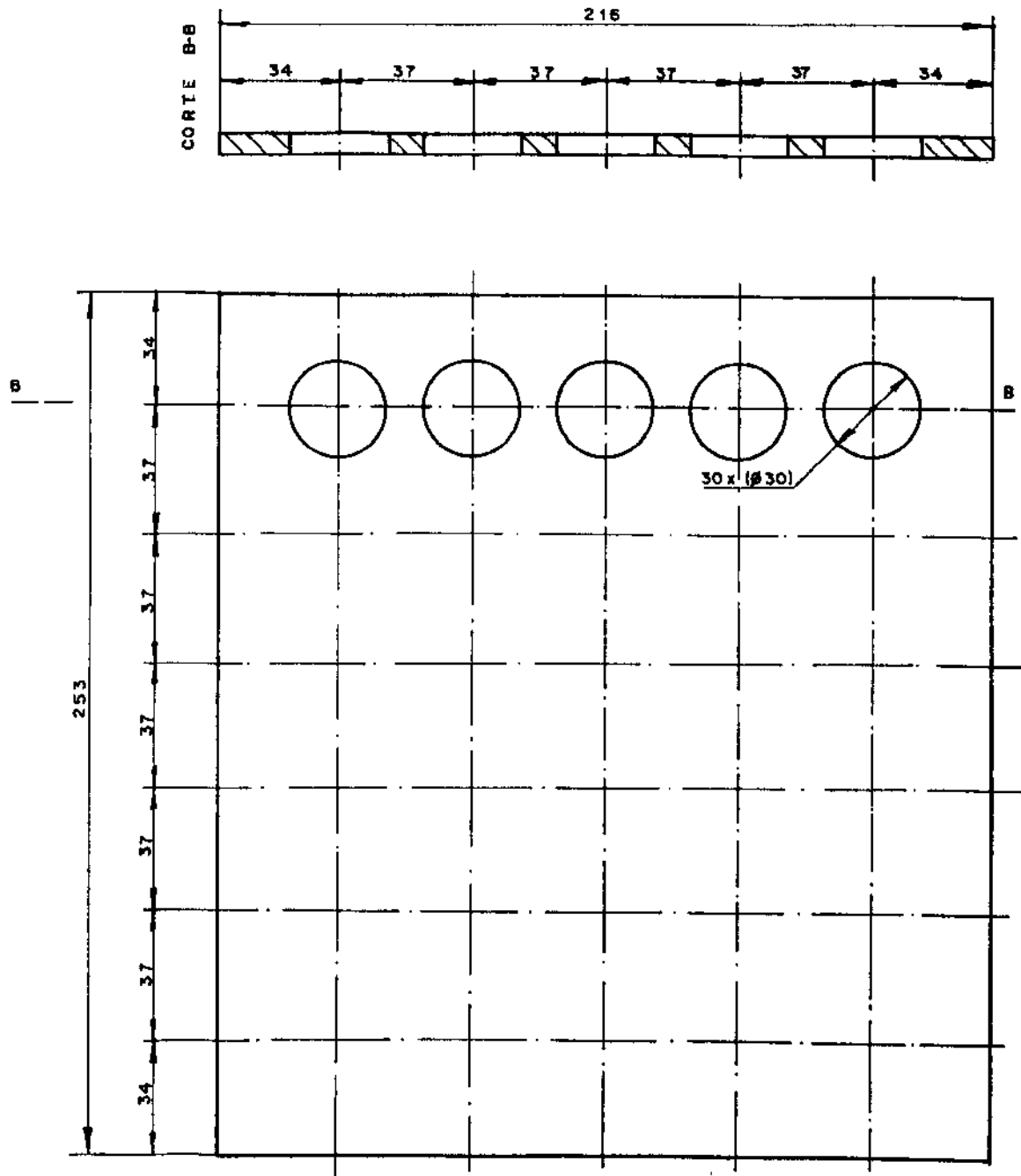


Figura 92 - Espelho Fixo do Armazenador

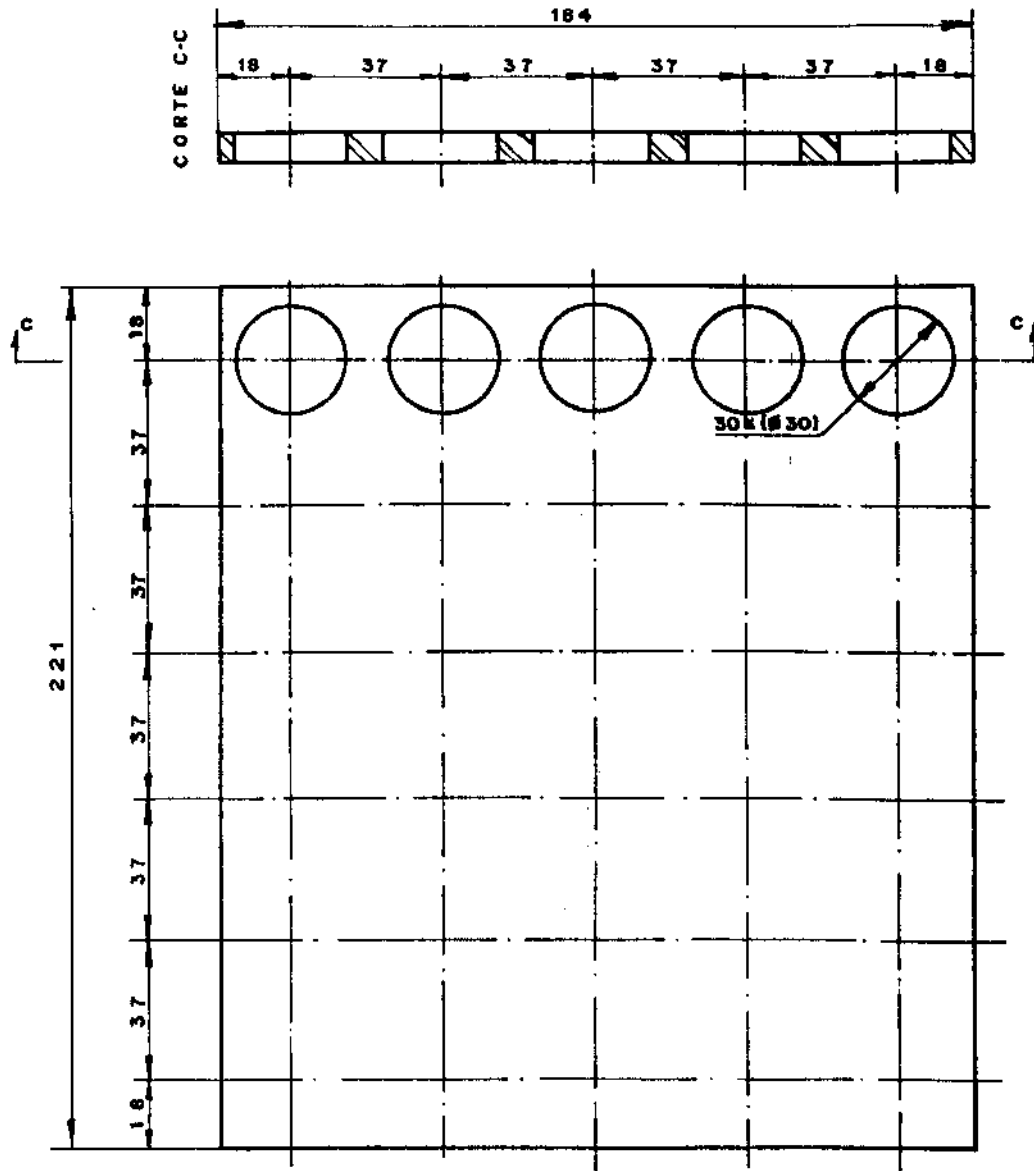


Figura 93 - Espelho Móvel do Armazenador

7.2. O MODELO ANALÍTICO PROPOSTO

A análise de alguns fatores influentes na modelagem experimental, definiram o modelo analítico utilizado, que teve as seguintes considerações:

- 1) Propriedades físicas do material armazenador constantes;
- 2) Propriedades físicas do fluido quente, que escoam internamente aos tubos, variáveis com a temperatura;
- 3) Propriedades físicas do fluido frio, que escoam externamente aos tubos, constantes;
- 4) Coeficiente de película convectivo uniforme;
- 5) Condução bidimensional dentro do material armazenador;
- 6) Velocidade média constante para os fluidos;
- 7) Distribuição inicial de temperatura do material armazenador uniforme;
- 8) O processo é iniciado por degrau na temperatura da entrada do fluido quente;
- 9) Perfil térmico em desenvolvimento;
- 10) Nenhuma transferência de calor pelos lados da unidade de armazenamento;
- 11) Os fluidos quente e frio escoam em direções opostas;
- 12) O carregamento e o descarregamento da unidade de armazenamento são simultâneos ou não;
- 13) Modelo de condutividade finita.

As equações diferenciais relacionando a distribuição da temperatura no material armazenador e os dois fluxos de fluidos, formam a equação bidimensional transiente de con-

dução de calor para o material armazenador, acoplada à equação unidimensional da conservação da energia para os fluidos de transporte.

As equações resultantes exprimem as temperaturas do fluido e do material armazenador em termos dos raios e do comprimento dos tubos.

Como o sistema armazenador mostrado nas figs. 90 e 91, apresenta simetria, podemos isolar um tubo, propor um estudo individual e desenvolver as equações do modelo analítico proposto, conforme a fig. 94.

