

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA VIABILIDADE DA CURA DO
CONCRETO POR ENERGIA SOLAR**

JOSÉ LUÍS RODRIGUES DE FREITAS ISERHARD

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

Orientador: Hélio Adão Greven.

PORTO ALEGRE

2000

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

Prof. Hélio Adão Greven.
Orientador

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes.
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

- Prof^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin.
Dr^a., Universidade de São Paulo, Brasil
- Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.
PhD., University of Leeds, Grã-Bretanha.
- Prof. Marcus Vinicius Veleza Ramires.
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

A meus pais

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	
1.1 FORMULAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVO	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	4
2 A CURA DO CONCRETO	
2.1 - DEFINIÇÃO E SIGNIFICAÇÃO	5
2.2 - ESTRUTURA DO CONCRETO	5
2.3 - HIDRATAÇÃO	8
2.4 - CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE CURA	12
2.5 - MÉTODOS	12
2.6 - CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	14
2.7 - TIPOS DE CIMENTO	16
2.8 - REOLOGIA DO CONCRETO	19
2.9 - A CURA A VAPOR DO CONCRETO	20
2.10 - OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE CURA E FATORES TECNOLÓGICOS PARA ACELERAÇÃO DA RESISTÊNCIA	24
2.11 - RESISTÊNCIA DO CONCRETO, COMO FATOR DEPENDENTE DA CURA	25
2.12 - MATURIDADE	27

3 A ENERGIA SOLAR

3.1 - CONCEITOS GERAIS	31
3.2 - FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	35
3.3 - OS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA RADIAÇÃO SOLAR	37
3.4 - CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR.....	38

4 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA CURA DE CONCRETO

(AVALIAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA)

4.1 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	51
4.2 - COLETORES SOLARES PLANOS	51
4.3 - HELIOCÂMARAS	56

5 SIMULAÇÃO DO PROBLEMA - EXEMPLO APLICATIVO

5.1 - ENUNCIADO DO PROBLEMA	62
5.2 - LEVANTAMENTO DE DADOS	64
5.3 - CÁLCULO DA MATURIDADE	67
5.4 - SOLUÇÃO UTILIZANDO-SE COLETORES SOLARES PLANOS.....	69
5.5 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	73
5.6 - CÁLCULOS PARA O DIA TÍPICO DE VERÃO	79
5.7 - CÁLCULOS PARA O DIA TÍPICO DE INVERNO	82
5.8 - SOLUÇÃO UTILIZANDO-SE HELIOCÂMARAS	86

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 - COLETORES SOLARES PLANOS.....	94
6.1.1 - Análise de verão	94
6.1.2 - Análise de Inverno	105
6.2 - HELIOCÂMARAS	109
6.2.1 - Análise de verão	110
6.2.2 - Análise de inverno	117

7 CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	121

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122**ANEXOS** 126**ANEXO A** 127

LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO EM COLETORES SOLARES PLANOS

ANEXO B 132

PLANILHA DE CÁLCULO UTILIZADO EM COLETORES SOLARES PLANOS

(DIA TÍPICO DE VERÃO).

ANEXO C 134

RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE COLETORES SOLARES PLANOS

(DIA TÍPICO DE INVERNO).

ANEXO D 139

PLANILHA DE CÁLCULO UTILIZADO EM COLETORES SOLARES PLANOS

(DIA TÍPICO DE VERÃO).

ANEXO E 141

RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE COLETORES SOLARES PLANOS

(DIA TÍPICO DE VERÃO).

ANEXO F 146

LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO EM HELIOCÂMARAS.

ANEXO G	153
RESULTADO DOS PROGRAMA DE HELIOCÂMARAS (DIA TÍPICO DE VERÃO).	
ANEXO H	158
RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE HELIOCÂMARAS (DIA TÍPICO DE INVERNO).	
ANEXO I	163
MODELOS DE HELIOCÂMARAS.	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Evolução do calor nas reações de hidratação de um cimento portland comum.....	15
FIGURA 2.2 - Evolução da temperatura para um cimento portland comum, utilizando-se um conteúdo de cimento de 320Kg/m ³ de concreto..	15
FIGURA 3.1 - Radiância espectral padrão para uma distância média sol-terra e uma constante solar de 1353 W/m ²	32
FIGURA 3.2 - Espectro da radiação eletromagnética.....	33
FIGURA 3.3 - Esquema de trocas de energia no coletor.....	39
FIGURA 3.4 - Corte Esquemático de um coletor solar tipo chapa tubos.....	40
FIGURA 3.5 - Disposição em paralelo.....	44
FIGURA 3.6 - Disposição em série.....	45
FIGURA 3.7 - Esquema de localização da energia auxiliar.....	47
FIGURA 3.8 - Esquema de uma heliocâmara, seção transversal.....	48
FIGURA 4.1 - Malha térmica para uma câmara de cura.; onde qc representa o fluxo por Convecção; qr o fluxo por radiação; qk o fluxo por condução; Qu a energia útil (absorvida pelo coletor).....	54
FIGURA 4.2 - Balanço de energia num destilador solar convencional (DSC)...	57
FIGURA 4.3 - Malha térmica para um destilador solar convencional (uma cobertura) sendo ta a temperatura ambiente; tb a temperatura da base; qc o fluxo de calor por condução; qr o fluxo de calor por radiação; Qu a energia útil, absorvida pelo destilador solar.....	59
FIGURA 4.4 - Projeto gráfico Resistência x Maturidade	61
FIGURA 5.1 - Fluxograma da situação simulada.....	63
FIGURA 5.2 - Gráfico referente as temperaturas do dia típico de verão.....	65
FIGURA 5.3 - Gráfico de um dia típico de inverno.....	67
FIGURA 5.4 - Ciclo térmico teórico inicial de cura.....	68
FIGURA 5.5 - Sistema adotado para o cálculo com coletores solares planos..	69
FIGURA 5.6 - Curva de rendimento de um coletor solar plano.....	71
FIGURA 5.7 - Seção transversal, detalhando a câmara de cura e sua composição material.....	72

FIGURA 5.8 - Fluxograma da solução para câmara de cura, utilizando-se coletores solares planos, tanto para dia típico de verão quanto de inverno.....	74
FIGURA 5.9 - Seção transversal discretizada (malha com 15 pontos) para o cálculo e a determinação dos valores de energia e temperaturas na câmara de cura.....	76
FIGURA 5.10 - Coeficientes de perdas para radiação, condução (global) e Convecção.....	77
FIGURA 5.11 - Energia absorvida pelo sistema coletor com área total de 180 m ² (Valores na planilha, Anexo C - coluna G).....	80
FIGURA 5.12 - Energia total (Perdida + absorvida), na tubulação para 200m de tubulação de cobre isolada (Anexo B).....	81
FIGURA 5.13 - Energia total perdida pela câmara de cura. (Área total da câmara = 683.8m ² .(Anexo B).....	82
FIGURA 5.14 - Energia absorvida pelo sistema coletor com área total de 180 m ² ; (Valores em Anexo D).....	83
FIGURA 5.15 - Energia total (Perdida + absorvida), na tubulação. (Anexo D)..	84
FIGURA 5.16 - Energia total perdida pela câmara de cura. (Área total da câmara = 683.8m ² . (Valores em Anexo D).....	85
FIGURA 5.17 - Modelo de heliocâmara adotado para essa simulação Inclinação da tampa de 25 graus com a horizontal frente para o norte. (cotas em centímetros).....	86
FIGURA 5.18 - Fluxograma contendo as etapas para a solução do problema de heliocâmaras.....	89
FIGURA 5.19 - Seção transversal da heliocâmara; modelo hipotético para cálculo.....	91
FIGURA 6.1 - Energia de absorção, e energia perdida pela câmara e também pelos dutos.....	95
FIGURA 6.2 - Saldos entre Energia absorvida e energia perdida no sistema de cura, em função da hora.....	96
FIGURA 6.3 - Temperatura da água no sistema coletor solar plano.....	97
FIGURA 6.4 - contém os dados comparativos entre a temperatura da água durante a aplicação da energia solar e a temperatura da água com a temperatura ambiente.....	99

FIGURA 6.5 - Mostra o gráfico relativo a aplicação da Lei de Saul (Maturidade), segundo análise feita em 5.1.1.....	99
FIGURA 6.6 - Mostra as temperaturas na Seção da câmara de cura as 07:00 horas, na superfície, meio e base das peças de concreto.....	100
FIGURA 6.7 - Mostra as temperaturas na seção da câmara de cura as 08:00 horas, na superfície, meio e base das peças de concreto.....	100
FIGURA 6.8 - Mostra as temperaturas na seção da câmara de cura as 09:00 horas, na superfície meio e base das peças de concreto.....	101
FIGURA 6.9 - Mostra as temperaturas na seção transversal da câmara de cura as 10:00 horas, na superfície, meio e base da peça de concreto..	101
FIGURA 6.10- Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 11:00 horas.....	101
FIGURA 6.11 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 12:00 horas.....	102
FIGURA 6.12 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 13:00 horas.....	102
FIGURA 6.13 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 14:00 horas.....	102
FIGURA 6.14 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 15:00 horas.....	103
FIGURA 6.15 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 16:00 horas.....	103
FIGURA 6.16 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 17:00 horas.....	104
FIGURA 6.17 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 18:00 horas.....	104
FIGURA 6.18 - Mostra as temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 19:00 horas.....	104
FIGURA 6.19 - Energia de absorção, e energia perdida pela câmara e também pelos dutos.....	105
FIGURA 6.20 - Saldos entre Energia absorvida e energia perdida no sistema de cura, em função da hora.....	106
FIGURA 6.21 - Temperatura da água no sistema coletor solar plano.....	106

FIGURA 6.22 - Localização das seções (1,2,3) na seção transversal da heliocâmara, localizando os planos de superfície, meio e base da peça de concreto.....	109
FIGURA 6.23 - Temperaturas na peça de concreto as 07:00 horas.....	110
FIGURA 6.24 - Temperaturas na peça de concreto as 08:00 horas.....	110
FIGURA 6.25 - Temperatura na peça de concreto as 09:00 horas.....	111
FIGURA 6.26 - Temperatura na peça de concreto as 10:00 horas.....	111
FIGURA 6.27 - Temperatura na peça de concreto as 11:00 horas.....	111
FIGURA 6.28 - Temperatura na peça de concreto as 12:00 horas.....	112
FIGURA 6.29 - Temperatura na peça de concreto as 13:00 horas.....	112
FIGURA 6.30 - Temperatura na peça de concreto as 14:00 horas.....	112
FIGURA 6.31 - Temperatura na peça de concreto as 15:00 horas.....	113
FIGURA 6.32 - Temperatura na peça de concreto as 16:00 horas.....	113
FIGURA 6.33 - Temperatura na peça de concreto as 17:00 horas.....	113
FIGURA 6.34 - Temperatura na peça de concreto as 18:00 horas.....	114
FIGURA 6.35 - Temperatura na peça de concreto as 19:00 horas.....	114
FIGURA 6.36 - Temperatura na peça de concreto as 20:00 horas.....	114
FIGURA 6.37 - temperaturas na peça de concreto as 21:00 horas.....	115
FIGURA 6.38 - Temperaturas na peça de concreto as 22:00 horas.....	115
FIGURA 6.39 - temperaturas a cada hora para a seção de ponto central da peça de concreto.....	115
FIGURA 6.40 - Gráfico da aplicação de Lei de Saul (maturidade), no ponto central da peça de concreto.....	117
FIGURA 6.41 - Temperatura a cada hora para a seção de ponto central da peça de concreto.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Cimento portland comum - composição.....	9
Tabela 2.2 - Composição química do cimento Portland anidro.....	16
Tabela 2.3 - Desenvolvimento da Finura desde 1930 (Dinamarca) m ² /Kg.....	17
Tabela 4.1 - Margens para a resistência mínima.....	61
Tabela 5.1 - Tabela do Dia típico de verão.....	64
Tabela 5.2 Tabela de um Dia típico de inverno	66

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

A	Área da superfície.
a,b,c	Constantes
ARI	Alta Resistência Inicial
Cs	Calor específico do aço.
C-S-H	Silicato Hidratado de Cálcio
Cwg	Inércia térmica do sistema.
dt	Diferença entre as temperatura final e inicial.
dtw / dt	Gradiente de temperatura ao longo do tempo.
Gon	Radiação extraterrestre.
Gsc	Constante solar.
H	Número de horas que o fluido fica circulando pela tubulação.
hc	Coefficiente de convecção.
hc-a	Coefficiente de convecção entre cobertura e o meio ambiente.
hp-c	Coefficiente de convecção entre a base e a cobertura.
hr-c	Coefficiente de radiação.
Hs	Radiação solar incidente.
hwg	Calor latente da vaporização da água.
I	Fluxo da radiação solar.
K	Coefficiente de condutividade térmica.
K(i)	Condutividade térmica do isolamento.
K(p)	Condutividade térmica da tubulação
Ki	Condutividade térmica do material.
L	Comprimento da tubulação.
Li	Comprimento.
Ln	Logarítimo natural.
M	Maturidade
M0	Maturidade do concreto quando inicia o endurecimento.
Ms	Maturidade segundo Saul
n	enésimo dia do ano.
Pwb	Pressão parcial de vapor à temperatura da base.
Pwc	Pressão parcial de vapor à temperatura da cobertura.
q	Fluxo de calor

Q	Quantidade de calor.
Qa	Energia absorvida pelo coletor.
q _{cw}	Transferência interna de calor por convecção.
q _{ew}	Transferência de calor por evaporação.
q _{ga}	energia total absorvida pela cobertura.
q _{ga'}	Dissipação de calor do vidro para atmosfera.
Q _l	Energia perdida pelo sistema para o meio ambiente.
Q _o	Energia absorvida pelo sistema de distribuição.
Q _p	Quantidade de calor perdida através da tubulação.
q _{rw}	Transferência interna de calor por radiação.
q _{wc}	Fluxo de energia de entrada de água no destilador.
R _{i(i)}	Raio interno do isolamento.
R _{i(p)}	Raio interno da tubulação.
R _{o(i)}	Raio externo do isolamento.
R _{o(p)}	Raio externo da tubulação.
R _t	Resistência térmica.
R _u	Resistência última para maturidade infinita.
S	Resistência
S _u	Limite de resistência quando maturidade tende ao infinito.
T	Temperatura
T _∞	Temperatura do fluido.
T ₀	Temperatura de congelamento da água
T ₁	Temperatura menor na superfície.
T ₂	Temperatura maior na superfície.
T _b	Temperatura da placa base.
T _c	Temperatura da cobertura.
T _w	Temperatura na superfície sólida.
U _b /A	Coefficiente de condutividade global.
U _b	Coefficiente de perdas globais na condução.
U _e	Coefficiente de perdas de calor pela base.
U _l	Coefficiente de perdas de calor pela lateral.
U _t	Coefficiente de perdas de calor pela cobertura.
V	Velocidade do vento.
W _p	Peso por metro de tubulação.

α_g	Absortância do vidro.
ϵ_p	Emissividade da placa.
dt/dx	Gradiente de temperatura.
α_w	Absortância da água.
σ	Constante de Stefann-boltzmann.
η	Rendimento (eficiência).
τ	Transmissividade do vidro.

RESUMO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA VIABILIDADE DA CURA DO CONCRETO POR ENERGIA SOLAR

O presente trabalho visou a utilização da energia solar na cura de pré-fabricados de concreto. Para tanto, foi utilizado dois modelos. O primeiro modelo constou da utilização de coletores solares planos, ligados até uma câmara de cura por um sistema de dutos; A radiação direta do sol incide sobre os coletores, que acumulam energia, que é removida pela água que circula pelos mesmos, levando essa energia através do sistema de distribuição (dutos) até a câmara de cura; Essa câmara, possui uma pista metálica em sua base, onde a energia é cedida para os pré-fabricados de concreto; Esse ciclo de captação distribuição e consumo é repetido a cada hora do dia, onde há radiação solar; Um segundo modelo constou de uma heliocâmara, princípio de um destilador solar convencional, onde a radiação incide diretamente sobre a câmara de cura; A radiação, penetra pela cobertura e forma-se um efeito estufa no interior da câmara, aquecendo seu interior e conseqüentemente os pré-fabricados de concreto; Avaliou-se os dois sistemas para as estações de verão e inverno na cidade de Porto Alegre (dias típicos) e concluiu-se que para o verão, tanto o sistema com coletores solares quanto o sistema com heliocâmaras poderão ser utilizados. No período de inverno, nenhum destes sistemas serão satisfatórios, porém suas utilizações serão viáveis em conjunto com uma fonte de energia alternativa; A energia solar constitui-se assim numa importante fonte de energia a ser utilizada em pré-fabricados de concreto.

ABSTRACT

"CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE VIABILITY OF THE CONCRETE CURE BY SOLAR ENERGY"

The present work exposes a utilization of the solar energy in the precast of concrete. For this, was utilized two models. The first model showed the utilization of solares plane colectors, attached to a cure box for one duct system; The beam radiation of the sun is applicated on the collectors, where the energy is accumulated, wich is removed by the water that circules in these ducts, going this energy throught of the system of distribution for a cure boxe; This boxe, have one metalic street in your base, where the energy is passed to the precast of concrete; This cicle of captations, distribution and use is repeated every hour of the day, where there is solar radiation; One second model showed one heliocâmara, principle of one solar destilation conventional, where a radiation incides directly on a boxe cure. The radiation, infilters by the top and formes one stuf effect in the boxe, burning your interior and consequently the precast of concrete; Avalition of two systems on the summer and winter stations in the Porto Alegre. (tipics days) and conclusions are that on the summer, as the solares collectors system that the heliocâmaras system will go to be utilized. Althought in the winter, none of the systems will be go, but still be viable your utilizations with another alternative power source; The solar energy has this same one important energy source to be utilized at precast of concrete.

1 INTRODUÇÃO

1.1 FORMULAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA

As fontes de energia e suas reservas se transformaram em sérias preocupações da humanidade, principalmente no que se refere ao declínio energético que se tem verificado ultimamente. Trata-se em sua maioria de fontes geradoras convencionais a abastecerem uma demanda cada vez maior.