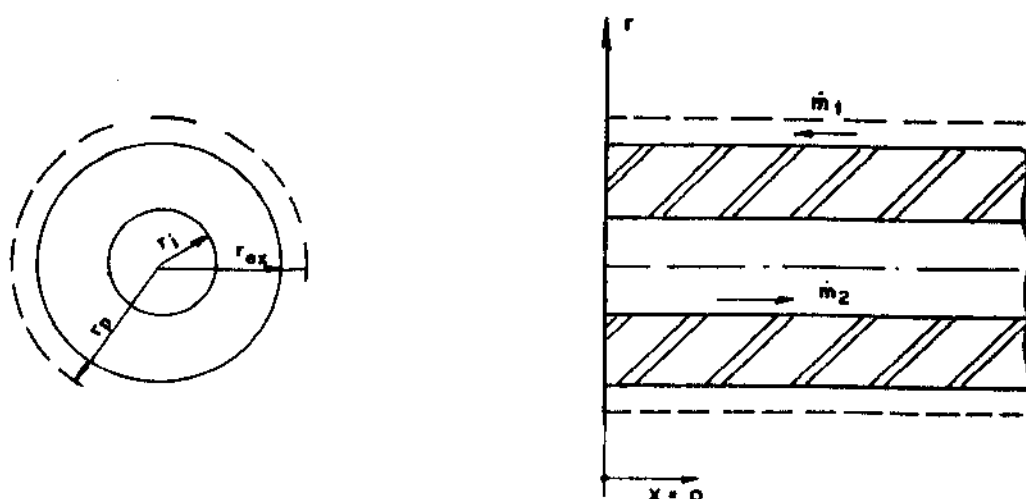


Figura 94 - Esquema do Modelo Proposto

O desenvolvimento matemático das equações está no Apêndice 2, cujo resumo é o seguinte:

Para o fluido frio:

$$\rho_1 c_1 S_p \left(\frac{\partial t_1}{\partial \tau} - v_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \right) = h_1 2\pi r_{ex} (t_{ex} - t_1) \quad (105)$$

Para o material armazenador:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \quad (106)$$

Para o fluido quente:

$$\rho_2 c_2 S_1 \left(\frac{\partial t_2}{\partial \tau} + v_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \right) = h_2 2 \pi r_i (t_i - t_2) \quad (107)$$

As condições iniciais e de contorno são:

$$\text{Para } \tau = 0 ; \quad t_m = t_1 = t_2 = t_0$$

$$\text{Para } \tau > 0 ;$$

$$\left. \begin{aligned} x = 0 \quad t_2 = t_{2e} \quad \frac{\partial t_m}{\partial x} &= 0 \quad \text{para } r_i < r < r_{ex} \\ x = L \quad t_1 = t_{1e} \quad \frac{\partial t_m}{\partial x} &= 0 \quad \text{para } r_i < r < r_{ex} \\ r = r_i \quad K_m \frac{\partial t_m}{\partial r} &= -h_2 (t_i - t_2) \quad \text{para } 0 \leq x \leq L \\ r = r_{ex} \quad K_m \frac{\partial t_m}{\partial r} &= h_1 (t_{ex} - t_1) \quad \text{para } 0 \leq x \leq L \end{aligned} \right\} \quad (108)$$

Para que se pudesse generalizar o estudo, foram introduzidos alguns parâmetros adimensionais:

$$T = \frac{t - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad (109)$$

$$B_2 = \frac{h_2 (r_{ex} - r_i)}{K_m} \quad (110)$$

$$B_1 = \frac{h_1 (r_{ex} - r_i)}{K_m} \quad (111)$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{r_{ex}^2 - r_i^2} \quad (112)$$

$$X^* = \frac{x}{L} \quad (113)$$

$$R^* = \frac{r}{r_{ex} - r_i} \quad (114)$$

$$D = \frac{r_{ex} - r_i}{L} \quad (115)$$

$$C = \frac{m_1 c_1}{m_2 c_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (116)$$

$$G_1 = \frac{P_1 K_m}{E_1} \quad (117)$$

$$G_2 = \frac{P_2 K_m}{E_2} \quad (118)$$

$$U = \frac{r_{ex}}{r_i} \quad (119)$$

As equações adimensionais ficam:

Para o fluido frio:

$$\frac{\alpha}{G_1 B_1 (r_{ex} + r_i) v_1} \frac{\partial T_1}{\partial Fo} - \frac{E_1}{2\pi r_{ex} L h_1} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = T_{ex} - T_1 \quad (120)$$

Para o fluido quente:

$$\frac{\alpha}{G_2 B_2 (r_{ex} - r_i) v_2} \frac{\partial T_2}{\partial Fo} + \frac{E_2}{2\pi r_i L h_2} \frac{\partial T_2}{\partial X^*} = T_i - T_2 \quad (121)$$

Para o material armazenador:

$$\frac{U - 1}{U + 1} \frac{\partial T_m}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^{*2}} + \frac{1}{R^*} \frac{\partial T_m}{\partial R^*} + D^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial X^{*2}} \quad (122)$$

As novas condições iniciais e de contorno ficam:

$$\text{Para } Fo = 0 ; \quad T_m = T_1 = T_2 = T_o$$

$$\text{Para } Fo > 0 ;$$

$$X^* = 0 ; T_2 = 1 \quad \frac{\partial T_m}{\partial X^*} = 0 \text{ para } \frac{1}{U - 1} < R^* < \frac{U}{U - 1} \quad (123)$$

$$X^* = 1 ; T_1 = 0 \quad \frac{\partial T_m}{\partial X^*} = 0 \text{ para } \frac{1}{U - 1} < R^* < \frac{U}{U - 1}$$

$$R^* = \frac{1}{U-1}; \frac{\partial T_m}{\partial R^*} = -B_2 (T_i - T_2) \text{ para } 0 \leq X^* \leq 1$$

$$R^* = \frac{U}{U-1}; \frac{\partial T_m}{\partial R^*} = B_1 (T_{ex} - T_1) \text{ para } 0 \leq X^* \leq 1$$

A ordem de grandeza dos termos transientes nas equações (120) e (121), possibilita-nos ignorá-los, pois as trocas de calor nas superfícies e que farão a tendência da temperatura dos fluidos, então temos as equações (124) e (125) respectivamente.

$$\frac{\partial T_1}{\partial X^*} - \frac{2 \pi r_{ex} L h_1}{E_1} (T_1 - T_{ex}) = 0 \quad (124)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X^*} + \frac{2 \pi r_i L h_2}{E_2} (T_2 - T_i) = 0 \quad (125)$$

Através de um procedimento iterativo, as equações (122), (124) e (125), utilizando as condições de contorno (123), são resolvidas simultaneamente, sendo adotados os valores iniciais para T_{ex} e T_i .

O método numérico de diferenças finitas, foi utilizado para encontrar a solução deste conjunto de equações, sendo utilizadas as diferenças adequadas para cada variável e condição.

7.3. O MODELO EXPERIMENTAL E O BANCO DE TESTES

Como mostrado nas fig. 90 e 91, o modelo experimental foi construído com 30 tubos de aço carbono (0,1%C) de comprimento útil de 1982 [mm], diâmetro interno de 20 [mm] e diâmetro externo de 36 [mm].

A disposição dos tubos mostra que a carcaça do armazenador e os espelhos dianteiro e trazeiro deixam folga de 1 [mm] entre os tubos, as paredes laterais, o fundo e a parte superior.

No projeto do armazenador, foi estabelecido na disposição dos tubos, que a seção total de passagem do fluido frio fosse igual a seção total de passagem do fluido quente, e a relação entre estas resultou o valor de 1,0746.

A carcaça do armazenador foi construída com chapa preta de aço com 1/8" de espessura, bem como os cabeçotes. Os espelhos foram feitos com chapa preta de aço com 1/4" de espessura conforme as figuras 92 e 93.

Para a medida da temperatura na superfície externa dos tubos, foram dispostos termopares tipo T (AWG 24), previamente calibrados.

Ao longo da superfície externa de um dos tubos foram dispostos 5 pontos de medida a cada 470,5 [mm], colocando-se os termopares extremos a 50 [mm] dos espelhos.

O fluido quente utilizado (THERMINOL 55), que escoava no interior dos tubos, circula num circuito fechado, intercalando-se resistências de aquecimento e tanque de resfriamento, monitorado por instrumentos de medida e controle de vazão e temperatura (fig. 95).

O fluido frio, que escoava em contra-corrente ao

fluido quente pela parte externa dos tubos é a água, que circula num circuito aberto, monitorado por instrumentos de medida e controle de vazão e medida de temperatura. (fig. 95).

Os ensaios foram realizados, mantendo-se todas as superfícies externas isoladas termicamente.

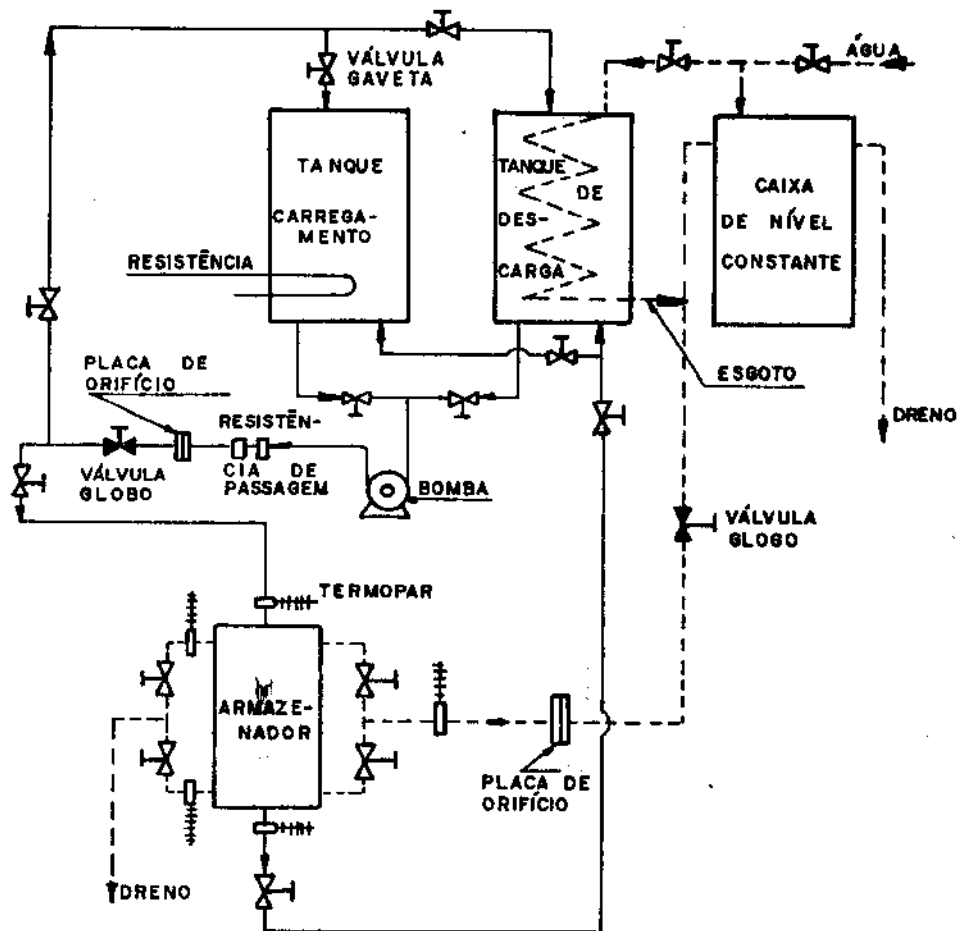


Figura 95 - Esquema do Banco de Testes

7.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos testes estão nas figuras 96, 97 e 98, que resumem os 3 ensaios realizados, e a tabela 27 mostra as grandezas envolvidas.