As fontes geradoras em sua maioria, utilizam-se de meios os quais provocam um verdadeiro desequilíbrio ecológico, ocasionados por substâncias agressivas lançadas ao meio ambiente.

Como fonte natural, o sol que é uma fonte de energia responsável pela maior parte da energia existente na superfície do globo terrestre e que nos chega em forma de radiações eletromagnéticas, com intensidade da ordem de 1.37 KW/m^2 , sem considerar as interferências atmosféricas. Sua qualidade, é praticamente idêntica à radiação de um corpo negro a 5762°K , podendo ser aplicada em várias áreas onde haja necessidade de potência e calor.

No Brasil, como de resto, no mundo todo, as indústrias de pré-fabricação de concreto se utilizam das mais variadas fontes de energia, sendo que o processo de cura a vapor livre e contínuo, na pressão atmosférica é o mais utilizado. O processo consta em criar um ambiente fechado (câmara de cura) e submeter as peças de concreto a um ambiente com vapor de água a temperaturas máxima e constante na faixa de 70°C a 90°C , saturando o ar ambiente (CARINO, LEW e VOLZ, 1983).

O processo de cura do concreto, consiste portanto na manutenção de um ambiente favorável ao desenvolvimento de sua resistência, em termos de umidade e temperatura, sem que haja prejuízos ao produto final.

Como as temperaturas dentro da câmara de cura são relativamente baixas, (menor ou igual a 90°C) pode-se utilizar coletores solares planos, que são elementos de baixa concentração solar, bem como também pode-se utilizar as chamadas heliocâmaras (câmaras solares), como fonte de geração de energia.

O presente trabalho, analisa o princípio da cura a vapor, utilizando a energia solar como fonte produtora de calor.

Visando quantificar através do balanço térmico a viabilidade técnica da utilização da energia solar, como fonte geradora térmica para a cura do concreto.

Dessa forma, este trabalho tem o intuito de contribuir com a cura do concreto em pré-fabricados, unindo duas áreas (Energia solar e Engenharia Civil), até então estudadas separadamente.

1.2 JUSTIFICATIVA

O processo de aceleração do endurecimento de peças pré-fabricadas de concreto (cura do concreto) envolve gastos significativos, principalmente em relação à utilização de fontes de energia tradicionais que além de poluírem o meio ambiente, utilizam-se de fontes de energia esgotáveis.

Despertou-se assim, para a utilização de uma fonte inesgotável de energia, não poluente e sem custos quanto a sua utilização; Dessa forma, surgiu a energia solar, preenchendo todos esses requisitos.

Como a cura do concreto requer energia visando fornecer um ambiente favorável em termos de temperatura e umidade saturada, avaliou-se a substituição das fontes tradicionais de energia pela energia solar.

Faltaria somente a avaliação da viabilidade técnica quanto a utilização da energia solar na cura de pré-fabricados de concreto, até então com carência bibliográfica.

Então, faz-se necessário um estudo sobre a viabilidade técnica da utilização da energia solar em pré-fabricados de concreto. Justifica-se assim o presente trabalho numa tentativa de contribuir ao estudo da cura do concreto utilizando-se de energia solar.

1.3 O'BJETIVO:

Em termos gerais, o presente trabalho tem como objetivo geral integrar as duas áreas até então estudadas separadamente, ou seja, energia solar com engenharia civil, utilizando-se até então de referências bibliográficas específicas de cada área. Visa contribuir ao estudo da cura de concreto (engenharia civil) com o uso da energia solar.

Os objetivos específicos, podem ser divididos em etapas, utilizando-se em todas elas o princípio da simulação teórica, através de equações universais que regem tanto a energia solar quanto a cura de concreto. Para tanto, foram elaborados programas de computadores (softwares específicos), visando facilitar o desempenho dessas tarefas.

- Simulou-se a utilização do sistema coletor e câmara de cura, visando utilizar o sistema na cidade de Porto Alegre, para um dia típico de verão.
- Simulou-se a utilização do sistema coletor e câmara de cura, visando utilizar o sistema na cidade de Porto Alegre, para um dia típico de inverno.
- Simulou-se a utilização heliocâmara, visando utilizar o sistema na cidade de Porto Alegre, para um dia típico de verão.
- Simulou-se a utilização heliocâmara, visando utilizar o sistema na cidade de Porto Alegre, para um dia típico de inverno.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO:

A estrutura da dissertação compreende sete capítulos e nove anexos. No capítulo I, é apresentada uma introdução, onde são abordados a formulação do tema de pesquisa, a justificativa do trabalho e os objetivos (geral e específicos).

No capítulo II encontra-se conceitos relativos a cura do concreto, onde busca-se dar uma sustentação teórica ao trabalho, através de uma revisão bibliográfica.

No capítulo III, encontra-se conceitos relativos a energia solar, onde são citados alguns conceitos da termodinâmica, bem como apresentou-se características dos coletores solares planos e das heliocâmaras.

No capítulo IV, é feita a apresentação do problema com vistas a utilização da energia solar na cura de concreto. Ainda são apresentadas as equações universais que regem os dois sistemas (coletores solares plano e heliocâmaras).

No capítulo V, é feita a simulação do problema, que através dos dados referentes aos dias típicos de verão e inverno, calculam-se os balanços de energia nos sistemas de coletores solares e heliocâmaras.

No capítulo VI é feita a análise dos resultados apurados. A análise é feita no sistema de coletores solares plano e também para heliocâmaras tanto para o verão quanto para o inverno.

No capítulo VII, relata-se as conclusões quanto a viabilidade técnica da utilização dos sistemas de coletores solares plano e da heliocâmara para o verão e inverno. Cita-se ainda, algumas sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos.

1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO:

O trabalho aqui apresentado, se restringe somente ao estudo da avaliação da viabilidade técnica quanto a utilização da energia solar, como uma contribuição ao estudo da cura do concreto. Dessa forma, se restringe à avaliação (quantificação) em termos de energia necessária à cura do concreto. Para tanto, dentro desse enfoque, foi proposto um problema específico e simulada a sua solução.

2 A CURA DO CONCRETO

2.1 DEFINIÇÃO E SIGNIFICAÇÃO

A cura do concreto, consiste em propiciar ao mesmo um ambiente favorável, através da retenção e/ou fornecimento de umidade em temperatura adequadas ao desenvolvimento das reações químicas.

A falta d'água na pasta diminui ou inibe as reações de hidratação, ocasionando retração hidráulica principalmente nas primeiras idades. Esse fato ocasionará fissuras que interligando os capilares, aumentará a permeabilidade da pasta (NEVILLE, 1982)

Dessa forma, a umidade ambiental no sistema de cura, influenciará diretamente no conteúdo real de água na pasta.

Um aumento de temperatura, age sobre as velocidades das reações químicas, que envolvem a pega e o endurecimento do concreto, exercendo uma função aceleradora na hidratação do cimento.

O cimento ao sofrer o processo de hidratação, forma a pasta de cimento que é higroscópica, devido ao seu caráter hidrófilo e devido a presença de poros microscópicos. Tanto a umidade quanto a temperatura, agem diretamente sobre a quantidade de água evaporada, principalmente da superfície do concreto.

2.2 ESTRUTURA DO CONCRETO

A estrutura do concreto é responsável por suas propriedades, desempenho e função. É formada por 3 fases distintas: Agregados, zona de transição e pasta de cimento.

2.2.1 Agregados

Destacam-se por suas características físicas serem mais importantes que as químicas, sendo responsável pelo módulo de elasticidade e estabilidade dimensional.

2.2.2 Pasta de Cimento

Possui a função de aglutinar os agregados. Quando o concreto ainda se encontra em estado fresco, age no sentido de possibilitar a plasticidade e a coesão, enquanto no endurecimento, age sobre a resistência, impermeabilidade e durabilidade.

2.2.2.1 Composição

O cimento Portland ao ser misturado com a água, inicia a hidratação com a formação em poucas horas dos cristais de sulfoaluminato de cálcio hidratado (Etringita). Após algumas horas, formam-se grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 - Portlandita) e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que começam a ocupar os espaços da água e das partículas de cimento dissolvido (SMITH e MATTHEWS, 1974).

Após alguns dias, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfato hidratado

2.2.2.2 Vazios da Pasta:

a) Vazios intersticiais no C-S-H (Poros de gel):

São espaços existentes entre as camadas de C-S-H. Possuem dimensões muito pequenas (0.5 a 2.5 nm) e por isso pouco influem na resistência ou permeabilidade da pasta. A remoção da água desses espaços pode causar fluência ou retração.

b) Vazios capilares (porosidade): - São os espaços não preenchidos pelos produtos sólidos da pasta. Nas primeiras idades podem medir na faixa de 3 a 5 μm de diâmetro, mas em cimentos bem hidratados e bem curados, esses vazios podem ficar na faixa de 10 a 50 nm .

c) Vazios com ar:

O ar é aprisionado na pasta fresca, durante a mistura ou no caso de se adicionar incorporadores de ar, (apresentam-se em forma geralmente esférica). São vazios maiores que os capilares, o que vem a afetar consideravelmente a resistência do concreto.

2.2.2.3 Água na Pasta:

Segundo NEVILLE (1983), a água no cimento hidratado é retida com vários graus de intensidade, dependendo da umidade ambiental e porosidade da pasta:

a) Água capilar (retida nos vazios capilares maiores de 5nm, fora da ação das forças superficiais). A água retida nos capilares acima de 50 μ m é chamada água livre, pois sua remoção não causa retração volumétrica.

b) Água combinada quimicamente (formando parte definida dos compostos hidratados). Ao ser fixada pelos componentes do cimento pode sofrer contração, ocasionando retração (item 2.8.1).

c) Água do gel (retida de várias maneiras), como:

d) Água adsorvida (retida pelas forças superficiais das partículas de gel). É a principal responsável pela retração da pasta, quando da secagem.

e) Água Intersticial ou zeolítica (retida entre camadas de C-S-H, em lâminas moleculares). Removida somente por secagem (umidade relativa menor que 11%), ocasionando retração hidráulica (item 2.8.1).

A água ainda pode ser classificada, para fins de investigação em água evaporável e água não evaporável (NEVILLE, 1982).

À medida em que prossegue os processos de hidratação, diminui o volume de água evaporável no interior do concreto.

2.2.3 Zona de Transição:

É a face de união entre a pasta de cimento e os agregados. Caracteriza-se por ser uma fase heterogênea devido as variações da textura superficial e geometria das partículas, ocasionando assim defeitos nas ligações da pasta com o agregado. Essas imperfeições não permitem adequada transferência de tensões da pasta para o agregado. Nas idades iniciais, o volume e dimensão dos vazios nessa região é maior que na pasta propriamente dita. Cristais como hidróxido de cálcio e etringita, se concentram mais nessa região que por possuírem menor superfície específica, possuem menor coesão e conseqüentemente força de Van der Waals menos intensas, formando dessa forma planos preferenciais de clivagem, devido suas estruturas orientadas. Nessa região, formam-se portanto, fissuras preferenciais, na direção perpendicular aos eixos dos cristais. Dessa forma a zona de transição influi decisivamente na resistência e deformação do concreto (MONTEIRO, 1985).

2.3 HIDRATAÇÃO

Consiste numa seqüência de reações químicas entre o cimento e a água, ocasionando a transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Como resultado tem-se a perda da consistência, a pega, o endurecimento e o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento.

2.3.1 Composição Química do Cimento Portland:

A composição química básica do clínquer de cimento Portland, encontra-se na tabela 2.1; pode ser formada em termos de quatro compostos principais. (NEVILLE, 1982).

Tabela 2.1 Cimento portland comum - composição.

DENOMINAÇÃO	FÓRM. QUÍMICA	FÓRM.SIMPLIFICADA
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferro-Aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

O C_3S juntamente com o C_2S , formam os aglomerantes propriamente dito.

O C_3A e o C_4AF agem como fundentes durante a fabricação do cimento, formando um meio pastoso que facilita a reação entre o silício e o cálcio em estado sólido. Funcionam como material intersticial, preenchendo vazios deixados pelo C_3S e C_2S .

2.3.2 Teorias de hidratação:

São teorias que tentam explicar a pega e o endurecimento dos cimentos portland no concreto. Como principais teorias de hidratação; Segundo ILLSTON, DINWOODIE e SMITH (1979), destacam-se:

2.3.2.1 Teoria da Cristalização de Le Chatelier (1887) .

A teoria da cristalização consta da primeira tentativa em explicar a pega e o endurecimento dos cimentos Portland. Em uma solução saturada não é possível obter-se cristalização. No entanto, no momento em que ocorra uma alteração nas condições de equilíbrio da solução gerando uma supersaturação momentânea, o equilíbrio será restabelecido por cristalização. Essa equilíbrio pode ser gerado por evaporação do diluente, mudança de temperatura ou introdução de alguma fase que reaja com o diluente.

Le Chatelier chegou a conclusão que a cristalização depende da diferença entre o grau de solubilidade dos compostos. Os compostos anidros ou parcialmente hidratados, apresentam maior solubilidade em relação aos compostos hidratados. Dessa forma, cria-se uma solução

supersaturada, formada por cristais muito pequenos que se precipitam. O endurecimento fica dependente da coesão e aderência entre esses cristais.

2.3.2.2 Teoria Coloidal proposta por Michaelis (1893) .

O endurecimento e a resistência do cimento na água é quase que exclusivamente devido a formação de produtos coloidais de hidratação.

Os compostos de cimento são dissolvidos ao entrar em contato com a água, formando uma solução supersaturada, na qual se precipitam os produtos cristalinos como hidróxido de cálcio, aluminatos de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio. O hidróxido de cálcio ao atingir determinada concentração, age sobre os silicatos de cálcio empobrecidos pela dissolução, formando um gel de silicato de cálcio hidratado, ao mesmo tempo em que o grão de cimento absorve aos poucos a água de gel para o seu interior. Dessa forma, devido a perda gradual de água, o gel fica mais denso, aprisionando os cristais, aumentando assim a resistência .

Segundo MONTEIRO, nos tempo atuais , acredita-se que imediatamente após a mistura, durante o amassamento e adensamento, os grãos de cimento estão suspenso em uma solução aquosa, sem contato entre si. Ocorre a dissolução dos álcalis, sulfatos e aluminatos com grande despreendimento de calor. Após alguns minutos, a fase aquosa fica praticamente saturada de íons Ca^{+2} , Na^{+} , SO_4^{-2} e K^{+} . Na periferia dos grãos de cimento, aparecem os primeiros produtos de hidratação, com dimensões coloidais, que recebem o nome de gel de cimento.

O desenvolvimento dos produtos de hidratação ocorrem interna e externamente nos grãos de cimento, na forma de pequenas agulhas que vão se entrelaçando. O início da pega corresponde ao momento em que as últimas camadas de gel conectam-se, formando uma estrutura contínua.

Após alguns dias, os cristais em forma de agulhas entrelaçam-se ainda mais, formando uma estrutura mais densa. Nessa etapa a pasta de cimento, apesar das reações químicas se completar parcialmente, já apresenta uma resistência considerável.

2.3.3 Reações de hidratação:

Segundo NEVILLE (1982), observações físicas nos indicam que pode haver mais de um silicato de cálcio hidratado, ou mesmo vários, que por isso são representados por muitos autores como C-S-H.

As reações de hidratação do C_3A ainda não estão bastante esclarecidas, devido sua complexidade. A velocidade de reação do C_3A é muito rápida, ocasionando a pega instantânea, ou seja, enrijecimento praticamente rápido da pasta. Adiciona-se gesso ao clínquer para regular o tempo de pega, onde o produto resultante da reação será o trissulfato de alumínio (etringita).

A presença do C_4AF pode acelerar a hidratação dos silicatos. Sua reação porém ainda parece bastante duvidosa.

2.3.4 Evolução das reações de hidratação:

As reações de hidratação dos compostos do cimento não se mantêm constante ao longo do tempo. Segundo BASÍLIO (1983), Pode-se distinguir 3 fases ou períodos em uma reação de hidratação do cimento, que encontram-se diretamente ligadas a proporção dos compostos, finura e temperatura.

Durante a primeira fase, também conhecida como fase de indução, destacam-se os componentes C_3A e C_4AF por se hidratarem rapidamente, enquanto que o C_3S e C_2S tem sua hidratação retardada, provavelmente pela formação de uma película de produtos de hidratação em torno de si. Essa fase tem duração de algumas horas .

Numa segunda fase, a película de hidrossilicato em torno do C_3S e C_2S , transforma-se em hidrossilicato menos rico em cálcio, aumentando dessa forma a porosidade da película, ao mesmo tempo em que incrementa a velocidade de hidratação até que toda a película seja preenchida por esse hidrossilicato. O C_3A rompe-se devido à pressão osmótica, formando a etringita e monossulfato. Essa fase tem duração de dezenas de horas .

Numa terceira fase, devido ao aumento progressivo da espessura da película dos produtos de hidratação, há uma diminuição da porosidade, retardando-se as reações de hidratação, pois há uma resistência à difusão da água. É o período de caimento da reações de hidratação .

As reações de hidratação do C_2S possuem menores velocidade que o C_3S . O fato fica explicado por ser a estrutura cristalina do C_2S mais fechada em relação ao C_3S , o que vem a

dificultar a penetração das moléculas de água no reticulado cristalino. Somado a isso, os produtos de hidratação que formam a película desses componentes, possuem uma menor relação cálcio/sílica no C2S, o que vem a diminuir a porosidade no mesmo, dificultando ainda mais a penetração das moléculas de água no mesmo.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE CURA

A umidade ambiental (umidade relativa) no ambiente de cura, atua principalmente durante a pega e endurecimento do concreto agindo fundamentalmente sobre as tensões iniciais. O aumento de compacidade das peças de concreto, devido principalmente a água que se combina quimicamente, e devido a diminuição da quantidade de água evaporável em seu interior bem como o abastecimento das peças com água adicional, (proveniente do próprio vapor, se for o caso) influenciará diretamente na resistência do concreto, principalmente às primeiras idades.

Conforme BERHANE (1984), durante o processo de cura do concreto, os capilares cheios de água serão ocupados pelos produtos de hidratação. É o chamado processo de hidratação do cimento. Quanto mais próximo o ambiente de cura estiver da saturação, menor será a perda de água no ambiente de cura, fazendo com que os produtos de hidratação do cimento ocupem a água existente na pasta fresca.

O aumento de temperatura atua no sentido de aumentar a velocidade das reações químicas no interior do concreto, conforme será visto no item 2.9 (cura a vapor).

2.5 MÉTODOS DE ACELERAÇÃO DO ENDURECIMENTO DO CONCRETO

Os principais métodos e técnicas de cura com o objetivo de acelerar a resistência do concreto, podem ser divididos em cinco categorias:

2.5.1 Métodos baseados na tecnologia do concreto:

- Aumento da quantidade de cimento.
- Emprego de cimentos de alta resistência inicial.
- Diminuição da relação água-cimento.
- Diminuição do volume de poros do concreto.
- Compactação íntegra do concreto fresco.

2.5.2 Químicos:

- Por adição de produtos químicos que acelerem a
- pega.

2.5.3 Físicos:

- Por aproveitamento do calor de hidratação do- cimento.
- Por aquecimento dos componentes do concreto:
- Agregados e água.

2.5.4 Pela influência do calor, na pressão atmosférica:

Fornecimento de energia térmica em forma de:

- Ambiente com ar quente.
- Água quente.
- Uso de corrente elétrica.
- Radiação infravermelha.
- Vapor de água saturado.

2.5.5 Métodos Combinados:

São aqueles nos quais se empregam e combinam mais métodos.

2.6 CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO:

Consiste na quantidade de calor por peso de cimento não hidratado, que se desprende na hidratação completa a uma dada temperatura. São reações de caráter exotérmico.

A rigor, o calor de hidratação consiste na soma entre o calor liberado pelas reações químicas e o calor de adsorção da água sobre a superfície do gel (NEVILLE, 1982).

Ainda, a quantidade de energia no interior do concreto, depende de seu volume e pode resultar em relativo aumento de temperatura, devido sua condutividade ser relativamente baixa. Fica estabelecido um gradiente térmico principalmente no momento em que a parte exterior do concreto começa a perder calor para o meio ambiente.

A Figura 2.1, nos mostra a velocidade de evolução do calor de hidratação do cimento portland comum, durante os primeiros estágios de hidratação (SMITH E MATTHEWS, 1974). Inicialmente há uma rápida elevação do calor, devido a mistura do cimento com a água, representando o umedecimento do cimento, a solução de álcalis e gesso e a formação de sulfo-aluminato (etringita), formando uma película, retardando assim as rápidas reações do C_3A . O segundo pico de liberação de calor, representa a continuação das reações que formam a etringita, bem como o início das reações que formam a alita (C_3S com impurezas). Poderá haver um terceiro pico de liberação de energia, cuja magnitude dependerá da quantidade de C_3A , gesso e álcalis presentes na composição química do cimento. Esse pico, caracteriza-se principalmente pelas reações entre a etringita e o excesso de C_3A , são as chamadas reações de aluminatos. Essas reações poderão ser moderadas e retardadas, utilizando-se uma certa quantidade de gesso na composição do cimento, evitando assim que as reações de C_3A possam causar severos retardos nas reações de hidratação dos silicatos, devido aparentemente a formação de uma camada de ferrite sobre os silicatos. Por último, teremos uma diminuição lenta e gradual das quantidades de calor, ao longo do tempo.

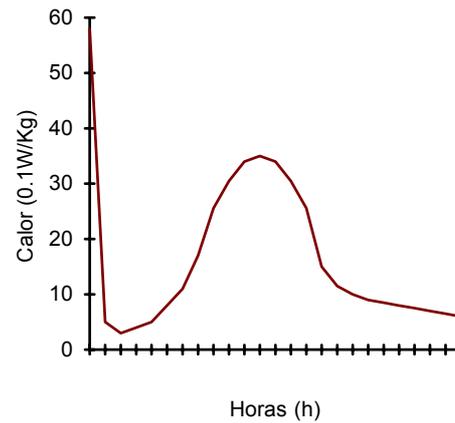


FIGURA 2.1 - Evolução do calor nas reações de hidratação de um cimento portland comum.

MANI, TAM e LEE (1990), usaram blocos de concreto isolados termicamente do meio ambiente exterior e através de leituras registradas no interior desses blocos, montaram os gráficos de regime tempo e temperatura, para vários tipos de misturas. A Figura 2.2, mostra-nos a evolução das temperaturas através do tempo, para um cimento portland comum. Os autores tinham como finalidade criar um pique de temperatura; utilizaram conteúdos de cimento acima do normal.

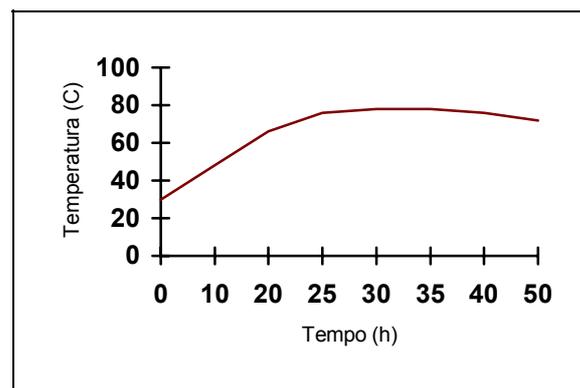


FIGURA 2.2 - Evolução da temperatura para um cimento portland comum, utilizando-se um conteúdo de cimento de 320Kg/m³ de concreto.

Segundo NEVILLE (1982), na realidade, o calor de hidratação encontra-se ligado diretamente à composição química do cimento, onde o somatório dos seus compostos individuais, hidratados separadamente, nos dão uma boa aproximação do calor de hidratação total.

Nos estágios iniciais da hidratação, os diferentes compostos se hidratam com velocidades diferentes, variando também a velocidade de desprendimento do calor, bem como sua quantidade total (item 2.3.4).

Da mesma forma, a finura do cimento influi diretamente na velocidade de liberação do calor. Quanto mais fino o cimento, mais intensas serão as reações de hidratação e consequentemente se intensificará a liberação do calor.

Ainda, a evolução da hidratação do cimento, pode ser determinada de vários modos :

- a) Quantidade de Ca(OH)_2 na pasta.
- b) Calor desenvolvido na hidratação.
- c) Massa específica da pasta.
- d) Quantidade de H_2O combinada quimicamente.
- e) Quantidade de cimento não hidratado presente.

2.7 TIPOS DE CIMENTO:

Os Tipos de cimento encontram-se ligados diretamente a sua composição química, o que vem a influenciar diretamente em seu grau de hidratação. A tabela 2.2 mostra-nos a composição química do cimento portland comum (BASÍLIO, 1983).

Tabela 2.2 - Composição química do cimento Portland anidro :

COMPONENTES	BRASIL - %
C3S	18 - 66
C2S	11 - 53
C3A	2 - 20
C4AF	4 - 14

Os dados da tabela 2.3, mostram como a finura do cimento tem sido aumentada, por meio da energia mecânica somada aos processos de moagem com o objetivo de tornar disponível a energia química para um maior e mais rápido desenvolvimento da resistência do concreto (IDORN, 1984):

Tabela 2.3 - Desenvolvimento da Finura desde 1930 (Dinamarca) m^2/Kg :

Período	Portland Comum	ARI	Ultra Rápido
Antes 1930	200	-----	-----
Antes 1950	200 a 205	-----	-----
1950	280	340	540
1982	380	380	540

A finura maior do cimento, juntamente com o desenvolvimento da química e alguns cimentos especiais constituem-se em elementos essenciais ao desenvolvimento da resistência do concreto.

A indústria cimenteira nacional tem investido muitos recursos visando oferecer um produto de qualidade inabalável e que atenda as expectativas e necessidades do consumidor. As normas vigentes no Brasil contemplam uma gama variada de tipos e classes de cimento, com variações em suas matérias-primas e adições minerais. Estas adições visam agregar valor aos cimentos, além de contribuir com o meio ambiente, utilizando rejeitos industriais (como a escória) e, propiciando uma menor extração das reservas minerais. Assim, faz-se necessário conhecer e avaliar algumas propriedades dos concretos produzidos com estes cimentos, tais como Módulo de elasticidade, Resistências mecânicas, Resistências aos cloretos e Permeabilidade ao ar. O comportamento dos concretos produzidos com alguns tipos e classes de cimento portland disponíveis no mercado nacional, oferecem à comunidade técnica subsídios para a escolha do tipo e classe de cimento adequado às necessidades específicas de cada obra.

O primeiro cimento portland lançado no mercado brasileiro foi o cimento comum, que corresponde atualmente ao CP I - CIMENTO PORTLAND COMUM (EB 1/ NBR 5732), um tipo de cimento portland sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega). Ele acabou sendo considerado na maioria das aplicações usuais como termo de referência para comparação com as características e propriedades dos tipos de cimento que surgiram posteriormente. Foi a partir do amplo domínio científico e tecnológico sobre o cimento portland comum que se pôde desenvolver outros tipos de cimento, com o objetivo

inicial de atender a casos especiais. Com o tempo verificou-se que alguns desses cimentos, inicialmente tidos como especiais, tinham desempenho equivalente ao do cimento portland comum original, atendendo plenamente às necessidades da maioria das aplicações usuais e apresentando, em muitos casos, certas vantagens adicionais. A partir dos resultados dessas conquistas e a exemplo de países tecnologicamente mais avançados, surgiu no mercado brasileiro em 1991 um novo tipo de cimento portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos portland comuns e os cimentos portland com adições (alto-forno e pozolânico), estes últimos já disponíveis há algumas décadas.

Quanto a resistência mecânica, os cimentos portland normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo CP acrescido do algarismo romano I ou II, sendo as classes de resistências indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão (expressos em megapascal - MPa) garantidos pelos fabricantes, após 28 dias de cura.

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou mundialmente a busca de medidas para reduzir o consumo energético. Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados CP III - CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO e CP IV - CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO respectivamente.

Quanto a resistência mecânica, os cimentos portland normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo CP acrescido do algarismo romano III e IV, sendo as classes de resistências indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão (expressos em megapascal - MPa) garantidos pelos fabricantes, após 28 dias de cura.

O cimento portland de alta resistência inicial (CP V - ARI) tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

Os cimentos portland resistentes aos sulfatos são aqueles - como o próprio nome diz - que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. De acordo com a norma NBR 5737, quaisquer um dos cinco tipos básicos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedeçam a pelo menos uma das seguintes condições:

- teor de aluminato tricálcico (C3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente.
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-

forno, em massa.

- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa.

- cimento que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

No primeiro e no último caso o cimento deve atender ainda a uma das normas NBR 5732, 5733, 5735, 5736 e 11578. Se o cimento original for o portland de alta resistência inicial (NBR 5733), admite-se a adição de escória granulada de alto-forno ou materiais pozolânicos, para os fins específicos da NBR 5737.

As influências dos tipos de cimento nas argamassas e concretos são relativas, podendo-se ampliar ou reduzir seu efeito através do aumento ou diminuição da quantidade de seus componentes, sobretudo a água e o cimento. As características dos demais componentes, que são principalmente os agregados (areia, pedra britada, pó-de-pedra, etc.), também poderão alterar o grau de influência, sobretudo se contiverem matérias orgânicas (folhas, raízes, etc.). Finalmente, pode-se usar aditivos químicos para reduzir certas influências ou aumentar o efeito de outras, quando desejado ou necessário.

Tudo isso leva à conclusão de que é necessário estudar a dosagem ideal dos componentes das argamassas e concretos a partir do tipo de cimento escolhido ou disponível na praça, de forma a estabelecer uma composição que dê o melhor resultado.

2.8 A REOLOGIA DO CONCRETO:

O caráter parcialmente reversível da fluência, sugere que a deformação possa consistir numa parcela visco-elástica reversível, formada de uma fase viscosa e outra elástica pura e possivelmente também de uma deformação plástica não reversível. Devido ao descarregamento, a deformação elástica é sempre recuperável, a plástica não é recuperável instantaneamente, mas pode ser dependente do tempo, não havendo proporcionalidade entre tensão e deformação ou entre tensão e velocidade de deformação. Já a deformação viscosa, não é recuperável instantaneamente ao descarregamento, mas sempre é dependente do tempo e a deformação é proporcional a tensão aplicada.

Essas considerações levaram a idealização dos chamados modelos reológicos, onde se combinam molas ideais, representando a parte elástica, de recuperação instantânea, os cilindros amortecedores, representando a parte recuperável com o decorrer do tempo.

2.8.1 Retração do Concreto :

A retração é um fenômeno conseqüente da perda de água do concreto para o meio ambiente, podendo ser:

Retração Plástica, que ocorre quando o concreto encontra-se ainda em estado plástico, antes da pega. Segundo NEVILLE (1982), deve-se evitar nessa fase, a perda de água superficial, para o meio ambiente; Encontra-se diretamente ligada ao teor de cimento no concreto e a aceleração de sua rigidez.

Já a Retração Hidráulica, consiste na saída da água do concreto, quando conservado em ambientes não saturados, durante sua secagem. A perda de água livre, que ocorre inicialmente causa pouca ou nenhuma retração. A continuação da secagem faz com que a água adsorvida seja removida, ocasionando uma diminuição no volume de concreto.

Em termos práticos, a retração total fica caracterizada pela retração hidráulica.

2.9 A CURA A VAPOR DO CONCRETO :

O processo de cura a vapor do concreto, pode ser considerado como um caso especial de cura úmida, cujo objetivo consiste em acelerar o endurecimento do concreto nas primeiras horas, de modo que se atinja uma resistência inicial suficientemente alta, que permita a desforma e o seu manuseio do concreto o mais cedo possível.

Consiste na utilização de uma câmara fechada com circulação de vapor d'água, gerada por uma fonte calorífica. O vapor de água ao entrar em contato com o concreto, condensa formando uma fina película de água, chamada membrana de cura a qual age no sentido de evitar que a água presente em seu interior (água de mistura), evapore de forma acelerada. Teremos então junto a superfície do concreto um estado parcialmente saturado enquanto no seu interior um estado saturado. Dessa forma, diminui o gradiente de umidade evitando-se o estabelecimento de caminhos e mecanismos de fluxo de água através das peças (GOWRIPALAN, 1990).

Ainda, as temperaturas a serem aplicadas, bem como o período de sua aplicação, durante o ciclo de cura, influenciarão tanto na resistência inicial quanto na resistência em idades mais avançadas do concreto[36]. Será necessário uma avaliação para que possamos

obter uma alta percentagem da resistência às primeiras idades e uma resistência pré-estabelecida a longo prazo.

A partir de determinadas considerações, poderemos adotar um ciclo de cura para determinado tipo de concreto, ou um concreto que se adapte a um conveniente ciclo de cura a vapor.

Embora um otimizado ciclo de cura a vapor dependa do tipo de produto de concreto a ser considerado, um satisfatório ciclo para esse tipo de tratamento ocorre quando não existem interrupções na cura do concreto, tanto nos períodos de aquecimento quanto no de resfriamento. Caracteriza-se o ciclo de cura a vapor, por um ciclo teórico de tratamento bem definido, que é constituído por quatro fases e que serão abordadas a seguir:

2.9.1 Fase I - Período de conservação inicial, preliminar ou de pré-tratamento.

Consiste na primeira fase do ciclo de cura a vapor, ou seja, após a mistura, adensamento e lançamento. É a fase onde o concreto encontra-se em estado plástico ficando caracterizado pela pega inicial. Destaca-se pela presença dos fenômenos de natureza química, como as reações entre a água e o cimento, e principalmente pelos fenômenos de natureza física conseqüentes da dilatação dos vários componentes do concreto, função de sua natureza e constituição, influenciados pela ação da temperatura ambiental.

Devido ao elevado coeficiente de dilatação da água, deve-se evitar o aquecimento nessa fase em vista da mesma ainda se encontrar não combinada com os demais componentes do concreto. Também o ar incluso provocaria uma expansão, dando origem a certa pressão interna, que por sua vez originariam poros, os quais continuariam existindo após a consolidação total da estrutura, enfraquecendo a estrutura do concreto.

Assim, o concreto fresco ao ser lançado e se imediatamente sofrer aquecimento, ocasionaria expansões em seus componentes, a velocidades diferentes. Essas diferenças constituiriam esforços potencialmente distorcidos que ocasionariam a formação de vazios e que poderiam tornar-se capilares, do interior à superfície, estabelecendo caminhos no concreto e com isto diminuindo sua resistência; Nessas condições, poderão ocorrer rupturas internas nas peças de concreto e embora aumente sua resistência inicial, poderá comprometer a sua resistência futura.

Entretanto, se houver um período de retardo de 3 a 5 horas, o concreto atingirá um grau de homogeneidade e resistência absorvendo as tensões iniciais (KAFRY, 1977).

O objetivo nessa fase é que a velocidade de ganho de resistência do concreto seja maior que a velocidade com que se formam as tensões térmicas.

Uma hidratação inicial rápida, provavelmente formará uma estrutura mais pobre, menor relação gel/espaco, o que implicará em maior porosidade, retardando a subsequente hidratação e formação de seus produtos no interior da pasta. Resulta desse fato, uma distribuição não uniforme, pois não haverá tempo disponível para uma precipitação uniforme no espaco intersticial e também para difusão dos produtos de hidratação para longe dos grãos de cimento (NEVILLE, 1982).

Essa fase do ciclo de cura, depende ainda da relação água/cimento: Quanto maior for essa relação, maior o período de pré-tratamento.

A experiência, deduzida de ensaios e comprovações realizadas na prática operativa, (SAUL, 1951; CARINO, 1983 e HANSON, 1963) permite assinalar orientações, diretrizes ou pontos de partida para a obtenção de resultados satisfatórios nessa fase.

2.9.2 Fase II - Elevação da temperatura ou aumento da velocidade de aquecimento.

Nessa fase, destacam-se como de fundamental importância, os gradientes térmicos originados pela diferença de temperaturas entre o interior do concreto e o seu ambiente circundante.