ENSAIO Nº	VAZÃO DO ÓLEO [KG/S]	VAZÃO DE ÁGUA [KG/S]	TEMPERATURA AM- BIENTE [°C]
12	0,07	0,10	24
13	0,07	0,06	24
14	0,05	0,05	26

TABELA 27 - Resumo das Grandezas dos Ensaios do Armazena-
dor Experimental.

As curvas nas figuras 96, 97 e 98 representam:

- Curva 1: temperatura do fluido quente no tanque de aquecimento.
- Curva 2: temperatura do fluido quente na entrada do armazenador.
- Curva 3: temperatura do fluido quente na saída do armazena-
dor.
- Curva 4: temperatura da superfície externa do tubo à 50 [mm]
do espelho dianteiro.
- Curva 5: temperatura da superfície externa do tubo à 50 [mm]
do espelho trazeiro.
- Curva 6: temperatura da água na saída do armazenador.

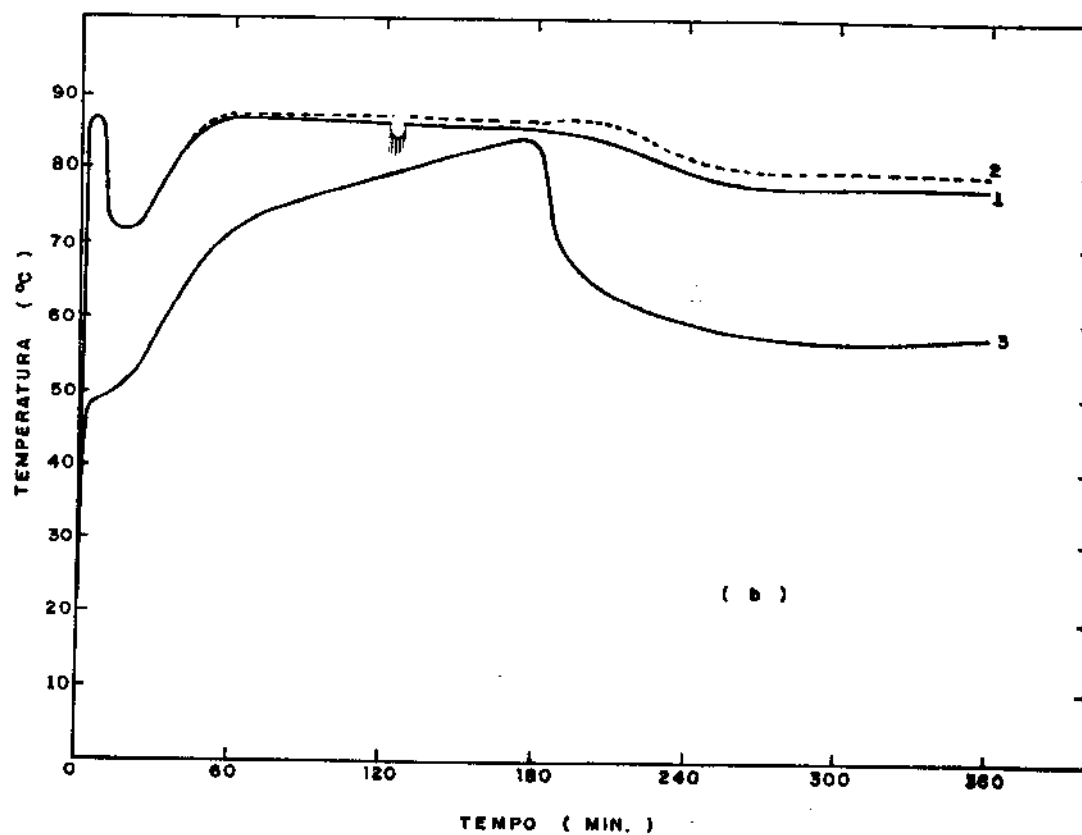
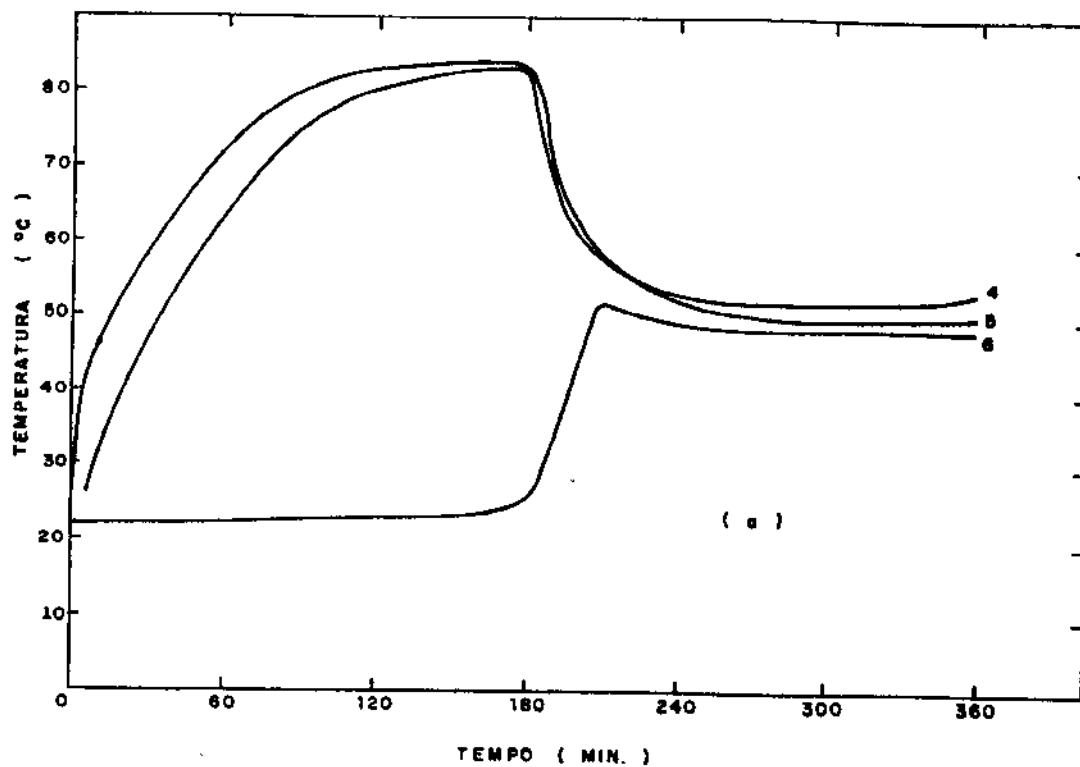