Os gradientes térmicos, agem diretamente sobre as propriedades físicas do concreto, ocasionando campos de esforços sobre o mesmo, o que vem a influenciar substancialmente em sua estrutura e sua densidade.

Portanto, deve haver controles sobre esses gradientes térmicos, ou melhor, controle em relação aos aumentos da temperatura ou do aquecimento.

Uma rápida elevação da temperatura, produzirá desequilíbrios de tal ordem que poderá ocasionar microfissuras no concreto. Esses fenômenos, implicariam numa diminuição da resistência mecânica.

O ideal nessa fase do ciclo de cura do concreto, seria o aumento progressivo da temperatura dentro de uma prudente limitação (HANSON, 1963; VILAGUT, 1975), sendo prático, aumentar a temperatura, na faixa de 15°C a 35°C por hora, função do método e das peças de concreto a serem curadas.

Essa fase, fica bem caracterizada, pela temperatura na parte interior do concreto, ser menor que a temperatura em sua superfície, que é o requisito básico para a formação de um gradiente térmico entre o interior e o exterior.

Os gradientes térmicos, são influenciados principalmente pelos seguintes fatores:

- Espessura da peça de concreto;

- Velocidade de calefação;
- Dosagens de cimento;
- Calor de hidratação do cimento.

A tendência ao final dessa fase de aquecimento é de se equilibrarem as temperaturas interna e externa, anulando-se praticamente suas diferenças (VILAGUT, 1975).

2.9.3 - Fase III - Fase isotérmica:

Essa fase do ciclo de cura a vapor, encontra-se caracterizada por dois fatores de fundamental importância:

A Temperatura máxima constante, e o seu período de duração. Os dois fatores são conjugados, e contribuem para atingir a resistência pré-determinada para o concreto.

Além do sistema de cura formado entre a câmara e o concreto, influenciam também a espessura da peça, a dosagem, o adensamento do concreto e o calor de hidratação do cimento. Caso a temperatura no interior da câmara seja menor que a da massa de concreto poderá produzir-se uma dessecação, tanto maior, quanto mais intenso for o gradiente de temperatura, fazendo com que a água saia de dentro do concreto, deixando a mistura com quantidade insuficiente para completar o processo de hidratação.

O mesmo ocorre no caso da água ser transformada em vapor no interior do concreto, causando sérios defeitos estruturais.

Nos tratamentos hidrotérmicos, ou seja, nos tratamentos térmicos com vapor livre na pressão atmosférica, a temperatura máxima que se pode atingir é em alguns casos, normalmente na média de 80°C.

A temperatura de cura, poderá ficar limitada em torno de 80°C e só se justificaria ultrapassar esse limite no caso do uso de cimentos com baixo calor de hidratação, haja vista que sendo a hidratação um fenômeno exotérmico, tenderia a aumentar a temperatura no interior da câmara, através do calor liberado pelas reações.

Os valores mais frequentes assinalados pela prática, estão compreendido entre 70°C a 90°C (VILAGUT, 1975).

2.9.4- Fase IV - Diminuição da temperatura. (Resfriamento)

Essa fase do ciclo de cura a vapor, caracteriza-se pela retirada do agente calorífico da câmara, o que ocasionará uma diminuição da temperatura no interior da mesma, produzindo assim um gradiente térmico no concreto, devido as diferentes temperaturas entre o interior do concreto e a sua superfície.

Para que esses agentes não provoquem tensões perniciosas, será preciso evitar os impactos térmicos, assim como as variações bruscas de umidade. A velocidade de resfriamento deve ser lenta e gradual, objetivando contribuir positivamente no final do período de tratamento.

2.10 OTIMIZAÇÃO DO AMBIENTE DE CURA E FATORES TECNOLÓGICOS PARA ACELERAÇÃO DA RESISTÊNCIA

Qualquer indústria que emprega um processo intensivo de energia necessita desenvolver informações para otimizar o processo. A indústria de pré-moldados de concreto, igualmente necessita atingir alta resistência a compressão nas idades iniciais, geralmente 10 a 12 Mpa, para permitir a desforma e movimentação da peça (ABCI).

PFEIFER e LANDGREN revisaram a literatura entre os anos de 1950 a 1980 com a finalidade de identificar fatores específicos a serem utilizados para otimização da energia com vistas a influenciar o desenvolvimento de uma tecnologia de cura .

Os principais fatores relatados foram:

- O conteúdo de C3S no cimento portland deveria estar na faixa de 55% a 65%.
- O conteúdo de C3A deveria estar na faixa de 8 a 14%.
- A finura do cimento portland deveria ser razoavelmente alta. O conteúdo de SO₃ deveria ser otimizado de acordo com a composição química do cimento e a temperatura de cura.
- A temperatura inicial na cura do concreto deveria estar na faixa de 22°C a 38°C . Essa temperatura inicial deveria ser mantida durante um determinado período de repouso.
- O slump do concreto seria tão baixo quanto possível.
- O aumento da temperatura do sistema poderia ser de 22° a 44°C por hora.
- Após uma temperatura máxima de cura aplicada por determinado período, a fonte de calor poderia ser desativada, devendo o sistema possuir bom isolamento térmico para evitar um rápido resfriamento do concreto.

Ainda, a menor resistência fora obtida para a menor temperatura isotérmica associada ao menor período de aplicação (3 horas).

A resistência máxima, fora obtida para a máxima temperatura testada (82°C) e para o maior período de aplicação dessa temperatura (10 horas).

SAUL, 1951 e HIGGSON, 1961, constataram que a resistência nas primeiras idades do concreto, cresce com o aumento do período de pré-tratamento.

2.11 RESISTÊNCIA DO CONCRETO, COMO FATOR DEPENDENTE DA CURA :

Ao nível de microestrutura, nas primeiras idades, o C3S é o principal responsável pela resistência mecânica. Em sua reação, libera grande quantidade de calor de hidratação. O C2S adquire resistência mecânica ao longo do tempo, devido ser atacado lentamente pela água. Os demais compostos (C3A e C4AF) apresentam pouquíssima contribuição na resistência à compressão.

Conforme NEVILLE (1982), ao nível de macroestrutura, a resistência do concreto resulta de:

- A resistência da argamassa
 - A aderência entre a argamassa e o agregado graúdo.
- A resistência das partículas de agregado graúdo.
- A relação entre cimento e água de amassamento.
- Relação entre cimento e agregado.
- Granulometria, textura superficial, forma,
- Resistência e rigidez das partículas de agregado.
- Tamanho máximo do agregado.

Segundo a NBR 6118, uma dosagem experimental terá por fim estabelecer o traço do concreto para que este tenha a resistência e a trabalhabilidade previstas. Nessas condições, a dosagem experimental precisa considerar as características do material que vai ser usado e proporcioná-lo, de modo a oferecer a resistência pretendida (53).

Segundo PINHEIRO (1987), pode ser seguida uma orientação através do seguinte roteiro:

- Caracterização dos materiais.

- Estudo da dimensão das peças a concretar.
- Cálculo da resistência de dosagem.
- Cálculo do fator água/cimento.
- Estabelecimento do traço.

A resistência do concreto, dada essas seleções e proporções dos materiais, fica influenciada principalmente, pela porosidade, ou seja, pelo volume total de vazios do concreto, ar aprisionado, poros capilares, poros de gel e ar incorporado, que se encontram diretamente ligados ao grau de adensamento, a relação água/cimento e ao grau de hidratação da pasta.

Como o presente trabalho, não visa analisar a resistência do concreto em sua íntegra, a trataremos como um fator conseqüente de determinadas condições de cura.

Segundo POWERS (1983), a hidratação cessa abaixo de 80% de umidade relativa; a própria cura mantém essa percentagem mínima, retendo a umidade no concreto, quando a hidratação avança para uma extensão máxima, melhorando suas propriedades.

Segundo o trabalho de POPOVICS (1986), a resistência a compressão surge como uma conseqüência do gradiente de umidade e não pelo seu conteúdo global, sendo esse gradiente maior quando a parte externa dos corpos de prova possuem um conteúdo de umidade menor em relação ao interior e vice-versa.

2.12 MATURIDADE

2.12.1 Características:

O objetivo do trabalho a ser desenvolvido será a quantificação da energia necessária para a cura do concreto. Isso envolve alguns fatores como previsão da resistência inicial, segurança quanto a remoção de formas e rearmazenamento, aplicação de protensão ou outros tratamentos mecânicos, (transporte e rapidez na liberação dos produtos). Surge dessa forma a maturidade como um fator intermediário para previsão da resistência nas primeiras idades.

Por muitos anos, tem sido registrado que uma simples função matemática do tempo e temperatura, poderiam prever determinada resistência do concreto, através de cálculo, sem testes mecânicos. O trabalho de NAIK (1980), relata que muitas funções foram usadas para expressar essas relações, dando origem ao que é conhecido como maturidade do concreto. Expressões essas que atingem determinados valores, que serão posteriormente usados em correlações com a resistência do concreto.

Saul (1951), descreveu que o efeito pode ser numericamente combinado e representado pelo produto entre o tempo decorrido e a aplicação da temperatura durante o endurecimento do concreto. O somatório dos produtos, (tempo e temperatura) acumulados durante intervalos no processo de endurecimento, foi definido como a maturidade do concreto. O conceito de maturidade fica bem caracterizado segundo a Lei de Saul.

2.12.2 lei de Saul

De acordo com a regra de maturidade sugerida por SAUL (1951), amostras de um dado concreto, adquirirão aproximadamente a mesma resistência quando possuírem maturidades iguais. sugeriu também que para uma temperatura abaixo da do congelamento, cessa o ganho de resistência do concreto, devido cessar os processos de reações. Essas idéias podem ser expressadas pela equação:

$$M_s = \Sigma (T - T_0) dt \quad (2.1)$$

T- Temperatura média do concreto (°C), durante o intervalo de tempo considerado.

T₀- Ponto de congelamento da água (0°C).

dt - Intervalo de tempo do processo de endurecimento.

BERGSTROM, citado por NAIK (1980), sugeriu que a temperatura t_0 do concreto fosse contada de um dado valor de -10°C . Outros valores empíricos foram sugeridos, mas o valor acima foi o mais largamente aceito.

Assim a função maturidade de Saul toma a forma:

$$M_s = \sum (T+10)dt \quad (2.2)$$

Novamente CARINO (1989), determinou aproximadamente o tempo que os concretos curados a uma temperatura de 20°C adquiririam a mesma resistência a compressão que os concretos similares submetidos a diferentes temperaturas de cura.

O processo de maturidade do concreto, pode ainda ser obtido por expressões baseadas na velocidade de reação do cimento. É o caso de HANSEN E PEDERSEN, citados por CHENGIU (1989). Também pode ser obtido a maturidade pelo binômio tempo e temperatura, conforme especificam os autores WEAVER e SADGROVE (1989), em sua equação parabólica.

2.12.3 Relação entre resistência do concreto e maturidade:

Existem algumas relações que tentam equacionar a resistência do concreto em função da maturidade. Entre as principais destacam-se:

PLOWMAN (1956), que sugeriu uma função semilogaritmica como uma apropriada relação resistência-maturidade:

$$S = a + b \cdot \log M \quad (2.3)$$

S- Resistência

M- Maturidade

a,b- Coeficientes de regressão linear.

RAMAKRISHNAN e LI (1984), fizeram uma investigação compreensiva, usando a relação de Plowman e verificaram/concluíram a validade da relação resistência-maturidade, conforme definida por PLOWMAN (1956).

CHIN (1983), sugeriu que a relação resistência-maturidade do concreto, poderia ser representada por uma hipérbole com a seguinte equação:

$$S = \frac{M}{(1/A + M/S_u)} \quad (2.4)$$

S- Resistência

M- Maturidade

S_u- Limite de resistência quando a maturidade tende ao infinito.

A- Modelo inicial da curva resistência-maturidade.

Os parâmetros A e S_u tem uma significância física, e são geralmente ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

KEE (1971), propôs sua equação parabólica :

$$S = M_s / a.M_s + b \quad (2.5)$$

Sendo a,b constantes a serem determinadas experimentalmente .

S - A resistência

M_s- Maturidade

CARINO (1983), fez uma derivação teórica para a equação e representou a relação resistência-maturidade, na seguinte forma:

$$S = \frac{(M-M_0)R_u}{K(M-M_0)} \quad (2.6)$$

R_u- Resistência última do concreto para maturidade infinita.

M- maturidade do concreto, expressada por quaisquer das funções maturidade proposta.

M₀- Maturidade do concreto quando inicia o endurecimento

K- Uma constante

NAIK (1980), demonstrou que pode ser usada a relação resistência-maturidade para um determinado traço de concreto, com o objetivo de fazer uma previsão da resistência média no local com o mesmo grau de segurança que um ensaio a compressão normal.

Segundo MALHOTRA (1980), que organizou uma vasta revisão bibliográfica sobre o conceito de maturidade, o método provavelmente tem o potencial para determinar não somente a resistência a compressão , mas também a resistência a tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, etc.

GUO CHENGIU (1989), chegou a conclusão que:

- O método da maturidade pode ser aceito e admitido para prever a resistência do concreto em suas idades iniciais, onde o erro obtido na previsão, pode não exceder o que usualmente é previsto nos resultados dos testes de resistência.

- Quando a resistência do concreto é prevista baseados em relações resistência-maturidade, equações logarítmicas na forma $S=a+b\log M$ podem ser usadas com o objetivo de simplificar o cálculo.

3 A ENERGIA SOLAR

3.1 CONCEITOS GERAIS (GLOSSÁRIO TÉCNICO):

3.1.1 A constante solar:

O Sol é uma esfera com gases intensamente quente, com um diâmetro de 1.39×10^9 m e distante em torno de 1.5×10^{11} m da Terra. Tem uma temperatura efetiva de um corpo negro a 5762K, ou seja, nessa temperatura, um corpo negro irradia a mesma quantidade de energia que o Sol (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Ainda, as temperaturas em suas regiões centrais são variavelmente estimadas entre 8×10^6 K a 40×10^6 K, com uma densidade de cerca de 100 vezes a da água, onde seus gases componentes, são retidos por forças gravitacionais.

A energia é produzida no interior da esfera solar, transferida para sua superfície e então irradiada para o espaço. A radiação proveniente do Sol e recebida pela Terra, possui um valor aproximadamente constante, na camada externa da atmosfera.

Assim define-se a constante solar como sendo a energia do Sol, por unidade de tempo, recebida por uma unidade de área perpendicular à direção da propagação dessa radiação, na distância média entre Sol e Terra, fora da atmosfera (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Muitos valores diferentes foram encontrados para a constante solar, mas o mais aceito é de 1353 W/m^2 ou $4871 \text{ MJ/m}^2\text{h}$ com um erro estimado em torno de $\pm 1.5\%$.

3.1.2 Distribuição Espectral da Radiação Extraterrestre:

Conforme citado em DUFFIE e BECKMAN (1980), a radiação extraterrestre sofre reajuste a cada dia do ano, sendo obtida através da equação :

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos(360n/365)) \quad (3.1)$$

n = enésimo dia do ano.

G_{sc} = Constante solar (1353 W/m^2).

G_{on} = Radiação extraterrestre

Esse reajuste deve-se a variação da distância Sol-Terra (1.7%), conseqüência da excentricidade da órbita da terra .

A distribuição espectral da radiação extraterrestre, tem um padrão segundo o adotado pela NASA/ASTM conforme Figura. 3.1 abaixo (DUFFIE e BECKMAN, 1980):

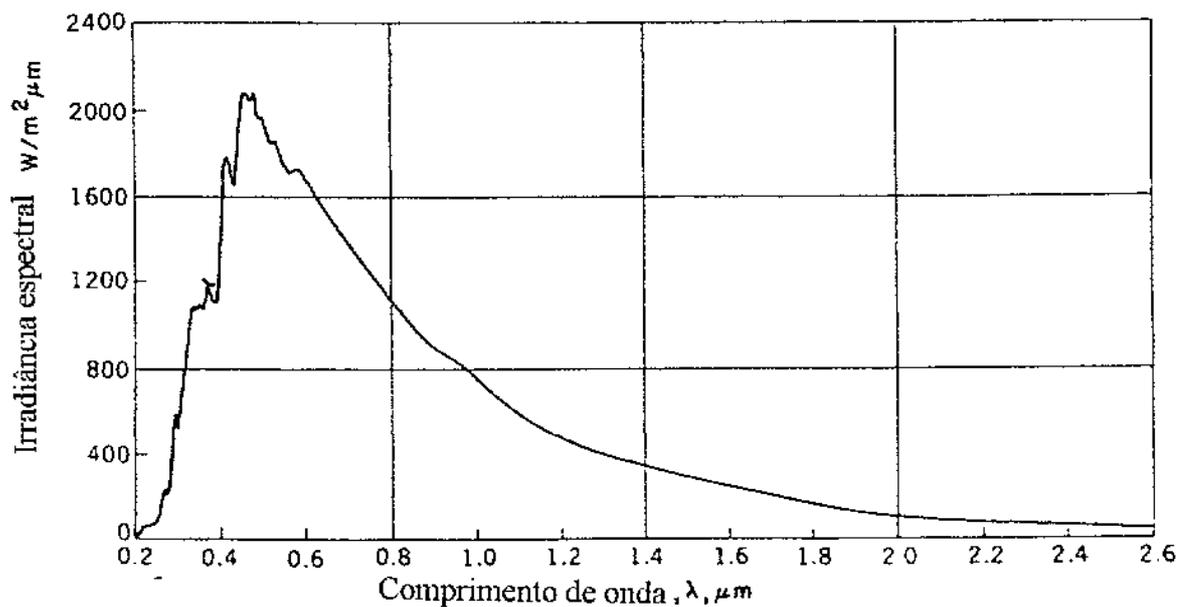


FIGURA 3.1 - Radiância espectral padrão para uma distância média sol-terra e uma constante solar de 1353 W/m^2 .

3.1.3 Espectro Eletromagnético

A radiação eletromagnética, consiste na energia que é propagada, na velocidade da luz, através do espaço (DUFFIE e BECKMAN, 1980). É emitida pelos corpos, em virtude de suas temperaturas. Os átomos, moléculas ou elétrons, são levados a estados de maior energia e retornam espontaneamente a estados de menor energia, quando então emitem energia na forma de radiação eletro-magnética (HOLMAN, 1963).

Devido a emissão resultar em mudanças nos estados eletrônicos, rotacionais e vibracionais desses átomos e moléculas, a radiação emitida é usualmente fracionada em

comprimentos de onda. O espectro da radiação emitida é usualmente dividida em bandas de comprimento de onda. A Figura. 3.2 mostra-nos o espectro da radiação eletromagnética, onde os limites dos comprimentos de onda, associados com os vários nomes bem como os mecanismos que produzem a radiação não são severamente definidos. (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

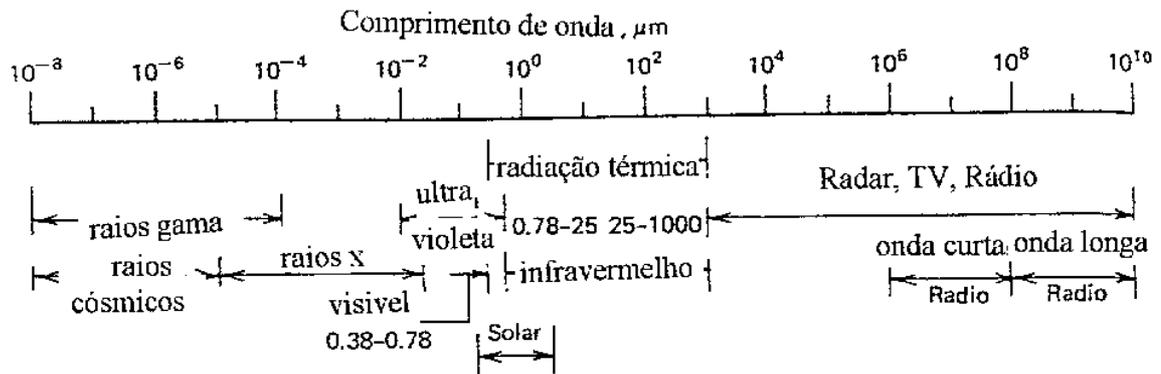


FIGURA 3.2 - Espectro da radiação eletromagnética.

3.1.4 Banda de Radiação Térmica:

Os comprimentos de onda de importância na energia solar e suas aplicações estão na faixa de 0.3 a 25 μm . Isso inclui o infravermelho, o visível e parte do espectro ultravioleta . Vide Figura 3.2.

3.1.5 Banda de radiação solar:

Banda de comprimentos de onda do espectro eletromagnético que compreende a radiação solar incidente na superfície da terra. Estão compreendidos na faixa de 0.3 a 3 μm . Vide Figura 3.2.

3.1.6 Banda de emissão:

Consiste nos comprimentos de onda correspondentes à emissão dos corpos, na temperatura de trabalho. Quando não é especificada essa temperatura, considera-se a banda de emissão compreendida entre 3 a 30 μm .

3.1.7 Superfícies Seletivas:

Superfícies seletivas, consiste em superfícies que fazem discriminação em suas propriedades de absorção e de emissão, entre as bandas de radiação solar e de emissão, respectivamente.

3.1.8 Corpo Negro:

Por definição, um corpo negro consiste num perfeito absorvedor da radiação solar. Não importando os comprimentos de onda ou suas direções incidentes sobre o mesmo. Toda a radiação incidente será absorvida .

Um corpo negro é também um perfeito emissor da radiação térmica, um corpo que emite o máximo de radiação possível.

Embora um corpo negro perfeito não exista na natureza, alguns materiais se aproximam do mesmo (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

3.1.9 Emitância

Consiste na relação que existe entre a potência emitida por uma superfície real e a potência emitida por um corpo negro na mesma temperatura.

3.1.10 Absortância

Consiste na fração da radiação incidente que é absorvida pela superfície. Ao contrário da emitância, a absortância depende da distribuição espectral e espacial da radiação incidente, e é função das características da superfície e da radiação incidente (KREZNINGER, 1979). No caso específico de incidência da radiação solar, teremos absortância solar.

3.1.11 Refletância

Consiste na fração da radiação incidente que foi refletida, levando-se em conta a direção de incidência, bem como a direção de reflexão. No caso de distribuição espectral e espacial da radiação solar, temos a refletância solar (KREZNINGER, 1979).

3.1.12 Transmitância

Consiste na fração da radiação incidente que transpõe o material semitransparente. No caso em que a radiação incidente tenha a distribuição espectral da radiação solar, teremos a transmitância solar (KREZNINGER, 1979).

Aprofundamentos referentes ao item 2.1 citado acima, podem ser encontrados nas referências (KREZNINGER, 1979); HOLMAN (1963); LUNDE (1980) e DUFFIE (1980).

3.2 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é parte da ciência que estuda a transferência de energia, que pode tomar lugar entre corpos materiais, como resultado da diferença de temperatura entre os mesmos. A termodinâmica ensina que essa transferência de energia é definida como calor. Explica como ocorre o processo de transferência de calor, como também dá a previsão da velocidade de transferência de calor, sob certas condições específicas HOLMAN (1963).

As formas de transferência de calor podem ser:

3.2.1 Condução:

Quando da existência de um gradiente de temperatura em um corpo, há uma transferência de energia da região de maior temperatura para a região de menor temperatura. Dizemos então, que a energia é transferida por condução e que a velocidade de transferência de calor para a unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura .

O tratamento analítico de transferência de calor por condução, segue a Lei de Fourier (HOLMAN, 1963):

$$q = -K.A.(T_2-T_1) / dx \quad (3.2)$$

q - Taxa de transferência de calor.

A - Área da superfície.

K - Coeficiente de condutividade térmica do material.

T₂ - Maior temperatura atuante na superfície.

T₁ - Menor temperatura atuante na superfície.

Essa equação, define a condutividade térmica para corpos sólidos.

3.2.2 Convecção:

A transferência de calor por Convecção, envolve necessariamente um líquido e ou um gás. Devido ao ganho ou perda de calor do líquido ou gás em contacto com uma superfície, haverá uma variação em sua densidade o que implica em movimentação conectiva de forma natural ou livre.

O efeito convectivo é expressado através da Lei de resfriamento de Newton (HOLMAN, 1980).

$$q = h_c A (T_w - T^\infty) \quad (3.3)$$

q - Fluxo de calor transferido por Convecção, algumas vezes chamado de filme de condutância, por causa do processo de condução entre a camada fina estacionária do fluido e a superfície da parede.

A - Área da superfície.

T_w - Temperatura da superfície.

T[∞] - Temperatura do fluido.

h_c - Coeficiente de Convecção. A transferência de calor por Convecção, depende da viscosidade do fluido que age principalmente na velocidade e transferência de energia, junto às paredes sólidas e também das propriedades térmicas do fluido como condutividade, calor específico, densidade .

3.2.3 Radiação

A radiação eletromagnética não necessita de um meio para se propagar, como é o caso da condução ou Convecção, podendo até mesmo se propagar no vácuo perfeito; seu espectro, dado na Figura 3.2, envolve várias faixas de comprimento de onda. Em nosso caso, nos limitaremos a radiação térmica.

Considerações termodinâmicas mostram que um radiador ideal, ou corpo negro, emitirá energia em uma velocidade proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo (HOLMAN, 1980), ou seja:

$$q = \sigma A(T_2^4 - T_1^4) \quad (3.4)$$

σ - Constante de Stefann-Boltzmann

A - Área da superfície.

T2- Temperatura maior.

T1- Temperatura menor.

Mais sobre esses conceitos podem ser encontrados na referência .

3.3 OS EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA RADIAÇÃO SOLAR (RADIAÇÃO TERRESTRE)

A radiação solar, quando atravessa a atmosfera da Terra, sofre consideráveis alterações, devido a absorção e seu espalhamento. Entre os principais elementos presentes na atmosfera e que agem diretamente na radiação solar, destacamos o vapor d'água, o ozônio e o oxigênio.

O vapor d'água contido na atmosfera é um elemento que atua no sentido de absorver a radiação solar, manifestando-se pelas absorções nas bandas específicas de comprimento de

onda da região infravermelha; isso implica em picos e depressões dessa região, quando da distribuição espectral da radiação terrestre.

O ozônio contido na atmosfera, também age no sentido de absorver a radiação solar. Ele praticamente elimina toda a radiação solar ultravioleta, de tal forma que pouca radiação de comprimentos de onda menores que $0.3 \mu\text{m}$ chegam à terra.

O oxigênio também age no sentido de absorver a radiação solar.

O espalhamento da radiação solar é devido principalmente a moléculas de gás, partículas e gotas d'água. As nuvens se destacam como um agente espalhador de caráter particular, onde reduzem a radiação solar incidente em até 80 a 90% (MARROQUIN, 1989).

Influenciam ainda na radiação solar, além do espalhamento e absorção por parte da atmosfera, a latitude do local, a altitude e o ângulo de incidência (LUNDE, 1980).

3.4 CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR

Os dispositivos utilizados na captação da energia solar, são os chamados coletores solares e os concentradores solares. São sistemas que empregam o princípio da conversão da energia eletromagnética proveniente do sol em energia termodinâmica.

Os concentradores solares se justificam quando do uso de temperaturas médias (100°C a 200°C) e a altas temperatura (acima de 200°C), quando então se utilizam da radiação solar direta, de forma concentrada.

Conforme visto no segundo capítulo, a quantidade de energia, ou seja os limites máximo de temperatura necessários a cura do concreto situam-se na faixa de 70°C a 90°C . Esse fato, vem a justificar o uso de coletores solares de baixa concentração. Dessa forma, se destacam os coletores solares planos e as heliocâmaras (câmaras solares) como elementos a serem analisados nesse trabalho.

3.4.1 Coletores Solares Plano

São dispositivos que transformam a energia solar radiante em energia termodinâmica, sendo essa energia removida por um fluido (geralmente a água), que circula no interior de uma tubulação. A Figura 3.3 nos mostra o esquema de trocas de energia num coletor solar plano (ZILLES, 1988).

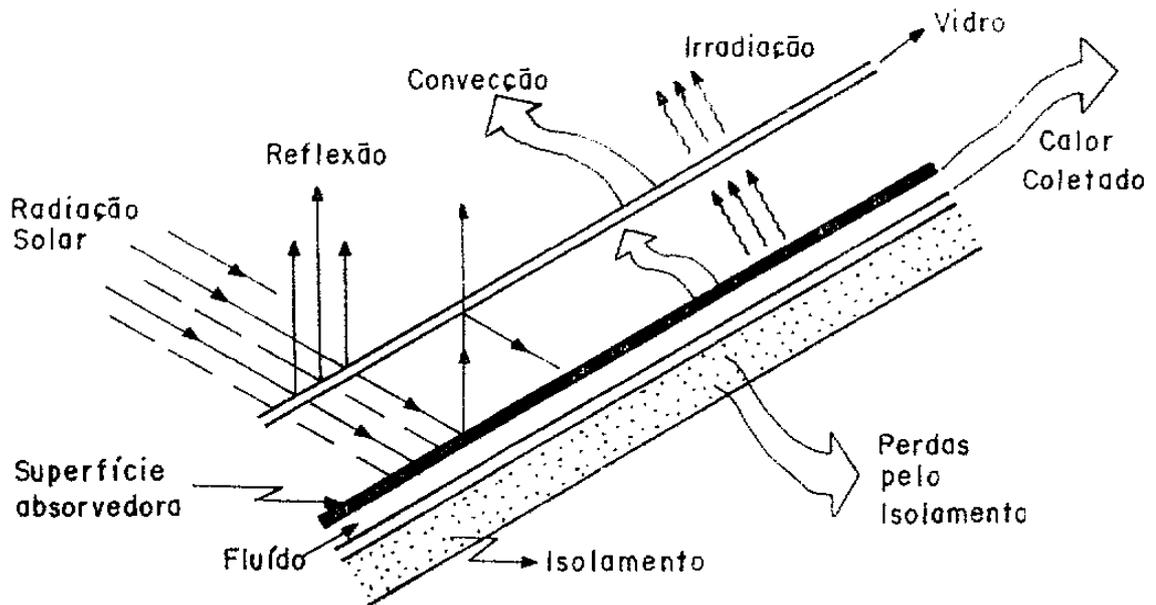


FIGURA 3.3 - Esquema de trocas de energia no coletor.

3.4.1.1 Elementos Componentes de um Coletor Solar:

A Figura 3.4 nos mostra o corte de um coletor solar plano tipo chapas tubo (ZILLES, 1988).

O coletor solar, é constituído de:

- Caixa do coletor.
- Material isolante.
- Placa absorvedora da radiação.
- Cobertura Transparente.
- Fluido.
- Tubulação (Dutos).

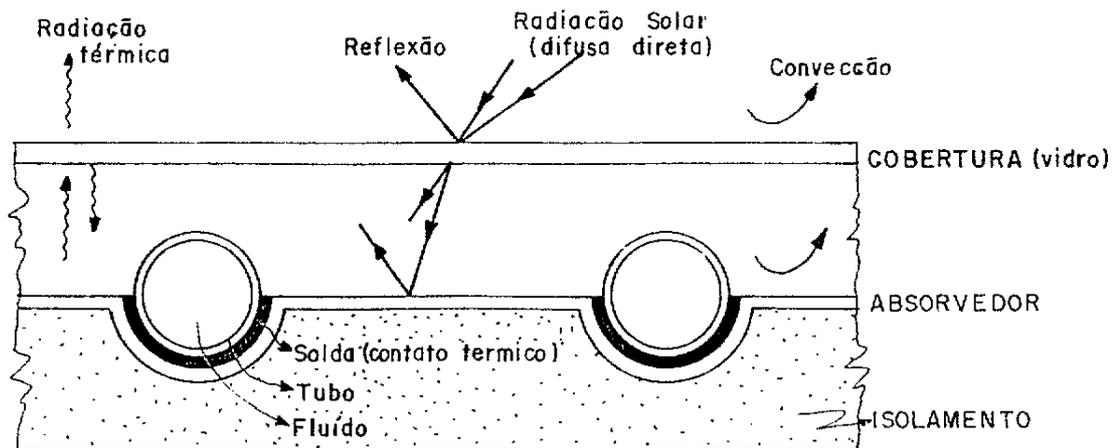


FIGURA 3.4 - Corte Esquemático de um coletor solar tipo chapa tubos.

3.4.1.1.1 Caixa do coletor:

A caixa do coletor, constitui-se no elemento estrutural do sistema de aquecimento.

Como materiais mais empregados em sua construção destacam-se:

- Fibra de vidro
- Chapa de ferro galvanizado
- Plástico rígido
- Fibrocimento
- Chapa ou perfil de alumínio
- Alvenaria de tijolos
- Madeira

3.4.1.1.2 materiais isolantes/vedação:

Os materiais isolantes, são os responsáveis pelo isolamento térmico do sistema, ou seja, para que o sistema possa funcionar de acordo com os níveis térmicos desejados, será importante reduzir ao máximo as perdas térmicas, evitando dessa forma as trocas de calor com o ambiente circundante.

São empregados materiais com baixa condutividade térmica. Para satisfazer as características de bom isolante térmico deverão ser satisfeitos os seguintes requisitos:

- Resistência às temperaturas as quais será submetido.
- Boa resistência mecânica.
- Resistência à ação das intempéries.

Como materiais isolantes mais empregados destacam-se a lã de vidro ou lã de rocha. Para a vedação destaca-se a borracha de silicone.

3.4.1.1.3 Placa absorvedora da radiação

Constitui-se na parte mais importante do coletor solar plano, pois em sua superfície é que se processa a conversão da energia solar em energia térmica. Os materiais que constituem a placa absorvedora, devem possuir bom coeficiente de absorção da radiação solar.

O objetivo dessa parte do coletor será coletar a maior quantidade possível de radiação de onda curta e emitir uma mínima quantidade de radiação de onda longa. Para essa finalidade, a superfície deve ter um elevado coeficiente de absorção no espectro solar e baixa emissividade com comprimento de onda longa.

A superfície coletora é normalmente metálica (cobre, alumínio ou ferro), para melhor transmitir aos dutos e fluido, a energia térmica absorvida, podendo também ser eventualmente de material plástico ou outros. Como essas superfícies metálicas são altamente refletoras, absorvem pequenas quantidades de energia incidente. Necessitam assim serem recobertas com fina camada de tinta ou óxido, que deve possuir características, como o alto coeficiente de absorção para todo o espectro solar e a menor emissividade possível na faixa infravermelha; É o caso da pintura com preto fosco.

A taxa de absorção e transferência de calor, depende das características materiais dessa placa, do acabamento da superfície e da sua cor. Depende também dos dutos e da velocidade com que circula o fluido no interior dos mesmos.

3.4.1.1.4 Cobertura

As coberturas de coletores planos, se caracterizam principalmente, por materiais que apresentam boa transparência no espectro solar. Como principais funções que desempenham as coberturas em coletores solares planos, temos a de impedir perdas convectivas provocadas pelo vento.

Em contrapartida, há perdas por reemissão resultante do aquecimento da cobertura, conseqüente da absorção da radiação solar, da radiação infravermelha emitida pela placa absorvedora, da Convecção do ar existente internamente no coletor e também das correntes de ar ligadas ao isolamento térmico da cobertura.

Outra função importante constitui-se na redução das perdas por radiação, devendo ser opaca à radiação infravermelha(ondas longas), emitida pela placa absorvedora, permitindo ao mesmo tempo a passagem da radiação do espectro solar (ondas curtas). Dessa maneira, haverá um aquecimento da placa, bem como a redução das perdas por radiação, caracterizando assim o efeito estufa.

A transmitância, refletância e absortância na cobertura, são funções da radiação incidente, da espessura da cobertura transparente, do índice de refração do material, do coeficiente de extinção do material.

Como material mais utilizado por suas características, destaca-se o vidro, devido a sua alta transmitância da radiação solar (83 a 91%), baixa transmitância térmica (0 a 3%) e também pela resistência a intempéries.