Figura 96 - Resultados do Ensaio nº 12

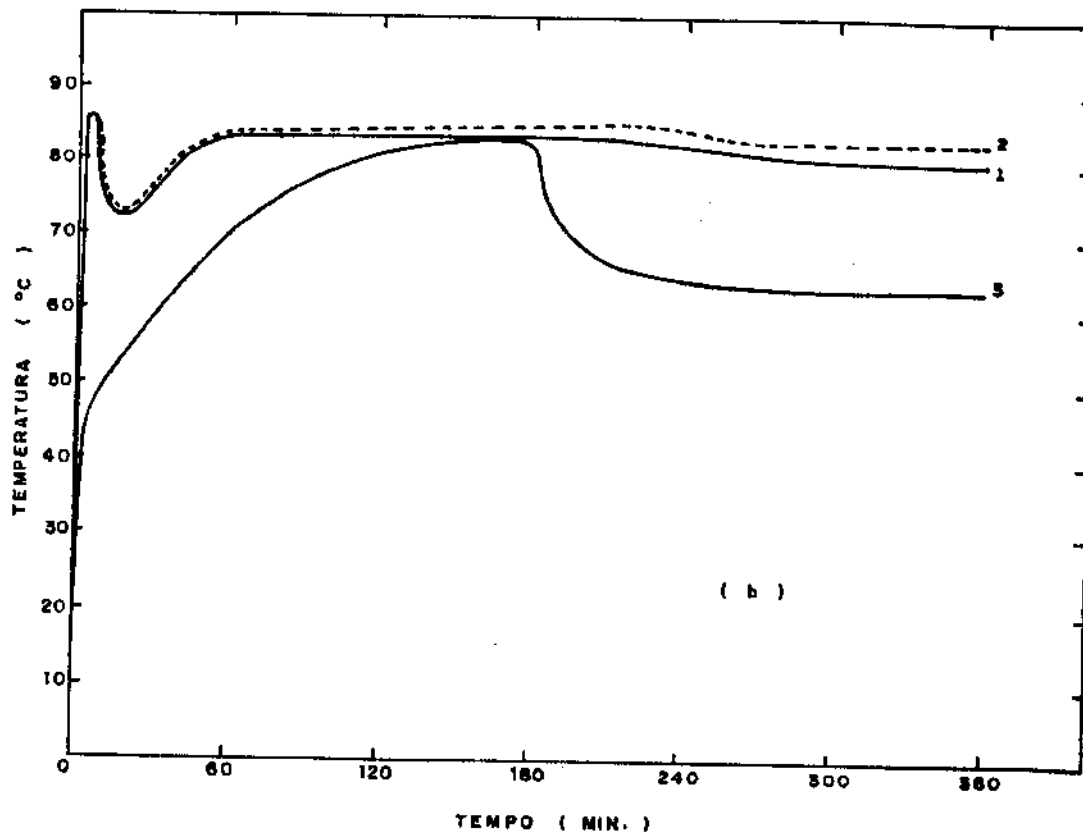
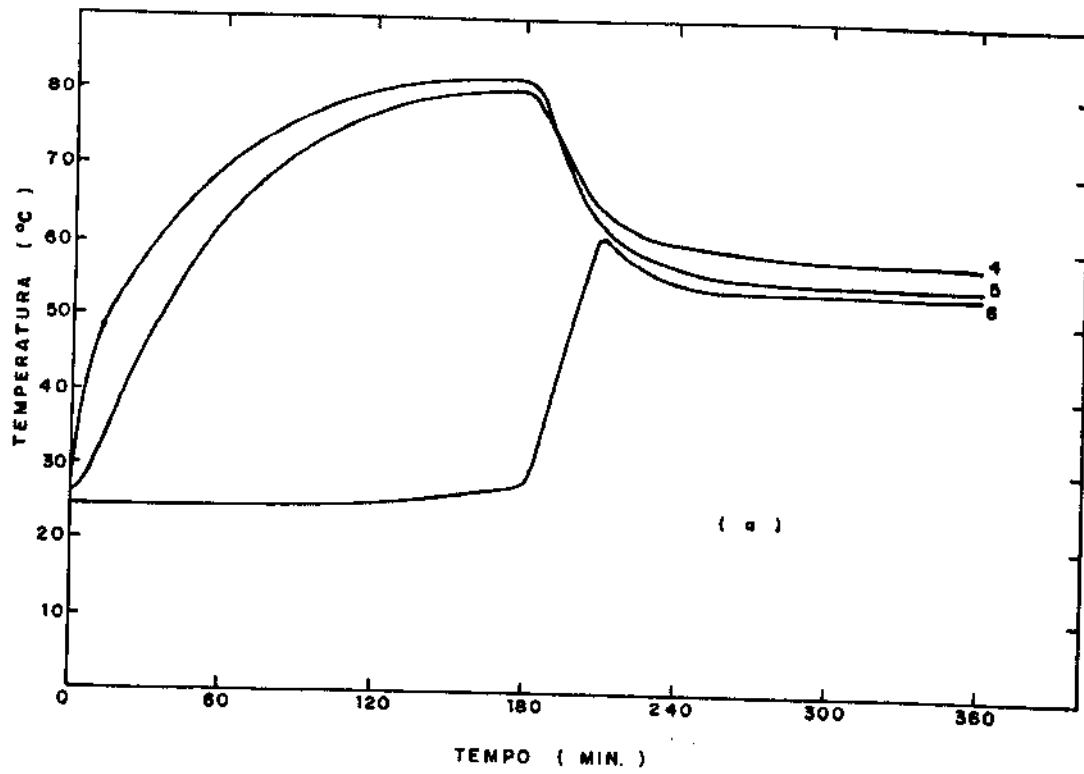


Figura 97 - Resultados do Ensaio nº 13

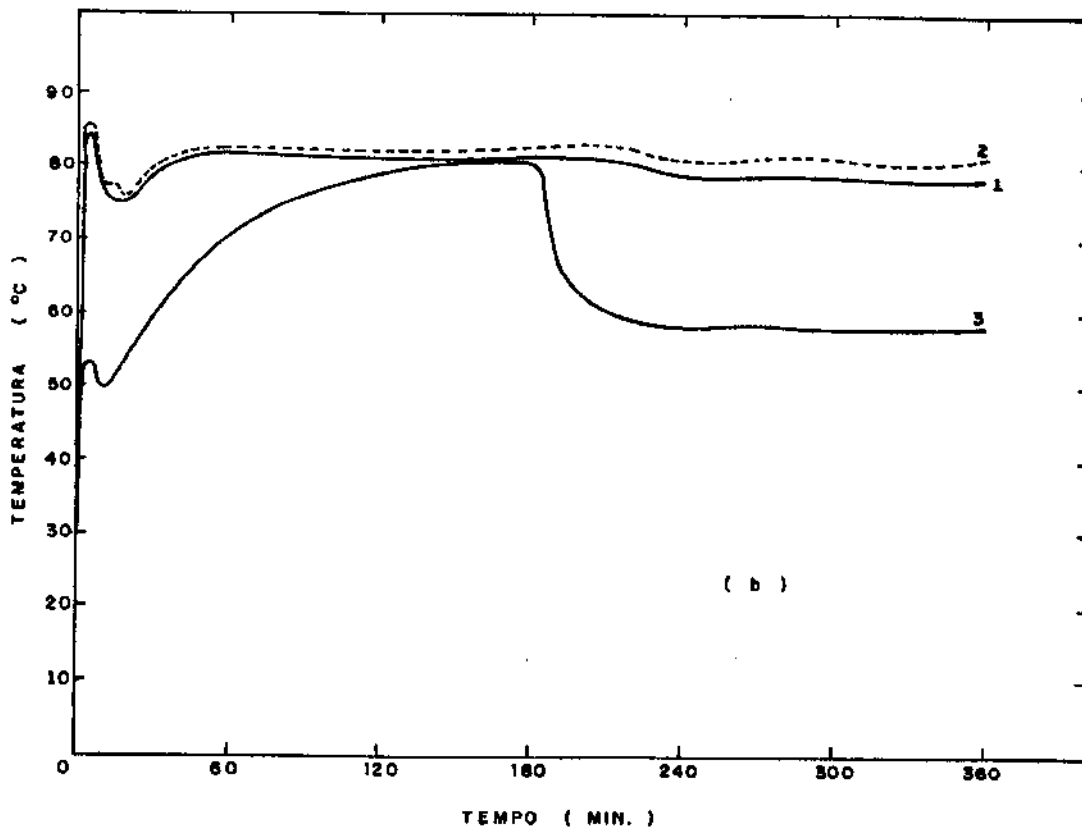
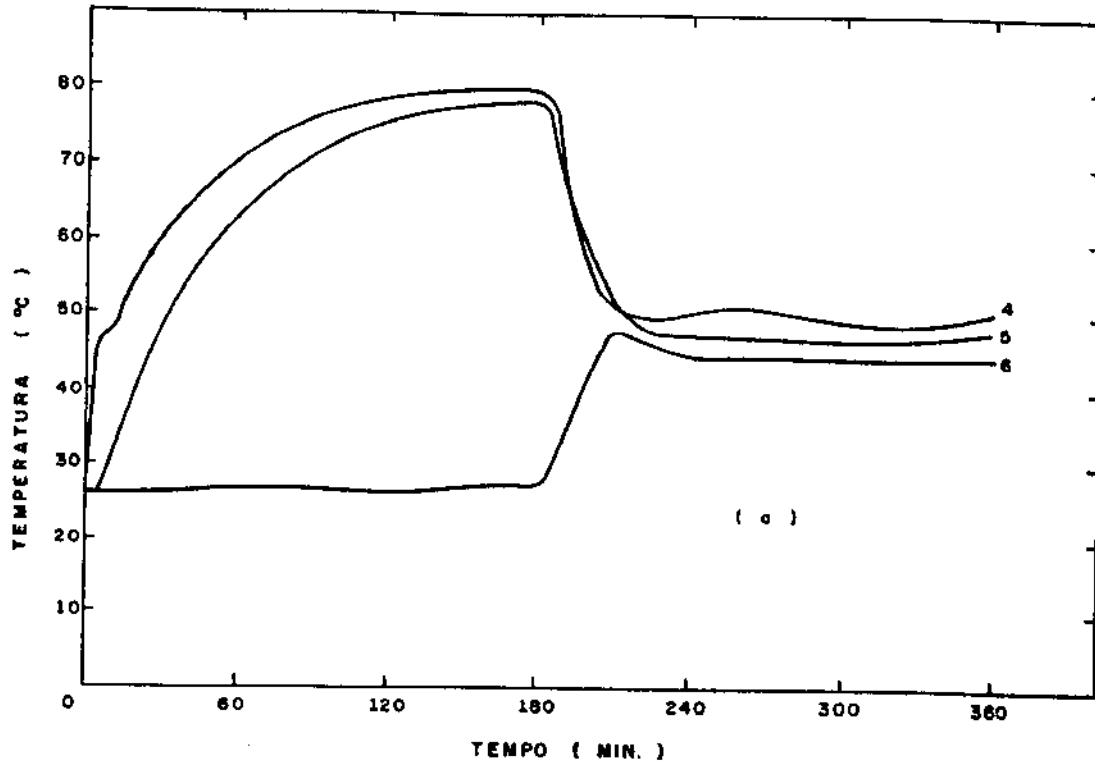


Figura 98 - Resultados do Ensaio nº 14

7.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para que se possa avaliar o modelo analítico proposto, escolhemos os valores experimentais do ensaio nº 14, e utilizamos para comparação com os resultados teóricos, que estão na fig. 99 e 100

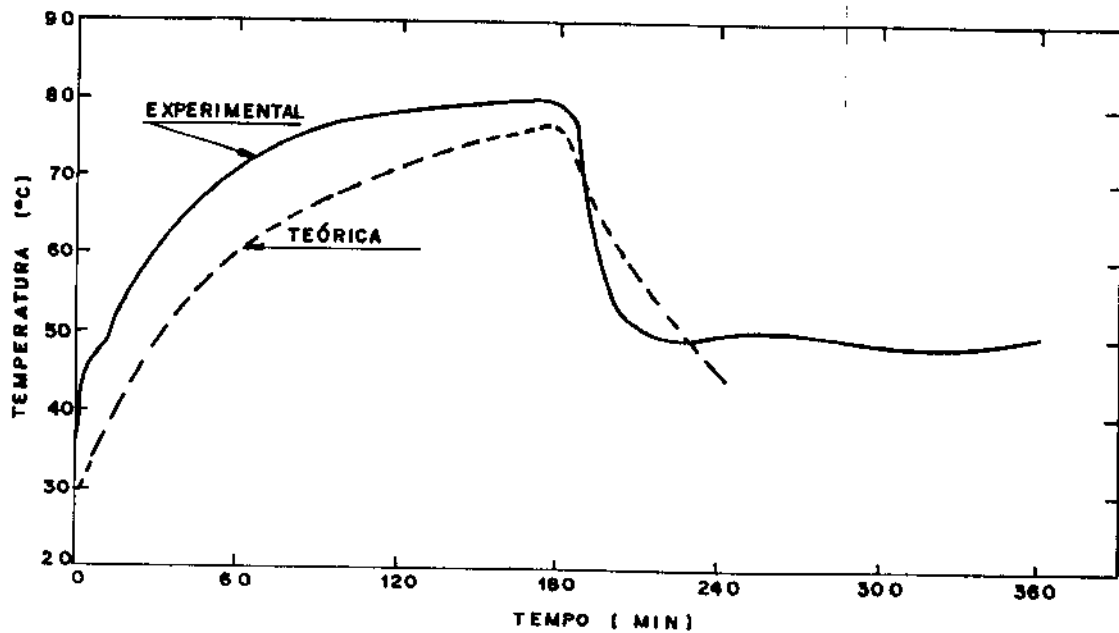


Figura 99 - Comparação dos Resultados para Temperatura da Superfície dos Tubos ϕ 50 (mm) do Espelho Dianteiro.

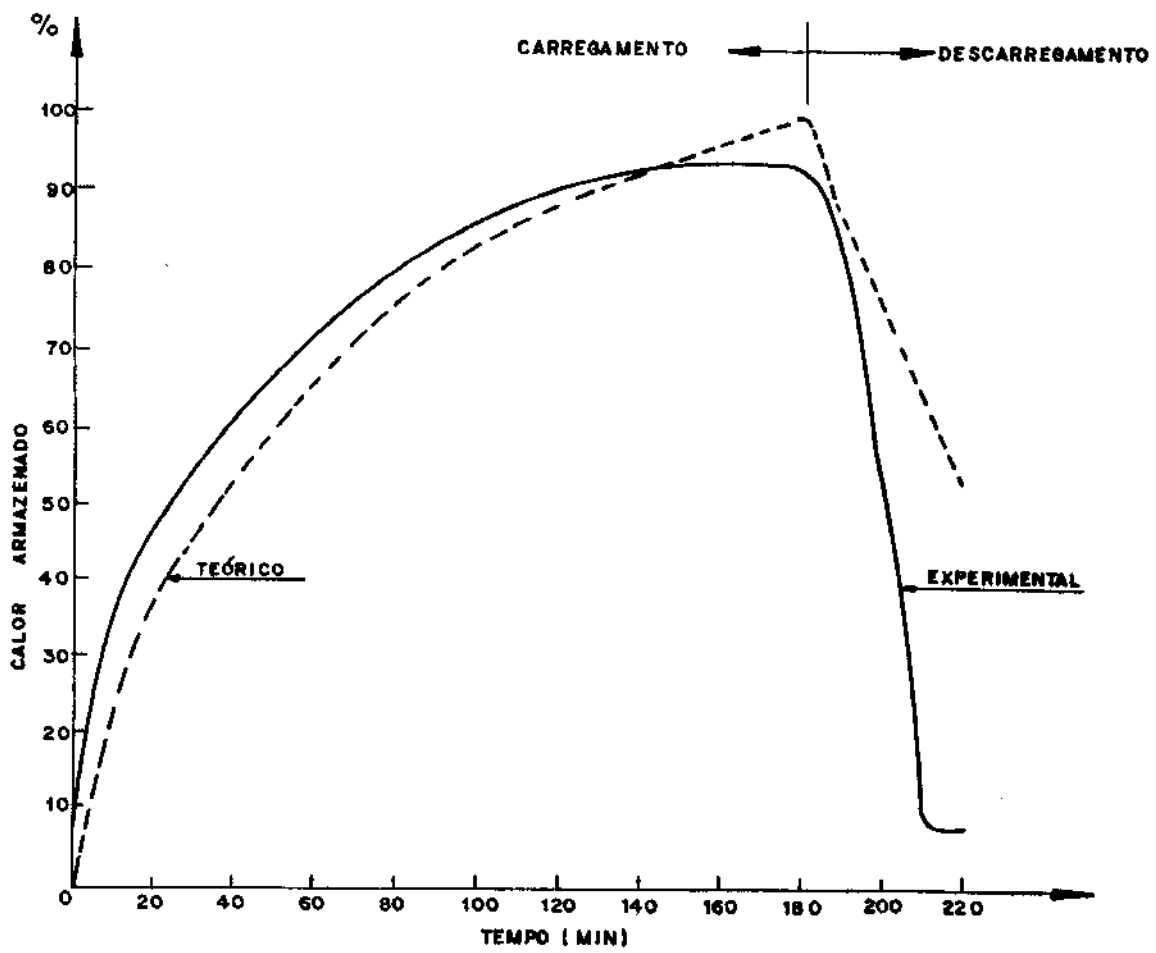


Figura 100 - Comparação do Calor Armazenado
Teórico e Experimental

7.6. DESEMPENHO DO ARMAZENADOR EXPERIMENTAL

Espessura do Isolante: 25 [mm]

Material Isolante: Lã de Vidro

Coeficientes de Condutibilidade Térmica do Isolante:

$$3,83 \times 10^{-2} \text{ [w/m}^\circ\text{C]}$$

Superfície Externa do Isolante: 2,058 [m²]

Capacidade Térmica do Material Armazenador:

$$4,07 \times 10^6 \text{ [J/m}^3 \text{ }^\circ\text{C]}$$

Volume do Material Armazenador: 41,84 x 10⁻³ [m³]

ITEM	UNIDADE	ENSAIO nº 14
$\bar{t}_0$	°C	21,0
$\bar{t}_2$	°C	79,0
Δt_1	°C	58,0
$\overline{t_{e1}}$	°C	38,6
$\overline{t_a}$	°C	26,0
Δt_2	°C	12,6
$\overline{t_{2e}}$	°C	79,6
$\overline{t_{2s}}$	°C	68,8
Δt_3	°C	10,8
θ_e	s	10.800
$\dot{m}_2$	Kg/s	0,050
ρ_2	Kg/m ³	840
c_2	J/Kg°C	2.183
$\bar{h}_c$	w/m ² °C	5,44
$\bar{h}_{ei}$	w/m ² °C	10,19
Q_{taxa}	w	914,52
Q_{pi}	w	264,30
Q_{TR}	w	1.178,82
ϵ	%	22,42

TABELA 28 - Resumo dos Valores para o Ensaio nº 14

7.7. DISCUSSÃO

Para análise deste tópico, tomaremos o ensaio nº 14, que se refere ao teste experimental do trocador-armazenador, para o qual calculamos alguns valores de parâmetros que completam os já apresentados nos gráficos e tabelas deste capítulo.

ITEM	UNIDADE	ENSAIO nº 14
$\bar{v}$	m/s	0,00632
Re	-	24,9
Pr	-	71,5
B_{iT}	-	0,00083
B_{iR}	-	0,00120
Nu	-	2,31
$\bar{h}_T$	W/m ² °C	8,32
$\bar{h}_R$	W/m ² °C	5,44
U	-	0,556
$\Delta\theta$	s	10.800

TABELA 29 - Valores Comparativos do Ensaio nº 14

- O valor da velocidade média de passagem do fluido quente, $\bar{v}$ é calculada para cada tubo bem como o coeficiente de película, nº de Reynolds, nº de Nusselt e nº de Biot;

- Da tabela 28, podemos verificar que para estes valores apresentados no ensaio, a energia não disponível do sistema armazenador $\bar{e}$ é de 22,42%, para uma superfície externa de troca de calor de 2,058 [m²];

- A relação S_{ei}/V , que é a razão entre a superfície externa do isolante pelo volume do material armazenador calculada, resultou o valor de 49,18. Este valor comparado com os da tabela 25, mostra que a perda realmente foi alta neste protótipo, devendo ser construída com carcaça externa circular;

- O comportamento da temperatura do material armazenador foi o esperado, conforme o que foi previsto nos testes individuais dos tubos armazenadores;

- Na fig. 98, onde estão as curvas representativas do ensaio nº 14, pode-se verificar o carregamento e o descarregamento da unidade armazenadora, verificando-se o descarregamento utilizando a mesma vazão do fluido quente, para a passagem do fluido frio. O fluido frio (água) tem capacidade térmica 3,2 vezes maior que o fluido quente utilizado (em média), portanto, justifica-se o fato do descarregamento ocorrer num tempo menor;

- A fig. 99, compara os valores teóricos e experimentais da temperatura da superfície de um tubo localizado no centro do armazenador, num determinado ponto a 50 (mm) do espelho dianteiro, e utilizamos esta figura para comparar o modelo teórico desenvolvido e justificando esta diferença pelo fato de que entre os tubos, durante o teste experimental, haverá água parada, o que favorece a retenção do calor, e este ser um tubo central;

- Verificando a fig. 100, podemos notar que para a média dos tubos, o calor armazenado teórico se aproxima mais do real, vindo a reforçar nossa análise anterior;

- Ainda na fig. 100, o pico de 100% não é atingido experimentalmente por razões de perdas, o que no modelo teórico foi considerado adiabático;

C A P I T U L O V I I I

A modelagem analítica escolhida com as respectivas suposições feitas foi testada e avaliada experimentalmente numa larga faixa de parâmetros operacionais. Os resultados obtidos mostram boa concordância e indicam que o modelo ê adequado para prever o comportamento do armazenador térmico.

Os materiais escolhidos para o armazenamento térmico, utilizados nos modelos experimentais, foram suficientes e adequados para que uma faixa de temperatura fosse abrangida e os resultados mostrados, evidenciam que os tempos de carregamento e descarregamento são fatores importantes na seleção do material armazenador.