3.4.1.1.5 Fluido térmico

O fluido térmico tem a função de retirar calor do coletor solar. Essa remoção pode ser tanto direta quanto indireta, através de um trocador de calor.

Principais características que deve possuir o fluido são:

- Alta condutividade e capacidade térmica.
- Baixa viscosidade, densidade e coeficiente de expansão.

A água constitui-se num fluido que possui essas características.

3.4.1.1.6 Tubulações e conexões:

A tubulação em sistemas de aquecimento solar deve ser capaz de resistir o fluido circulante a temperaturas de até 100°C, sem degradação ou corrosão. O cobre é normalmente utilizado e apresenta boa resistência a corrosão, embora sensível ao ataque de cloro e a altos níveis de oxigênio.

O aço inox também tem excelente resistência a corrosão neste tipo de tubulação e tem a vantagem de possuir um menor coeficiente de expansão térmica, ocasionando menores perdas de calor em relação ao cobre.

3.4.1.2 Fator de Eficiência:

A eficiência (η), em um coletor solar plano, consiste na relação entre a quantidade de calor coletado pelo coletor em um dado período (energia útil - q_u) e a quantidade de energia (I), que chega até o mesmo nesse período.

$$\eta = q_u / I \quad (0 < \eta < 1) \quad (3.5)$$

A energia útil (q_u), resultará da diferença entre o calor absorvido pelo absorvedor (Q_a) e o calor perdido para o ambiente (Q_l).

$$\eta = \frac{Q_a - Q_l}{I} \quad (3.6)$$

Sendo que o calor absorvido pelo coletor (Q_a) poderá ser obtido pelo produto entre a transmissividade da cobertura (τ), a absortividade do absorvedor (α), o fluxo de radiação (I) e a área do coletor (A_c); Já a quantidade de energia perdida pelo sistema para o meio ambiente (Q_l), resultará do somatório entre as perdas por condução Convecção e radiação.

3.4.1.3 Disposição dos coletores:

Em vista de uma modulação e padronização, a área necessária de coletores solares planos pode ser formada pelo somatório de vários módulos de coletores padrões, que podem ser dispostos de diversas maneiras (BEZERRA, 1986):

- Disposição em paralelo.
- Disposição em Série.
- Disposição mista, em série-paralelo.

3.4.1.3.1- Disposição em paralelo:

A disposição em paralelo, consiste em interligar os módulos coletores de modo que o fluido circule em cada unidade como se fosse independente das demais unidades;

Supondo que todos os módulos coletores possuam as mesmas características e dimensões, o sistema de combinação funcionará como um único coletor, ou seja, a água circulará pelos mesmos, não havendo aumento de temperatura de um módulo para outro. A Figura 3.5 mostra essa associação em paralelo.

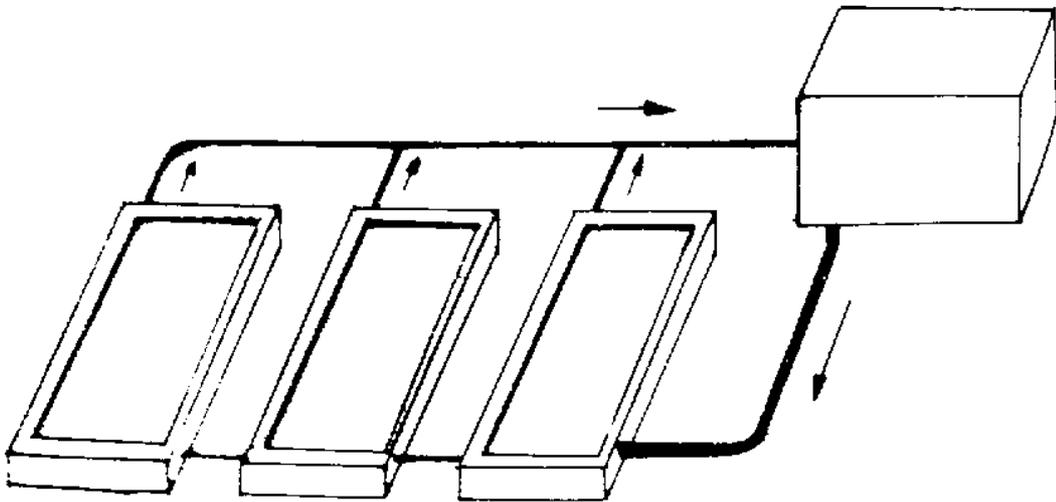


FIGURA 3.5 - Disposição em paralelo.

3.4.1.3.2- Disposição em série

A disposição em série consta de interligar os coletores de modo que o fluido que sai de uma unidade coletora, é o mesmo que entra na próxima unidade.

À medida que o fluido vai circulando no interior dos dutos, a temperatura do mesmo irá aumentando de modo que no último módulo, a temperatura será bem maior que no módulo inicial.

Os módulos de coletores solar planos trabalham, portanto, a temperaturas diferentes e em ordem crescente segundo a direção do fluxo. A Figura 3.6 mostra a associação em série.

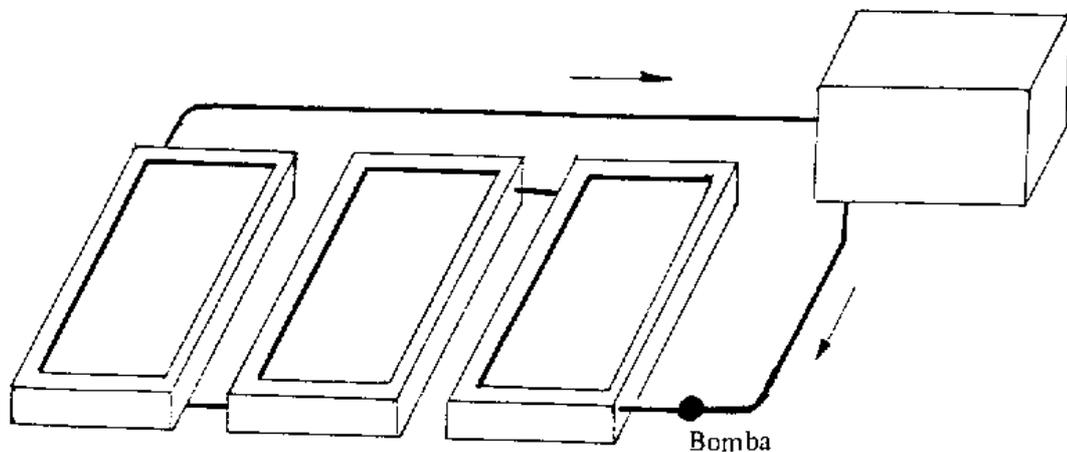


FIGURA 3.6 - Disposição em série.

3.4.1.3.3- Disposição série-paralelo

A disposição série-paralelo consiste num sistema misto, ou seja, subgrupos de módulos coletores ligados em série, enquanto que grupos de módulos coletores se ligam em paralelo e vice-versa.

3.4.1.4 Tipos de instalações:

O sistema de aquecimento de água, utilizando-se de energia solar, pode ser dividido em sistema ativo e sistema passivo.

3.4.1.4.1 Sistema ativo:

O sistema ativo, consiste numa circulação forçada do fluido a ser aquecido, através da utilização de uma bomba de recalque que o impulsionará no circuito, de uma maneira controlada.

O reservatório pode então ser instalado em qualquer altura, (abaixo ou acima) em relação ao sistema coletor.

3.4.1.4.2 Sistema passivo:

São os sistemas que funcionam com circulação natural ou termossifão, não utilizando bomba para fazer a circulação do fluido. No caso de utilizarmos coletores ligados a um reservatório a circulação terá início quando o sol passar a aquecer o fluido nos coletores, criando diferença de densidade entre o topo e o fundo do reservatório. Resultará numa circulação conectiva para a entrada do coletor, da entrada para a saída do coletor e da saída do coletor para o topo do reservatório. Desse modo, cria-se um diferencial de pressão devido aos gradientes térmicos, produzindo o escoamento do fluido aquecido sem qualquer outra fonte de energia, a não ser o sol. Assim, a cota dos coletores, poderá estar abaixo da cota do reservatório.

No caso de aquecimento, tendo como fluido circulante a água, teremos basicamente 5 tipos de instalações, a saber:

3.4.1.4.3 Circulação em circuito aberto:

A circulação em circuito aberto consta de um sistema, onde o próprio fluido a ser aquecido é o mesmo a ser consumido. Pode ser tanto em circulação natural (passiva), quanto em circulação forçada (ativa).

3.4.1.4.4 Circulação natural em circuito fechado:

O sistema é dito fechado devido a circulação do fluido acontecer entre o coletor e o trocador de calor que se localiza no interior de um reservatório. Esse fluido não é consumido, mas sim cede calor, através do trocador de calor, ao fluido de consumo.

3.4.1.4.5 Sistema misto com energia auxiliar:

Consiste de um sistema com a finalidade de incluir a energia auxiliar, para obtenção de uma temperatura pré- estabelecida . A energia auxiliar mais comum e mais utilizada é a energia elétrica, consistindo num sistema com aporte elétrico, o qual pode se apresentar principalmente de três maneiras diferentes, segundo mostra a Figura 3.7 (DUFFIE e BECKMAN, 1980):

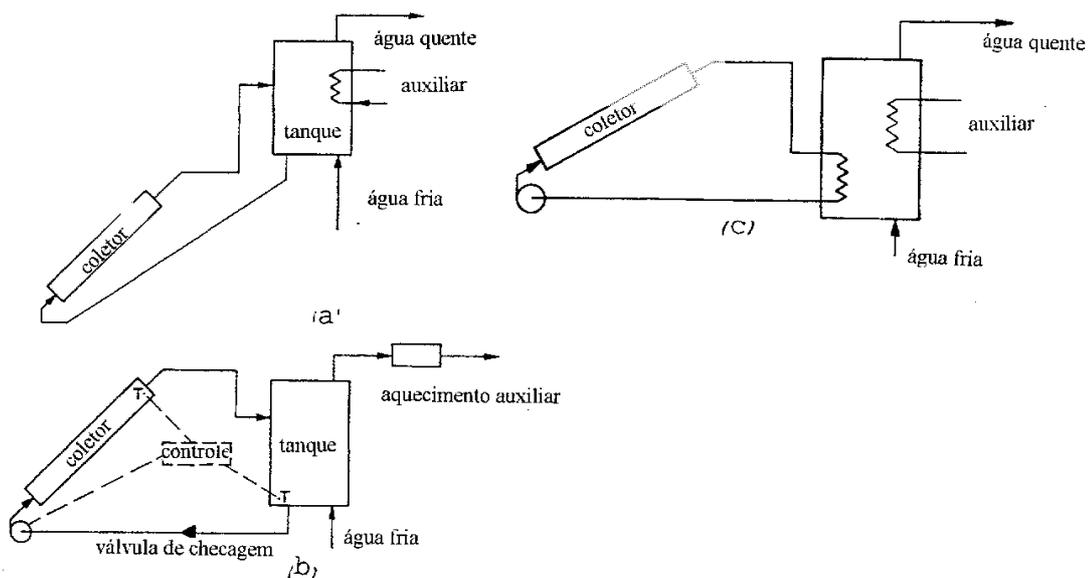


FIGURA 3.7 - Esquema de localização da energia auxiliar:

- Dentro do reservatório.
- Em linha com consumo.
- Fora do alcance do reservatório.

3.4.2 Heliocâmaras:

3.4.2.1- Características e elementos componentes:

As heliocâmaras são câmaras fechadas, que objetivam criar um sistema o mais hermético possível. Seu funcionamento pode ser baseado no princípio do destilador solar convencional (SARTORI e JAGUARIBE, 1985); porém visando criar um ambiente favorável em termos de umidade (a mais saturada possível) e uma elevada temperatura.

As heliocâmaras atuam como instalações energéticas de baixo potencial, transformando a energia solar em energia térmica. São constituídas pelos seguintes componentes: Conforme Figura 3.8 mostra a seção transversal de uma heliocâmara.

- Caixa da heliocâmara.
- Placas absorvedora da radiação solar.
- Materiais isolantes.
- Cobertura.
- Acumuladores de calor (facultativo).
- Caixa hermética (facultativo).
- Lâmina de água.

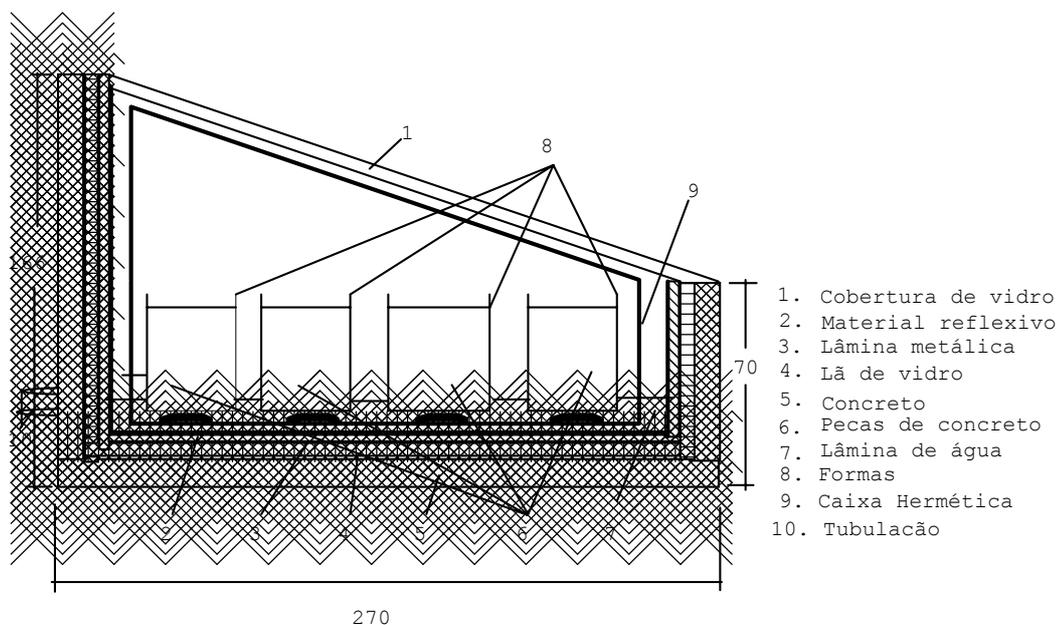


FIGURA 3.8 - Esquema de uma heliocâmara, seção transversal.

3.4.2.1.1. Caixa da heliocâmara:

A caixa da heliocâmara, possui funções estruturais, funções de isolamento térmico e funções de absorção e emissão de calor. É formada pela base ou fundo e pelas paredes ou laterais.

Como materiais mais empregados para a caixa merece destaque especial as paredes tipo sanduíches compostas de duas paredes de tijolos ou de concreto com um material isolante entre elas.

3.4.2.1.2 Placas absorvedora da radiação:

As placas absorvedoras são constituídas principalmente de metais ou outros materiais que retenham adequadamente o calor.

A taxa de absorção e transferência de calor, vai depender principalmente das características das placas usadas no interior das heliocâmaras, do acabamento de sua superfície e da sua cor. Destacam-se como materiais mais utilizados o ferro, o aço e o cobre.

3.4.2.1.3 Materiais isolantes:

Quanto ao isolamento térmico, prevalecem as mesmas características e materiais citados no item 3.4.1.1.2.

3.4.2.1.4 Cobertura:

Quanto a cobertura, são válidas as mesmas considerações descritas para a cobertura dos coletores solares planos item (3.4.1.1.4).

Opcionalmente na Figura 3.8, pode haver uma sobretampa sobre a cobertura, constituída por materiais isolantes e/ou refletores em sua superfície mais interna. Esta sobretampa estaria aberta durante o dia, permitindo a penetração da radiação solar, ao mesmo tempo em que refletiria calor para o interior da heliocâmara. Durante a noite, essa sobretampa estaria fechada o que reduziriam as perdas térmicas.

3.4.2.1.5 Acumuladores de calor:

São materiais que acumulam energia; Destacam-se entre eles os fosfatos, cloretos de cálcio, misturas de cloreto de cálcio e magnésio (MENÉNDEZ, 1989).

3.4.2.1.6 Caixa hermética: (Opcional)

A caixa hermética constitui-se de uma caixa fechada, localizada no interior da heliocâmara, composta por material metálico ou outro que retenha adequadamente o calor, por exemplo ferro, cobre ou aço; Sua superfície externa pode possuir características seletivas (item 3.1.7) enquanto sua superfície interna coberta com placas refletoras de calor, como é o caso do alumínio polimerizado.

3.4.2.1.7 Lâmina de água:

A Lâmina de água completa o sistema (base da heliocâmara), pois visa-se um máximo de saturação no ambiente interno da heliocâmara (ambiente de cura).

3.4.2.2 - Características Técnicas:

Os raios solares penetram na heliocâmara através da tampa e são absorvidos pelo seu fundo negro e suas paredes laterais. A energia absorvida, será agora transmitida em forma de calor para a lâmina de água que se aquecerá a uma temperatura acima da do vidro (cobertura).

Uma parte da água evapora para o ar existente sobre a lâmina d'água, e devido a diferença de temperatura entre a água e o vidro, o ar começa a circular, tornando o ambiente aquecido e saturado.

Nas horas noturnas, onde não há incidência solar direta, fecha-se a sobretampa (caso houver), onde a mesma agirá no sentido de impedir a saída da energia acumulada.

No caso de ser utilizado heliocâmaras com caixa hermética em seu interior, a parte superior dessa caixa será responsável pela absorção da energia solar, que será distribuída por toda a caixa hermética, criando um ambiente de elevada temperatura no seu interior, onde estarão as peças pré-fabricadas.

4. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA CURA DE CONCRETO (AVALIAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA)

4.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA:

O trabalho visa verificar a viabilidade técnica quanto a utilização de energia solar em produtos de concreto. A finalidade será atingir nesses produtos uma resistência mínima para serem desformados, logo após um ciclo de cura; parte-se de uma resistência mínima de projeto a ser atingida aos 28 dias, e tenta-se obter uma resistência mínima, para a desforma desses produtos pré-fabricados.