O aço, um dos materiais utilizados como meio armazenador, ê um material encontrado com facilidade no mercado e muitas vezes disponível nas indústrias, e seu uso deve ser extendido também para a faixa de alta temperatura, pois neste campo a velocidade de corrosão ê menor e a resposta ã uma variação de temperatura do fluido transportador de calor ê rãpida.

O concreto, material de largo emprego na construção civil, responde ã variação de temperatura do fluido transportador de calor com moderada velocidade. Isto pode ser modificado, em uma faixa estreita, através da mudança da composição deste, ficando porêm a vantagem de sua forma poder ser moldada de acordo com o emprego desejado.

A metodologia empregada para o dimensionamento de uma unidade modular de armazenador térmico foi verificada e comprovada com medidas experimentais com boa concordância. Assim indicando que o método proposto é adequado para projetos de maior porte.

APÊNDICE 1

Listagem do Programa Computacional

1800/81700 FORTRAN COMPILER , MARK 7.) RD 06/10/78 17:51
MAGALHAES / TESE

THURSDAY

:E NO MAP

:FILE 6=IMPRESSORA,UNIT=PRINTER,UNLABELED

:C

:C

:C *** TRABALHO DE TESE DE DOUTORAMENTO ***

:C

:C

:C TITULO : ARMAZENAMENTO DE CALOR SENSIVEL EM SOLIDOS DE GEOMETRIA
:C CILINDRICA - ESCOAMENTO INTERNO

:C

:C

:C NOMENCLATURA DAS CONSTANTES DE ENTRADA:

:C

:C RI : RAO INTERNO DO TUBO (M)

:C RO : RAO EXTERNO DO TUBO (M)

:C XL : COMPRIMENTO DO TUBO (M)

:C AMF: MASSA DO FLUIDO ESCOANDO ($M^{*}3/S$)

:C CF : CALOR ESPECIFICO DO FLUIDO ($KJ/M^{*}3^{*}C$)

:C CM : CALOR ESPECIFICO DO MATERIAL ($KJ/KG^{*}C$)

:C AKM: CONDUTIBILIDADE TERMICA DO MATERIAL ($KJ/S^{*}M^{*}C$)

:C OM : DENSIDADE DO MATERIAL ($KG/M^{*}3$)

:C HI : COEFICIENTE DE CONVECCAO INTERNO ($KJ/M^{*}2^{*}S^{*}C$)

:C V : VELOCIDADE DO FLUIDO (M/S)

:C TF : TEMPERATURA DO FLUIDO DENTRO DO TUBO (ADIMENSIONAL)

:C TM : TEMPERATURA DO MATERIAL (ADIMENSIONAL)

:C TFUI: TEMPERATURA DO FLUIDO NA ENTRADA DO TUBO NO TEMPO ZERO (C)

:C TC : TEMPERATURA DO MATERIAL NO TEMPO ZERO (C)

:C TI : INTERVALO DE TEMPO IMPRESSO , ENTRE DUAS TABELAS (SEG)

:C TFI: TEMPO FINAL DE IMPRESSAO (SEG)

:C DT : INCREMENTO DE TEMPO (SEG)

:C M : NUMERO DE ESTACOES NO COMPRIMENTO DO TUBO

:C N : NUMERO DE DIVISOES DO RAO DO TUBO

:C

:C

:C

: DIMENSION TM(13,11),TM(13,11),TF(12),TF(12),QPE(20000),

: *HI(12),CF(12),CM(12),TP(12),RE(12),TMXR(12,12),

: *CP(12),PR(12),QF(12),STMXR(12),STM(12),VF(12),Q(40)

: REAL NU(12),KF(12),NI(12),MIF(12),MIFP(12),KTF(12,12)

: DATA TMXR,STMXR,STM,VF,NI,MIF,MIFP,KTF,TFUI/361*0.7

:C

:C

:C DADOS DE ENTRADA

:C

: RI=.014

: RO=.024

: XL=1.04

: AMF=.0005

: CF=1833.7

: CM=.465

: AKM=.054

: OM=7840.

: HI=.637

: V=.796

: TFUI=92.

: TC=23.

: TI=.12

: TFI=.24

: DT=.06

: M=11

: N=11

:C

:C

:C

```
:C INICIO DOS CALCULOS
```

```
:C
:   TD=TFUI-TC
:   AUX=4.*AMF/(6.28*RI)
:   ANX=FLOAT(M)
:   ANR=FLOAT(N)
:   L=FIX(TI/DT)
:   NT=FIX(TFI/TFI)
:   TR=0.
:   TF1(1)=1.
:   TF(1)=1.
:   S2=RO-RI
:   S=ANR-1.
:   ALFA=AKM/(CM*DM)
:   S1=((S**2)*ALFA)/(2.*S2)
:   QMAX=DM*CM*3.1415*(RO**2-RI**2)*XL*TD
:   DQS=6.28*RI*HI*XL/(AMF*CF*(ANX-1.))
:   U=RI/RO
:   A=((ANX-1.)/XL)**2*ALFA
:   B=((ANR-1.)/(RO-RI))**2*ALFA
:   C=(HI*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
:   WRITE(6,73) RI,RO,XL,APF,CF,CM,AKM,DM,HI,V,TFUI,TD,TI,TFI,DT,M,N
:   WRITE(6,83)
:   WRITE(6,3) DQS,ALFA,U,A,B,C
```

```
:C
```

```
:C
```

```
:C DISTRIBUICAO E IMPRESSAO DA TEMPERATURA INICIAL
```

```
:C
```

```
:   WRITE(6,13) TR
:   WRITE(6,33) (LX,LX=1,N)
:   DO 10 I=1,M
:   DO 11 J=1,N
:   TM(I,J)=0.
:   TF(I+1)=DQS*(TM(I,J)-TF(I))+TF(I)
: 11 CONTINUE
:   WRITE(6,23) I,TF(I),(TM(I,JX),JX=1,N)
: 10 CONTINUE
:   WRITE(6,63)
```

```
:C
```

```
:C
```

```
:C MONTAGEM DAS TABELAS
```

```
:C
```

```
:   DO 20 KK=1,NT
:   XKK=FLOAT(KK)
:   TR=XKK*TI
:   WRITE(6,13) TR
:   WRITE(6,33) (LL,LL=1,N)
:   DO 30 K=1,L
:   DO 40 J=1,N
:   IF(J.EQ.N) GO TO 19
:   IF(J.NE.1) GO TO 29
```

```
:C
```

```
:C
```

```
:C CALCULO DA TEMP. DO MATERIAL E DO FLUIDO NA SUP. INTERNA
```

```
:C
```

```
:   TM(M+1,1)=TM(M,1)
:   TM(M+2,1)=TM(M,1)
:   CALL HCCAMF,RI,TF,TM,TD,TD,XL,AUX,M,N,TGF,TP,
:   RE,NU,HI1,CP,KE,PR,CF1,DF)
:   DO 50 I=1,M
:   CT=(HI1(I)*(1.-U))/((RO-RI)*DM*CM*U)
:   TM1(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(A*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J))+TM
:   *(I+2,J))+B*(TM(I,J+2)-2.*TM(I,J+1)+TM(I,J))-CT*
:   *(TF(I)-TM(I,J)))
```

```
:C
```

```
:C
```

```

:      QGS1=6.28*PI*FI(I)*XL/(AMF*CF1(I)*CF(I)*(ANX+1.))
:      TF1(I+1)=QGS1*(TM(I,J)-TF(I))+TF(I)
:      IF(I.NE.N) GO TO 50
: 50 CONTINUE
:      GO TO 40
:
:
:      DISTRIBUICAO DE TEMPERATURA DENTRO DO MATERIAL
:
: 20 XJ=FLOAT(J+1)
:      D=S1/(RI+S2*XJ)
:      TM(M+1,J)=TM(M,J)
:      TM(M+2,J)=TM(M,J)
:      DO 60 I=1,N
:          TM(I,J)=TM(I,J)+DT*ABS(A*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
:      *TM(I+2,J))+S*(TM(I,J+1)-2.*TM(I,J)+TM(I,J-1))
:      *D*(TM(I,J+1)-TM(I,J-1)))
: 60 CONTINUE
:      GO TO 40
:
:
:      CALCULO DA TEMPERATURA DO LADO ISOLADO
:
: 10 TM(M+1,J)=TM(M,N)
:      TM(M+2,J)=TM(M,N)
:      DO 140 I=1,N
:          TM(I,J)=TM(I,J)+DT*(A*(TM(I,J)-2.*TM(I+1,J)+
:      *TM(I+2,J))+S*(TM(I,J)-2.*TM(I,J-1)+TM(I,J-2)))
: 140 CONTINUE
: 40 CONTINUE
:
:
:      CALCULO DO CALOR ARMAZENADO
:
:      CALL CALCULO(TD,N,XL,RI,S2,S,TF1,ANX,DM,CM,M,QPX)
:      QPE(K)=QPX
:      DO 130 I=1,N
:      DO 130 J=1,N
:          TM(I,J)=TM(I,J)
:          TF(I)=TF1(I)
: 130 CONTINUE
: 30 CONTINUE
:      Q(KK)=QPE(L)*100./QMAX
:
:
:      IMPRESSAO DOS RESULTADOS
:
:      DO 90 I=1,N
:      WRITE(6,23) I,TF(I),(TM(I,J2),J2=1,N)
: 90 CONTINUE
:      WRITE(6,43) Q(KK)
:      DO 99 I=1,N
:      WRITE(6,53) I,FI(I),FE(I),NU(I),CP(I),PR(I)
: 99 CONTINUE
:      WRITE(6,63)
: 20 CONTINUE
: 3 FORMAT(///,5X,'QGS =',2X,F15.8,///,5X,'ALFA=',2X,F15.8,
: 1//,5X,'L =',2X,F15.8,///,5X,'A =',2X,F15.8,///,5X,'B =',2X,
: 1F15.8,///,5X,'C =',2X,F15.8,///,1H1)
: 13 FORMAT(2(/),7X,'NO INSTANTE=',2X,F9.3,1X,'SEG',
: 15(/),40X,'TEMPERATURA DO MATERIAL',/)
: 23 FORMAT(1X,I2,2X,F7.5,3X,11(1X,F7.5),/)
: 33 FORMAT(//,9X,'TF',9X,11(I2,6X),/)
: 43 FORMAT(//3X,'CALOR ARMAZENADO=',F10.4,'%',//9X,'FI',8X,'FE',8X,
: 1'NU',8X,'CP',8X,'PR',/)
:
:

```

```

:0
: 53 FORMAT(3X,'2',2X,'(E9.3,1X),')
: 63 FORMAT(1H1)
: 73 FORMAT(5(//),30X,'O A D G S      ) E      E A T R A C A',4(//),5X,'RI =:
:   ',F9.3,9X,'OU =',F9.3,9X,'XL =',F9.3,9X,'AMF =',F10.4,3(//),5X, :
:   ',CF =',F9.3,9X,'CM =',F9.3,9X,'AKM =',F9.3,9X,'CM =',F9.3,3(//),:
:   ',5X,'HI =',F9.3,9X,'V =',F9.3,9X,'TFUI=',F9.3,9X,'TC =',F9.3, :
:   ',3(//),5X,'II =',F9.3,9X,'TFI =',F9.3,5X,'CT =',F9.3,5X,'M =', :
:   ',F9.3,9X,'A =',F9.3,7(//))
: 83 FORMAT(37X,'R E S U L T A ) O S',3(//),5X,'VARIAVEIS DE CONTROLE') :
:   STOP
:   END

```

NO NO WARNINGS IN 119 STATEMENTS, CODE EMITTED = 26614 BITS (3327 BYTES)OTE
E IS 1 MINUTE AND 53.6 SECONDS FOR 203 CARDS AT 135 CARDS/MINUTE.

1800/31700 FORTRAN COMPILER , MARK 7.0 RD 06/15/78 13:51 , THURSDAY
MAGALHAES /TESE

```

:   SUBROUTINE HCCAMF,RI,TF,FM,TD,TC,XL,AUX,M,N,
:   ,TBF,TP,RE,VU,HI1,CP,KF,PR,CF1,DF)
:0
:0
:0   ESTA SUBROTINA CALCULA O COEFICIENTE DE CONVECAO PARA CADA
:0   INCREMENTO NO COMPRIMENTO DO TUBO , E PARA CADA INTERVALO
:0   DE TEMPO.
:0
:0
:0   REAL NI(12),MIFP(12),MIF(12),KF(12),VU(12)
:0   DIMENSION TFX(12),TMXR(12,12),TBF(12),TP(12),
:0   ,RE(12),HI1(12),CP(12),PR(12),CF1(12),DF(12),TF(12),FM(12,1)
:0   DO 10 II=1,M
:0   TFX(II)=TF(II)*TD+TC
:0   TMXR(II,1)=FM(II,1)*TD+TD
:0 10 CONTINUE
:0   TFX(M+1)=TFX(M)
:0   TMXR(M+1,1)=TMXR(M,1)
:0   DO 20 II=1,M
:0   TBF(II)=(TFX(II)+TFX(II+1))/2.
:0   TP(II)=(TMXR(II,1)+TMXR(II+1,1))/2.
:0   NI(II)=(72.72-1.135*TBF(II)+.646E-2*TBF(II)**2.)*1.E-6
:0   RE(II)=AUX/NI(II)
:0   MIFP(II)=(.46836-.1053E-2*TP(II)+.4104E-5*TP(II)**2)
:0   MIF(II)=(.46836-.1053E-2*TBF(II)+.4101E-5*TBF(II)**2)
:0   CP(II)=1.834+.003699*TBF(II)
:0   DF(II)=903.-.6706*TBF(II)
:0   KF(II)=(.1394+.9681E-4*TBF(II))*1.E-3
:0   CF1(II)=CP(II)*DF(II)
:0   PR(II)=CP(II)*MIF(II)/KF(II)
:0   Z1=(RE(II)*PR(II))**.333
:0   Z2=(2.*RI/XL)**.333
:0   Z3=(MIF(II)/MIFP(II))**.14
:0   VU(II) = 1.86*71*Z2*Z3
:0   HI1(II)=VU(II)*KF(II)/(2.*RI)
:0 20 CONTINUE
:0   RETURN
:0   END

```

NO NO WARNINGS IN 29 STATEMENTS, CODE EMITTED = 6214 BITS (777 BYTES)NO
E IS 40.1 SECONDS FOR 33 CARDS AT 57 CARDS/MINUTE.

0 NO WARNINGS IN 29 STATEMENTS, CODE EMITTED = 4327 BITS (541 BYTES) CALOR
IS 44.2 SECONDS FOR 75 CARDS AT 49 CARDS/MINUTE.

APÊNDICE 2

Obtenção das Equações (120), (121) e (122)

APÊNDICE 2

a) Para o fluido frio:

$$\rho_1 c_1 S_p \left(\frac{\partial t_1}{\partial \tau} - v_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \right) = h_1 2 \pi r_{ex} (t_{ex} - t_1) \quad (105)$$

Para:

$$T_{ex} = \frac{t_{ex} - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad \therefore \quad t_{ex} = T_{ex} (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \quad (126)$$

$$T_1 = \frac{t_1 - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad \therefore \quad t_1 = T_1 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \quad (127)$$

$$X^* = \frac{x}{L} \quad \therefore \quad x = X^* L \quad (113)$$

Substituindo (113), (126) e (127) em (105), temos:

$$\rho_1 c_1 S_p \frac{\partial}{\partial \tau} \left[T_1 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \right] - \rho_1 c_1 S_p v_1 \frac{\partial}{\partial (X^* L)} \left[T_1 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \right] = h_1 2 \pi r_{ex} \left[T_{ex} (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} - T_1 (t_{2e} - t_{1e}) - t_{1e} \right]$$

$$\text{ou } \rho_1 c_1 S_p (t_{2e} - t_{1e}) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} - \frac{\rho_1 c_1 S_p v_1}{L} (t_{2e} - t_{1e}) \frac{\partial T_1}{\partial X^*} =$$

$$= h_1 2 \pi r_{ex} (t_{2e} - t_{1e}) (T_{ex} - T_1)$$

$$\text{ou } \rho_1 c_1 S_p \frac{\partial T_1}{\partial \tau} - \frac{\rho_1 c_1 S_p v_1}{L} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = h_1 2 \pi r_{ex} (T_{ex} - T_1)$$

ou

$$\frac{\rho_1 c_1 S_p}{h_1 2 \pi r_{ex}} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} - \frac{\rho_1 c_1 S_p v_1}{2 \pi r_{ex} L h_1} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = T_{ex} - T_1 \quad (128)$$

Fazendo,

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{r_{ex}^2 - r_i^2} \quad \therefore \quad \tau = \frac{F_0}{\alpha} (r_{ex}^2 - r_i^2) \quad (112)$$

$$\alpha = \frac{K_m}{\rho_m c_m} \quad (129)$$

$$B_1 = \frac{h_1 (r_{ex} - r_i)}{K_m} \quad (110)$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 v_1 S_p \quad \text{onde } S_p = \pi (r_p^2 - r_{ex}^2) \quad (130)$$

$$E_1 = \dot{m}_1 c_1 \quad (131)$$

$$P_1 = 2 \pi r_{ex} \quad (132)$$

$$G_1 = \frac{P_1 K_m}{E_1} \quad (117)$$

e substituindo em (128), temos:

$$\frac{\rho_1 c_1 S_p}{h_1 2 \pi r_{ex}} \frac{\partial T_1}{\partial \left[\frac{F_0}{\alpha} (r_{ex}^2 - r_i^2) \right]} - \frac{\rho_1 c_1 S_p v_1}{2 \pi r_{ex} L h_1} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = T_{ex} - T_1$$

ou

$$\frac{\rho_1 c_1 S_p \alpha}{h_1 2 \pi r_{ex} (r_{ex}^2 - r_i^2)} \frac{\partial T_1}{\partial F_0} - \frac{\rho_1 c_1 S_p v_1}{2 \pi r_{ex} L h_1} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = T_{ex} - T_1$$

ou

$$\frac{\alpha}{G_1 B_1 (r_{ex} + r_i) v_1} \frac{\partial T_1}{\partial F_0} - \frac{E_1}{2 \pi r_{ex} L h_1} \frac{\partial T_1}{\partial X^*} = T_{ex} - T_1 \quad (120)$$

b) Para o fluido quente:

$$\rho_2 c_2 S_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial \tau} + v_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \right) = h_2 2 \pi r_i (t_i - t_2) \quad (107)$$

Para:

$$T_i = \frac{t_i - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad \therefore \quad t_i = T_i (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \quad (133)$$

$$T_2 = \frac{t_2 - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad \therefore \quad t_2 = T_2 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \quad (134)$$

Substituindo (113), (133) e (134) em (107), temos:

$$\begin{aligned} \rho_2 c_2 S_2 \frac{\partial}{\partial \tau} \left[T_2 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \right] + \frac{\rho_2 c_2 S_2 v_2}{L} \frac{\partial}{\partial X^*} \left[T_2 (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \right] \\ = 2 \pi r_i h_2 \left[T_i (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} - T_2 (t_{2e} - t_{1e}) - t_{1e} \right] \end{aligned}$$

$$\text{ou } \rho_2 c_2 S_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + \frac{\rho_2 c_2 S_2 v_2}{L} \frac{\partial T_2}{\partial X^*} = 2 \pi r_i h_2 (T_i - T_2)$$

$$\text{ou } \frac{\rho_2 c_2 S_2}{h_2 2 \pi r_i} \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + \frac{\rho_2 c_2 S_2 v_2}{2 \pi r_i L h_2} \frac{\partial T_2}{\partial X^*} = T_i - T_2 \quad (135)$$