A seqüência de cálculo consiste em determinar a maturidade e o ciclo de cura do concreto, num período previamente estabelecido, (incluindo-se o tempo para o preparo, desforma, e limpeza da câmara, em relação ao próximo ciclo de cura) a partir de uma resistências de projeto e de desforma. Uma vez obtido o ciclo teórico de cura, o mesmo será adaptado numa faixa horária, de modo a otimizar o uso da energia solar. A solução para o problema apresenta-se por dois sistemas:

Através do uso de "coletores solares planos" com dutos de distribuição que chegam até uma câmara fechada de cura, onde serão curados os produtos pré-fabricados; e através do uso de "heliocâmara" que além de ser o sistema de captação energética, funcionará como uma câmara hermeticamente fechada, onde serão curados os produtos de concreto.

4.2 COLETORES SOLARES PLANOS:

4.2.1 Captação da energia solar :

Os coletores solares planos são dispositivos utilizados para coletar a energia solar, com orientações e inclinações previamente estabelecidas. O ideal seria orientar os coletores de forma a obter o máximo da radiação solar emitida. Nesse caso se disporiam os coletores de forma perpendicular à radiação solar. Os módulos coletores são orientados para o norte

(Caso das regiões localizadas no hemisfério sul) e vice-versa para os países do hemisfério Norte (12).

A inclinação dos coletores solares em relação ao plano horizontal do local a ser avaliado, estaria em torno da latitude do local com +- 10 graus (12). Assim, o rendimento dos módulos coletores estaria na dependência direta dos materiais componentes dos mesmos (item 3.4.1.1) bem como das condições locais e ambientais.

A avaliação (rendimento) dos coletores ocorre conforme sua performance, ou seja, através de um balanço de energia desde a incidência da radiação solar até sua transformação final em energia útil.

Uma forma mais prática, e que será adotada nesse trabalho, consiste em determinar a energia útil a ser absorvida pelos coletores solares planos, partindo-se da performance (eficiência) de coletores já avaliados na prática. Essa energia útil, absorvida pelos coletores solares planos, será repassada para um fluido (água), que circulará através de um sistema de distribuição.

4.2.2 Distribuição da energia solar, absorvida pelos coletores:

O sistema de distribuição consiste de uma rede de dutos, usados para transportar o fluido (água) de forma cíclica, entre os coletores, reservatório e a câmara de cura.

Segundo MCCALL (1982), as perdas de energia na distribuição, apresentam-se de duas formas a saber :

4.2.2.1 Quantidade de calor (energia) absorvida pela tubulação :

A quantidade de energia absorvida por um sistema de distribuição, poderá ser obtida pela equação 4.1.

$$Q_0 = W_p \cdot C_s \cdot dT \cdot L \quad (4.1)$$

W_p - Peso da tubulação por metro (Kg/m).

C_s - Calor específico do aço (Wh/ Kg.°C).

dT - Diferença entre as temperaturas (final e a inicial do duto) (°C).

L - Comprimento da tubulação (m).

4.2.2.2 Quantidade de calor perdido através da tubulação com isolamento térmico(Q_p), (principalmente por condução e Convecção).

Pode ser determinado através da equação 4.2 .

$$Q_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot dT \cdot H \cdot L}{\frac{\ln\left(\frac{R_o(p)}{R_i(p)}\right)}{K(p)} + \frac{\ln\left(\frac{R(i)}{R_o(i)}\right)}{K(i)}} \quad (4.2)$$

dT - Diferença entre as temperaturas (parte interna da tubulação e a externa do isolamento) (°C).

H - Número de horas em que o fluido fica circulando pela tubulação (h).

L - Comprimento da tubulação (m).

R_o(p)- Raio externo da tubulação (cm).

R_i(p)- Raio interno da tubulação (cm).

R_i(i)- Raio interno do isolamento (cm).

R_o(i)- Raio externo do isolamento (cm)

Ln - Logaritmo natural.

K(p) - Condutividade térmica da tubulação (W/m.°C).

K(i) - Condutividade térmica do isolamento (W/m.°C).

Uma vez ultrapassado o sistema de distribuição o fluido chegará até a câmara de cura.

4.2.3 Energia perdida através da câmara de cura:

Escolhido o modelo, assim como as dimensões e materiais componentes da câmara de cura, calcula-se a energia perdida desde seu interior até o meio ambiente, utilizando-se nesse caso, o método das resistências térmicas. A Figura 4.1 apresenta uma malha térmica para a câmara de cura

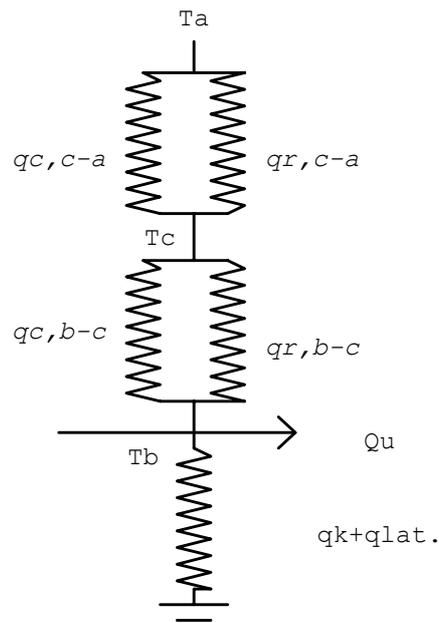


FIGURA 4.1 - Malha térmica para uma câmara de cura.; onde q_c representa o fluxo por Convecção; q_r o fluxo por radiação; q_k o fluxo por condução; Q_u a energia útil (absorvida pelo coletor).

4.2.3.1 Perdas de energia devido às transferências internas:

As perdas de energia devido às transferências internas (base da câmara até a cobertura), podem ser calculadas através das seguintes equações :

a) Perdas por Radiação (DUFFIE e BECKMAN, 1980):

$$h_{r-c} = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_b^4 - T_c^4) / (T_b - T_c) \quad (4.3)$$

h_{r-c} - Coeficiente de radiação ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

ε_p - Emissividade da placa .

σ - Constante de stefan-boltzmann ($5.76 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$).

T_b - Temperatura da placa base ($^\circ C$ ou K).

T_c - Temperatura da cobertura. ($^\circ C$ ou K).

b) Perdas por Convecção (SARTORI e JAGUARIBE) ;

$$h_{p-c} = 3.182 \left[T_b - T_c + \left(\frac{P_{wb} - P_{wc}}{2009 - P_{wb}} \right)^{1/3} \right] \quad (4.4)$$

h_{p-c} - Coeficiente de Convecção entre a base e a cobertura.

T_b - Temperatura da base (°C ou °K).

T_c - Temperatura da cobertura (°C ou °K).

P_{wb} - pressão parcial de vapor à temperatura da base (mmHg)

P_{wc} - Pressão parcial de vapor à temperatura cobertura (mmHg).

4.2.3.2 Perdas de Energia através da cobertura:

As perdas de energia através da cobertura podem ser calculadas através das seguintes equações (DUFFIE e BECKMAN, 1980):

a) Perdas de calor por radiação :

Calculada com a equação 4.3.

b) Perdas de calor por Convecção :

$$h_{c-a} = 5.7 + 3.8V \quad (4.5)$$

h_{c-a} - Coeficiente de Convecção entre a cobertura e o ambiente (W/(m².°C)).

V - Velocidade do vento (m/s)

4.2.3.3 - Perdas de Energia através da base e laterais:

As perdas de energia através da base, podem ser avaliadas em função das características materiais dos seus componentes. Em vista de sua base estar em contato direto com o solo, as perdas pela base podem ser analisadas por condução, desconsiderando-se as perdas por radiação e Convecção.

Através das equações 4.6 e 4.7, utilizadas para paredes planas em série, pode-se calcular um coeficiente de condutividade global, tanto para a base quanto para as laterais da câmara.

$$R_t = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i} \quad (4.6)$$

$$U_b = \frac{1}{R_t} \quad (4.7)$$

R_t - Resistência Térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

L_i - Comprimento (m).

K_i - Condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$).

U_b - Coeficiente de condutividade global ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$).

Ainda com relação as laterais da câmara de cura, calculam-se as perdas por radiação (equação 4.3) e as perdas por Convecção (equação 4.5), para o meio ambiente.

A solução para o sistema Coletor solar-câmara de cura em um determinado período será possível, considerando-se a inércia térmica avaliada sobre o fluido circulante (água), levando-se em consideração a diferença de energia absorvida pela captação (coletores solares planos), perdida pela distribuição (dutos) e consumida pela Câmara de cura.

Em síntese, a energia será absorvida pelos elementos básicos principais, que formam a câmara de cura (formas, componentes pré-fabricados de concreto, Ar no interior da câmara, e Calor de hidratação do cimento), com funções de gerar ou absorver energia :

A energia armazenada na água (inércia térmica do sistema), será transferida através da tubulação até a base metálica da câmara de cura e posteriormente até aos pré-fabricados de concreto. Somada a essa energia, temos a energia produzida pela hidratação do cimento.

Uma outra forma de utilização da energia solar para acelerar o processo de cura, se constitui no uso das chamadas heliocâmaras.

4.3 HELIOCÂMARAS :

As heliocâmaras, são dispositivos utilizados para armazenar e ao mesmo tempo consumir a energia solar, em forma de energia térmica. No caso dos países localizados no hemisfério sul, como o caso do Brasil, as heliocâmaras são orientadas para norte e com as coberturas, numa inclinação em torno da latitude do local (tolerância de +- 10 graus), em relação a um plano horizontal (LUNDE, 1980). As heliocâmaras, baseiam-se no princípio do destilador solar convencional, estando na dependência direta de seus materiais componentes e de suas condições locais e ambientais. A Figura 4.2 nos apresenta um destilador solar convencional

4.3.1 Captação e perdas da energia solar, (princípio do destilador solar convencional)

O modelo aqui apresentado, segue ao do funcionamento básico de um destilador solar convencional (DSC), segundo o que fora apresentado por DUNKLE, MORSE E READ, citados por SARTORI e JAGUARIBE (1985) .

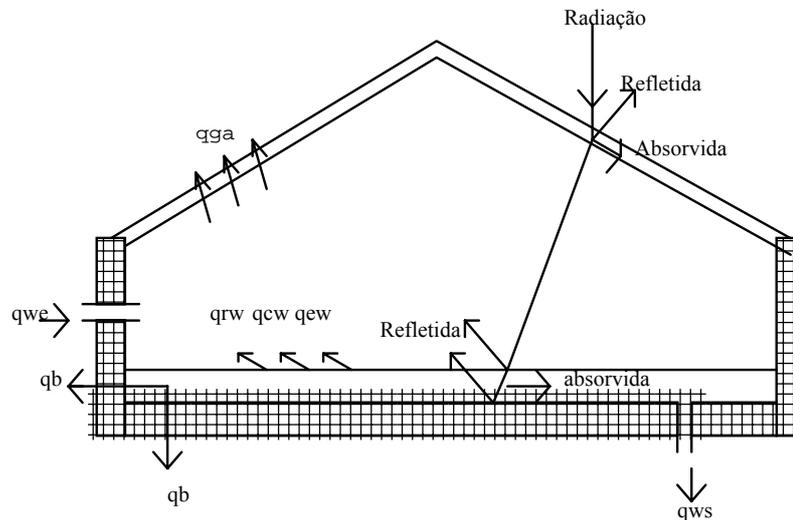


FIGURA 4.2 - Balanço de energia num destilador solar convencional (DSC).

Fazendo-se um balanço térmico no destilador, obteremos:

$$\alpha_g H_s + \alpha_w \tau H_s + q_{we} = q_{ga} + q_b + q_{ws} + C_{wg} (dt_w/dt) \quad (4.8)$$

α_g - Absortância do vidro.

H_s - Radiação solar incidente sobre o destilador (plano horizontal).

α_w - Absortância da água.

τ - Transmissividade do vidro.

C_{wg} - Inércia térmica do sistema.

dt_w/dt - gradiente de temperatura ao longo do tempo.

q_{we} - Fluxo de energia de entrada de água no destilador.

q_{ga} - Energia total absorvida pela cobertura

$$q_{ga} = q_{rw} + q_{cw} + q_{ew} + \alpha_g H_s l \quad (4.9)$$

Sendo :

a) O Processo interno de transferência de calor por radiação (q_{rw}), poderá ser calculado por:

$$q_{rw} = 0.9 \sigma (T_w + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \quad (4.10)$$

σ - Constante de Stefan-Boltzman.

T_w - Temperatura da água.

T_g - Temperatura do vidro.

b) O Processo interno de transferência de calor por Convecção (q_{cw}), poderá ser calculado por:

$$Q_{cw} = 3,182 \left\{ (T_w - T_g) + \left(\frac{P_w - P_g}{2009 - P_w} \right) (T_w + 273) \right\}^{1/3} (T_w - T_g) \quad (4.11)$$

P_w - Pressão parcial do vapor de água na temperatura (T_w),

Obtido pela equação 4.12 abaixo (52):

$$\text{Log}(P_w) = 9.1466 - (2316/T_w) \quad (4.12)$$

P_g - Pressão parcial do vapor de água na temperatura (T_g),

Obtido pela equação 4.13 abaixo:

$$\text{Log}(P_g) = 9.1466 - (2316/T_g) \quad (4.13)$$

c) O Processo interno de transferência de calor por evaporação (q_{ew}), poderá ser calculado por:

$$Q_{ew} = 2.918 \times 10^{-3} \left\{ (T_w - T_g) + \left(\frac{P_w - P_g}{2009 - P_w} \right) (T_w + 273) \right\}^{1/3} (P_w - P_g) \cdot h_{wg} \quad (4.14)$$

sendo:

$$h_{wg} = 3160.7 - 2.411(T_w + 273) \quad (\text{KJ/Kg}) \quad (4.15)$$

A dissipação de calor do vidro para a atmosfera pode ser determinada por (q_{ga}):

$$q_{ga}' = 0.9 \sigma \left\{ (T_g + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right\} + h_{ga} (T_g - T_a) \quad (4.16)$$

$$h_{ga} = 3.182 \left\{ (T_g - T_a) + \left(\frac{P_g - P_a}{2009 - P_g} \right) (T_g + 273) \right\}^{1/3} \quad (4.17)$$

As perdas de calor pela base e pelas laterais (q_b), poderão ser obtidas da mesma forma que nas câmaras de cura, utilizados para coletores solares, conforme item 4.2.3.3.

Segundo DUFFIE e BECKMAN (1980), poderemos evidenciar as perdas no destilador solar, através da malha térmica Figura 4.3.

4.3.1.1 Malha térmica convencional:

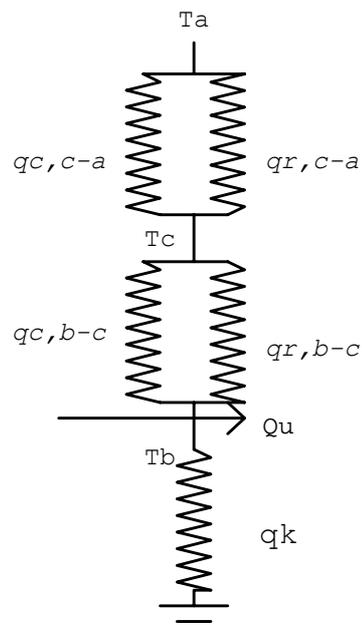


FIGURA 4.3 - Malha térmica para um destilador solar convencional (uma cobertura); sendo t_a a temperatura ambiente; t_b a temperatura da base; q_c o fluxo de calor por condução; q_r o fluxo de calor por radiação; Q_u a energia útil, absorvida pelo destilador solar.

4.3.2 Adaptação do princípio do destilador solar convencional para as heliocâmaras

Visando a cura do concreto, haverá necessidade de simular um modelo (Capítulo 5), onde se possam minimizar as perdas térmicas para o meio ambiente. A água, (destilador), dará lugar ao concreto (heliocâmara); assim, não haverá circulação de água entre o interior e o exterior da heliocâmara, portanto não se leva em consideração as energias de entrada e saída de água (q_{we} , q_{ws}), apresentadas na equação 4.8. Ficam valendo as demais equações citadas em 4.3.1, visando o balanço térmico, bem como a inclusão de novos elementos na heliocâmara como pré-fabricados de concreto, formas de aço, lâmina d'água e reações de hidratação do cimento, que serão vistos no próximo capítulo.

4.3.3 Cálculo gráfico da maturidade a partir da resistência da peça

O gráfico da Figura 4.4 e também a tabela 4.1, ajudam a calcular a maturidade e a resistência nas peças pré-fabricadas de concreto, auxiliando de forma decisiva no ciclo de cura (KIRKBRIDE, 1971); conforme veremos no capítulo 5 (Simulação).