Fazendo,

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{r_{ex}^2 - r_i^2} \quad . \quad \tau = \frac{F_0}{\alpha} (r_{ex}^2 - r_i^2) \quad (112)$$

$$\alpha = \frac{K_m}{\rho_m c_m} \quad (129)$$

$$B_2 = \frac{h_2 (r_{ex} - r_i)}{K_m} \quad (111)$$

$$\dot{m}_2 = \rho_2 v_2 S_2 \quad \text{onde} \quad S_2 = \pi r_i^2 \quad (136)$$

$$E_2 = \dot{m}_2 c_2 \quad (137)$$

$$P_2 = 2 \pi r_i \quad (138)$$

$$G_2 = \frac{P_2 K_m}{E_2} \quad (118)$$

Substituindo em (135), e simplificando temos:

$$\frac{\alpha}{G_2 B_2 (r_{ex} + r_i) v_2} \frac{\partial T_2}{\partial F_0} + \frac{E_2}{2 \pi r_i L h_2} \frac{\partial T_2}{\partial X^*} = T_i - T_2 \quad (121)$$

c) Para o material armazenador

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \quad (106)$$

Para;

$$T_m = \frac{t_m - t_{1e}}{t_{2e} - t_{1e}} \quad \therefore \quad t_m = T_m (t_{2e} - t_{1e}) + t_{1e} \quad (139)$$

$$F_c = \frac{\alpha \tau}{r_{ex}^2 - r_i^2} \quad \therefore \quad \tau = \frac{F_0}{\alpha} (r_{ex}^2 - r_i^2) \quad (112)$$

$$R^* = \frac{r}{r_{ex} - r_i} \quad \therefore \quad r = R^* (r_{ex} - r_i) \quad (114)$$

$$X^* = \frac{x}{L} \quad \therefore \quad x = X^* L \quad (113)$$

$$U = \frac{r_{ex}}{r_i} \quad (119)$$

$$D = \frac{r_{ex} - r_i}{L} \quad (115)$$

que substituídos em (106) e simplificando, temos:

$$\frac{U - 1}{U + 1} \frac{\partial T_m}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 T_m}{\partial R^{*2}} + \frac{1}{R^*} \frac{\partial T_m}{\partial R^*} + D^2 \frac{\partial^2 T_m}{\partial X^{*2}} \quad (122)$$

APÊNDICE 3

Avaliação do Erro Relacionado à Taxa
de Acumulação de Energia pelo Fluido

APÊNDICE 3

A equação (7) foi obtida, quando desprezamos o último termo da equação (6), o qual representava a taxa de acumulação de energia pelo fluido. A magnitude deste termo pode ser determinada através de uma investigação do comportamento do balanço energético quando não negligenciamos a grandeza desta taxa, e este procedimento nos leva às seguintes passagens matemáticas:

$$\dot{m}_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{h \, 2 \pi r_i L}{L} (t_m - t_f) - \pi r_l^2 \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \theta} \quad (140)$$

$$\text{ou} \quad \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{2 \pi r_i h}{\dot{m}_f c_f} (t_m - t_f) - \pi r_l^2 \frac{\rho_f}{\dot{m}_f} \frac{\partial t_f}{\partial \theta} \quad (141)$$

Adimensionalizando a equação (141) com o auxílio de (15), (16), (21), (37) e (50), obtemos:

$$\begin{aligned} (t_{fi} - t_0) \frac{h(2 \pi r_l)}{\dot{m}_f c_f} \frac{\partial T_f}{\partial \xi} &= \frac{2 \pi r_l h}{\dot{m}_f c_f} (t_{fi} - t_0)(T_m - T_f) - \\ &- \frac{\pi r_l^2 \rho_f c_f (t_{fi} - t_0) 2 h U}{\dot{m}_f c_f (r_2 - r_1)(1+U) \rho_m c_m} \frac{\partial T_f}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (142)$$

O qual resulta em:

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f - \frac{r_l}{r_2 - r_1} \frac{U}{1+U} \frac{\rho_f c_f}{\rho_m c_m} \frac{\partial T_f}{\partial \eta} \quad (143)$$

Comparando as equações (26) e (143), observamos que o termo adimensional $\frac{r_1}{r_2 - r_1} \frac{U}{1 + U} \frac{\rho_f c_f}{\rho_m c_m} \frac{\partial T_f}{\partial \eta}$, será o

fator que influenciará a magnitude do erro introduzido quando não negligenciamos a taxa de acumulação de energia pelo fluido.

Para que se possa avaliar esta grandeza, retiramos os valores necessários para o cálculo, dos ensaios realizados com os modelos. Para o conjunto armazenador aço-óleo, o termo de acumulação resultou aproximadamente 14,5% e para o conjunto armazenador concreto-ar, resultou aproximadamente 1,5%, do calor total entregue ao armazenador.

BIBLIOGRAFIA

1. M.M.E.-SETEC, "Balanço de Energia Útil", Dezembro 1984.
2. Boelter, L.M.K., V.H. Cherry, H.A. Johnson, e R.C. Marti - nelli. "Heat Transfer Notes", McGraw-Hill, New York, 1965.
3. Gröber, H., S. Erk, e V. Grigull. "Fundamentals of Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, 1961.
4. Szego, J., e F.W. Schmidt. "Analysis of the Effects of Finite Conductivity in the Single Blow Heat Transfer Unit", J. Heat Transfer, vol. 100, 1978.
5. Schmidt, F.W., e J. Szego. "Transient Response of Solid - Sensible Heat Thermal Storage Units-Single Fluid", J. Heat Transfer, vol. 98, 1976.
6. Arpaci, V.S. "Conduction Heat Transfer", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1966.
7. Kays, W.M., e M.E. Crawford. "Convective Heat and Mass Transfer", 2.^a ed., McGraw-Hill, New York, 1980.
8. Reay, D.A. "Industrial Energy Conservation", Pergamon Press, Oxford, 1977.
9. Bird, R.B., W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. "Fenômenos de Transporte", Editorial Revertê, Barcelona, 1980.
10. Carslaw, H.S., e J.C. Jaeger. "Conduction of Heat in Solids", 2.^a ed., Oxford University Press, London, 1959.
11. Kays, W.M. "Convective Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, New York, 1966.
12. Carnahan, B., H.A. Luther, e J.O. Wilkes. "Applied Numerical Methods", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

13. Patankar, S. V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York, 1980.
14. Smith, G.D. "Numerical Solution of Partial Differential Equations", Oxford University Press, London, 1965.
15. Richtmeyer, R.D. "Difference Methods for Initial Value Problems", Interscience Publishers, Inc., New York, 1957.
16. Ozisik, M.N. "Boundary Value Problems of Heat Conduction", International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania, 1968.
17. ASTM. "Manual on the use of thermocouples in temperature measurement", ASTM Special Technical Publication 470A, Philadelphia, 1974.
18. Benedict, R.P. "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements", 2^a ed., John Wiley & Sons, New York, 1977.
19. Sieder, E.N., e C.E. Tate. "Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes", Ind. Eng. Chem., vol. 28, 1936.
20. Hausen, H. "Darstellung des Wärmeüberganges in Rohren durch verallgemeinerte Potenzbeziehungen", Z. VDI. Beih. Verfahrenstech. 4, 1943.
21. Sleicher, C.A., e M.W. Rouse. "A Convenient Correlation for Heat Transfer to Constant and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 18, 1975.
22. Boelter, L.M.K., G. Young, e H. W. Iversen. "Distribution of Heat Transfer Rate in the Entrance Section of a Circular Tube", NACA TN 1451, Washington, July 1948.

23. Hill, J.E., G.E. Kelly, e B.A. Peavy. "A Method of Testing
for Rating Thermal Storage Devices Based on Thermal
Performace", Solar Energy, vol. 19, 1977.

ÍNDICE

	PÁGINA
AGRADECIMENTOS	ii
DEDICATÓRIA	iii
SUMÁRIO	iv
SINOPSE	v
ABSTRACT	vi
SIMBOLOGIA	vii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 Generalidades históricas	1
1.2 Identificação do problema	2
1.3 Fatores influentes na definição do modelo	4
 CAPÍTULO 2 - A MODELAGEM TEÓRICA	
2.1 Descrição teórica do fenômeno	8
2.2 Equações utilizadas na modelagem	9
2.3 Condições iniciais e de contorno	12
2.4 Adimensionalização das equações	13
 CAPÍTULO 3 - O MÉTODO NUMÉRICO E COMPUTACIONAL	
3.1 Estabelecimento do reticulado	24
3.2 Obtenção das equações de diferenças	26
3.3 As equações das diferenças finitas para cada condição de contorno	32
3.4 Verificação das condições de erros e estabi- lidade do método explícito utilizado	35
3.5 O programa computacional	39

CAPÍTULO 4 - A MODELAGEM FÍSICA E O MÉTODO DOS TESTES

4.1 Seleção e fabricação dos modelos	40
4.2 A distribuição dos pontos de medida de temperatura nos modelos	44
4.3 Seleção e calibração dos medidores de temperatura e vazão	46
4.4 Os bancos e o método dos testes	47

CAPÍTULO 5 - ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CALOR ARMAZENADO

5.1 Determinação do coeficiente de película	53
5.2 Roteiro de cálculos para o modelo teórico	55
5.3 Roteiro de cálculos para o modelo físico	56
5.4 Determinação do desempenho do armazenador	57

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resumo das características dos modelos	58
6.2 Resultados dos ensaios dos modelos aço-óleo	58
6.3 Resultados dos ensaios dos modelos concreto-ar	90
6.4 Resultados do modelo teórico	111
6.5 Resumo dos ensaios e comparação dos resultados	129
6.6 Desempenho dos armazenadores	136
6.7 Discussão	140

CAPÍTULO 7 - PROJETO ANALÍTICO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO

7.1 Introdução	147
----------------	-----

	PÁGINA
7.2 O modelo analítico proposto	151
7.3 O modelo experimental e o banco de testes	157
7.4 Resultados dos ensaios experimentais	159
7.5 Comparação dos resultados	163
7.6 Desempenho do armazenador experimental	165
7.7 Discussão	166
 CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	 169
 APÊNDICE 1 Listagem do Programa Computacional	 171
 APÊNDICE 2 Obtenção das Equações (120), (121) e (122)	 176
 APÊNDICE 3 Avaliação do Erro Relacionado à Taxa de Acumulação de Energia pelo Fluido	 181
 BIBLIOGRAFIA	 183