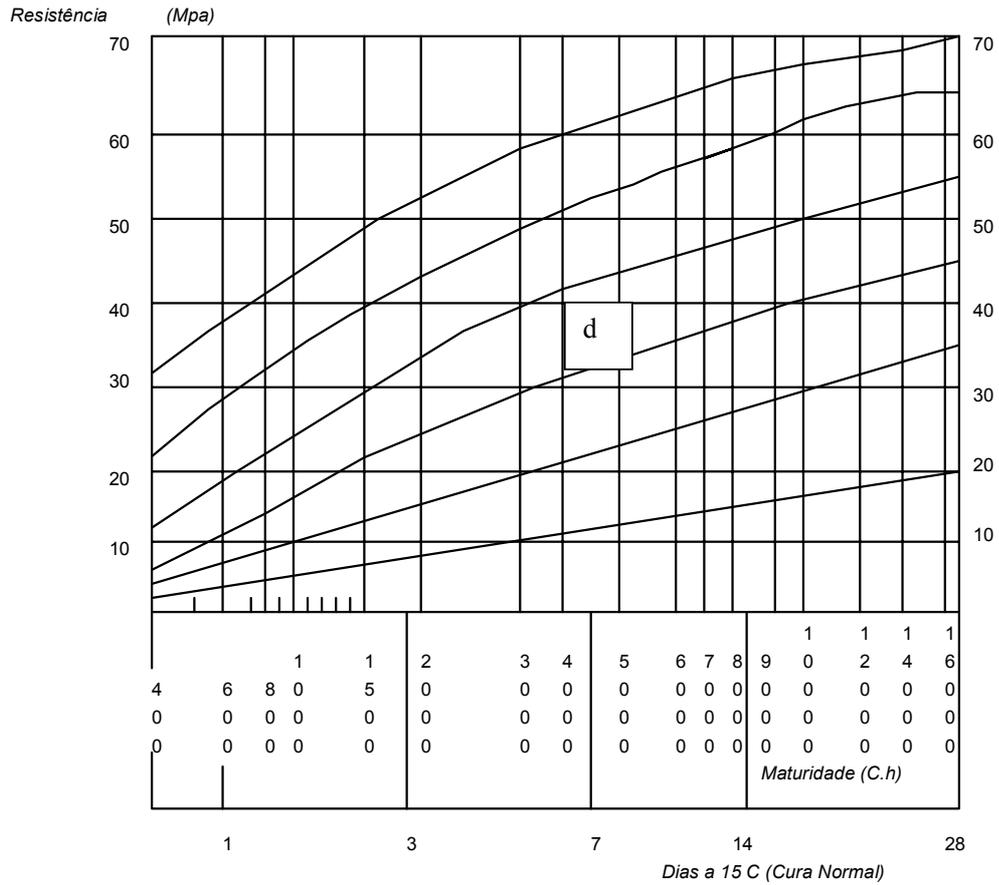


FIGURA 4.4 - Projeto gráfico Resistência x Maturidade

Tabela 4.1 - Margens para a resistência mínima :

Resistência Mínima (Projetada)	Margem a somar (Aos 28 dias)	Margem a somar (Final da cura/24h)
Maior de 15 MN/m ²	10 MN/m ²	3.5 MN/m ²
Maior de 22.5 MN/m ²	15 MN/m ²	5.0 MN/m ²

5. SIMULAÇÃO DO PROBLEMA - EXEMPLO APLICATIVO

5.1 Enunciado do problema

Em pré-fabricação, determinadas peças de concreto são projetadas para uma resistência mínima aos 28 dias de 30Mpa ; Quando da desmoldagem, necessita-se uma resistência maior ou igual a 10 Mpa. (ABCI, 1987). Nesse enfoque, o exemplo simulado constará em determinar a área de coletores solares planos e também sua relação com o volume de concreto (m^3), num dia típico de verão e num dia típico de inverno (SATTLER, 1989). utilizaremos um ciclo de cura de no máximo 20 horas entre a moldagem e a desforma das peças no interior da câmara.

Será analisado, da mesma forma, o uso de heliocâmaras.

O fluxograma Figura 5.1, representa a simulação do problema de uma maneira abrangente.

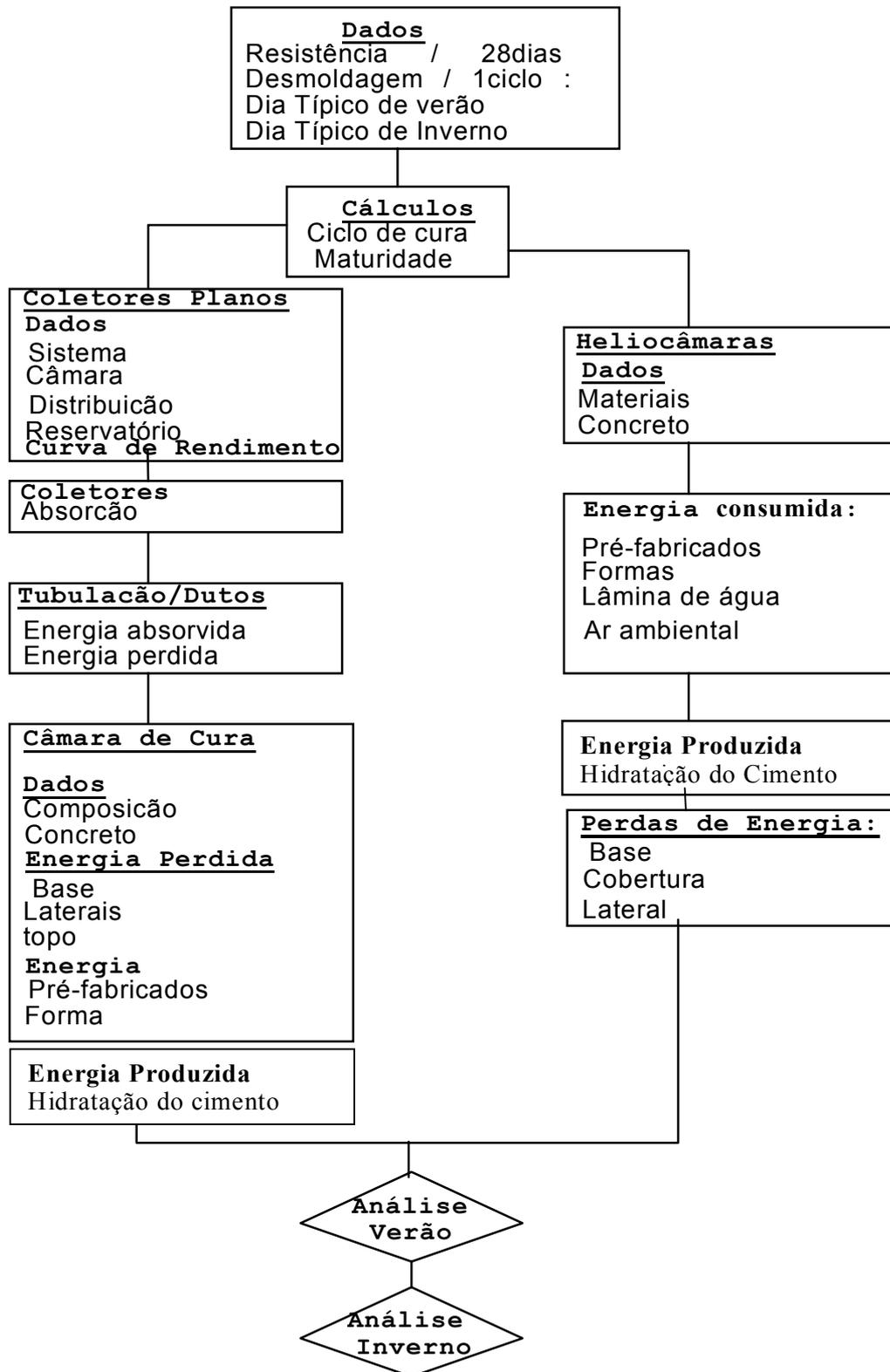


FIGURA 5.1 - Fluxograma da situação simulada

5.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

5.2.1 Dados para os dias típicos de verão (SATTLER, 1989):

A tabela 5.1, bem como a Figura 5.2, mostram um perfil sobre o dia típico de verão para a cidade de Porto Alegre.

Tabela 5.1 :Tabela do Dia típico de verão .

Horas (h)	Temperatura Ambiente (C)	Radiação (W/m ²)	Velocidad e do Vento (m/s)
1	24,1	0	1,7
2	23,8	0	1,3
3	23,5	0	1,1
4	23,2	0	1,0
5	23,0	0	0,8
6	22,9	24	1,0
7	24,1	146	0,9
8	26,1	321	1,7
9	28,0	495	2,8
10	29,2	633	3,1
11	30,4	779	3,1
12	31,5	834	3,1
13	32,4	858	2,9
14	33,2	782	3,0
15	33,5	664	3,1
16	33,5	505	2,6
17	33,3	318	1,9
18	32,0	141	2,8
19	29,6	021	3,0
20	27,7	0	3,1
21	27,0	0	3,6
22	26,3	0	3,1
23	26,0	0	2,6
24	24,8	0	1,9

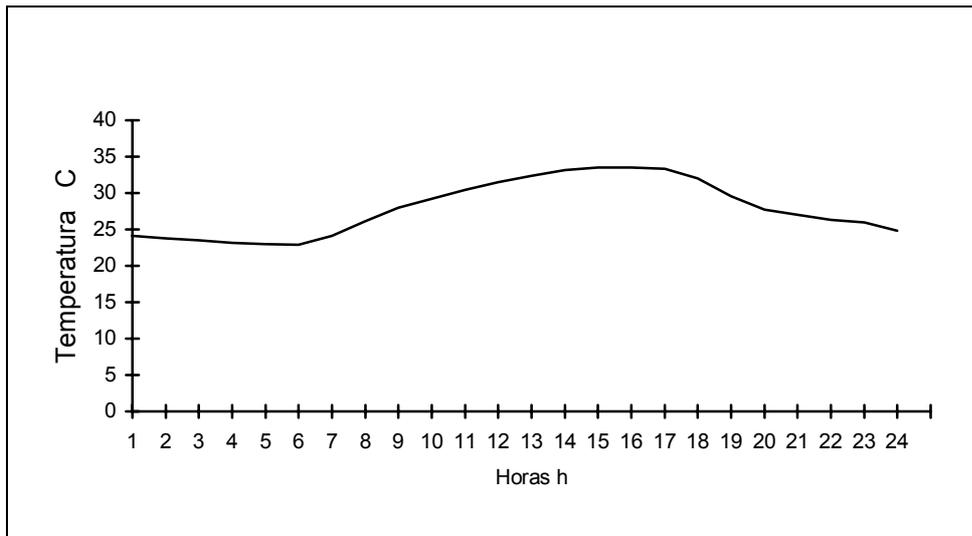


FIGURA 5.2 - Gráfico referente as temperaturas do dia típico de verão.

5.2.2 Dados para os dias típicos de inverno (SATTLER, 1989)

A tabela 5.2, bem como a Figura 5.3, mostram um perfil sobre o dia típico de inverno para a cidade de Porto Alegre.

Tabela 5.2 Tabela de um Dia típico de inverno .

Horas (h)	Temperatura Ambiente (C)	Radiação (W)	Vento (m/s)
1	9	0	5
2	8,7	0	4,5
3	8,4	0	4,5
4	8	0	0,5
5	7,6	0	0
6	7,3	0	0
7	7,3	5	0
8	7,8	90	0
9	8,7	216	8
10	10	335	10
11	11,1	427	11
12	12,2	462	10
13	12,8	455	12
14	13	394	12
15	13,2	302	13
16	13	178	13,5
17	12,6	69	8
18	11,5	5	3,5
19	10,6	0	3,5
20	10,2	0	5,5
21	9,8	0	4
22	9,6	0	5,5
23	9,3	0	4
24	9,2	0	2,5

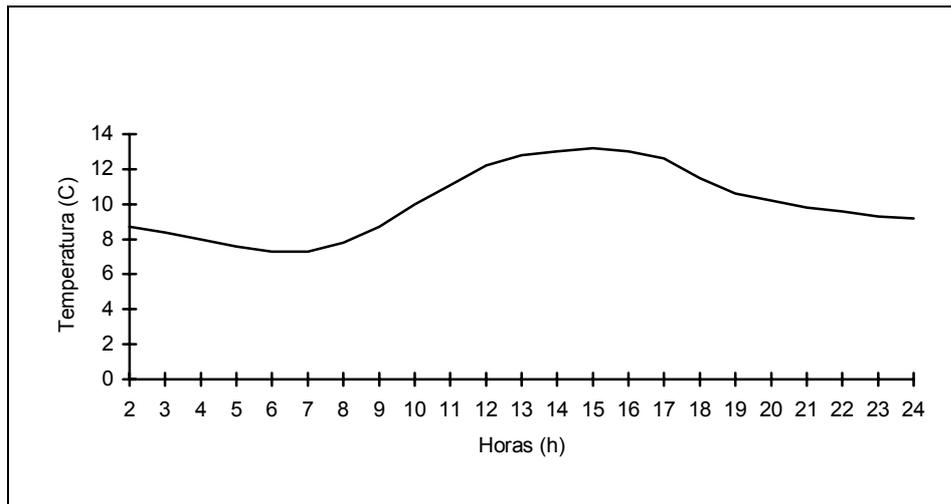


FIGURA 5.3 - Gráfico de um dia típico de inverno.

5.3 CÁLCULO DO CICLO TEÓRICO DE CURA E DA MATURIDADE

5.3.1 Cálculo da maturidade

Segundo a tabela 4.1, teremos:

$$\text{Resistência projetada} = 30 \text{ Mpa} + 15 \text{ Mpa} = 45 \text{ Mpa}$$

$$\text{Resistência Desforma} = 10 \text{ Mpa} + 5 \text{ Mpa} = 15 \text{ Mpa}$$

No gráfico da Figura 4.4, adotamos a linha "D", ou seja, resistência = 45Mpa aos 28 dias de cura normal (15°C).

Na intercessão entre a curva "D" e a resistência de desforma (15Mpa), atingiremos a maturidade de 800 °C.h.

5.3.2 Cálculo do ciclo de cura

Pela equação (2.1), $M_s = \Sigma(T-T_0)dT$, definimos o ciclo de cura para a maturidade (800 °C.hs), conforme especificado na Figura 5.4:

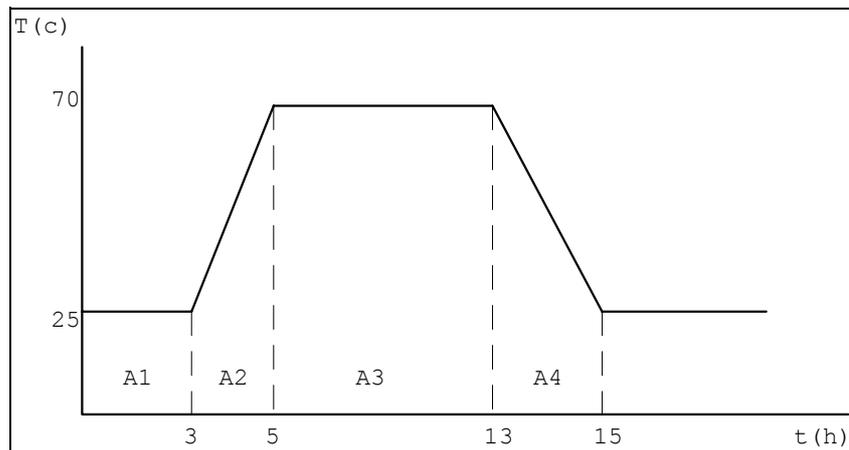


FIGURA 5.4 - Ciclo térmico teórico inicial de cura.

$$A1 = 3 \times 35 = 105 \text{ } ^\circ\text{C.h} \quad A2 = ((80+35)/2) \times 2 = 115 \text{ } ^\circ\text{C.h}$$

$$A4 = ((80+35)/2) \times 2 = 115 \text{ } ^\circ\text{C.h}$$

Uma vez determinada a energia total a ser utilizada sob a curva (tempo x temperatura), poderemos determinar a energia sob a área A3, a fim de atingirmos essa energia. Nesse caso teremos:

$$A3 = \text{Energia Total} - (A1 + A2 + A4)$$

$$A3 \text{ então será } 800 \text{ } ^\circ\text{C.h} - (105+115+115) = 465 \text{ } ^\circ\text{C.h}$$

Assim, variando no binômio tempo x temperatura constante máxima, poderemos obter essa energia.

5.4 SOLUÇÃO UTILIZANDO-SE COLETORES SOLARES PLANOS

5.4.1 Sistema adotado

Será adotado um sistema ativo (bomba), conforme Figura 5.5 :

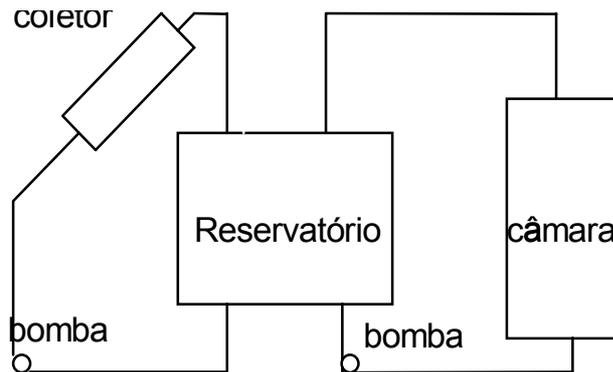


FIGURA 5.5 - Sistema adotado para o cálculo com coletores solares planos

5.4.2 Dados da câmara de cura (MCCALL, 1982):

a) formas de aço:

- comprimento : 100m
- espessura : 12mm
- altura : 0.70m
- largura total : 2.70m
- Densidade : 7800Kg/m³

b) Fundação de concreto:

- comprimento : 100m
- largura : 2.70m
- espessura : 0.10m

- Densidade : 2300Kg/m³

c) Produtos Pré-fabricados:

- Volume de concreto : 40m³

- Calor específico : 0.24 W.h/Kg.C

- Densidade : 2300 Kg/m³

- Condutividade : 1.37 W/m°C

d) Cimento:

- Consumo de cimento : 320Kg/m³

5.4.3 Dados do sistema de distribuição (Tubulação):

a) Dutos de cobre :

- Condutividade : 385W/m°C

- Raio interno da tubulação : 3.14 Cm

- Raio externo da tubulação : 3.65 Cm

b) Isolante (Lã de Vidro):

- Condutividade : .050 W/m°C

- Raio externo ao isolante : 8.65 Cm

5.4.4 Reservatório:

Adota-se nesse processo de simulação, um reservatório ideal, ou seja, um reservatório sem perdas de energia, atuando com vistas a facilitar o fluxo de água no sistema, haja vista a utilização de uma circulação forçada. Adota-se ainda o reservatório como não estratificado, ou seja, a mesma temperatura em seu interior, desde a base até o topo.

5.4.5 Bombas:

As bombas funcionarão independentes, ou seja, uma bomba controlando o fluxo entre coletores e reservatório, enquanto outra controlando o fluxo entre reservatório e câmara de cura.

5.4.6 Dados do coletor solar plano - Rendimento (DUFFIE e BECKMAN, 1980) :

Será utilizado um coletor solar plano com uma curva de rendimento pré-estabelecida., conforme ilustra a Figura 5.6.

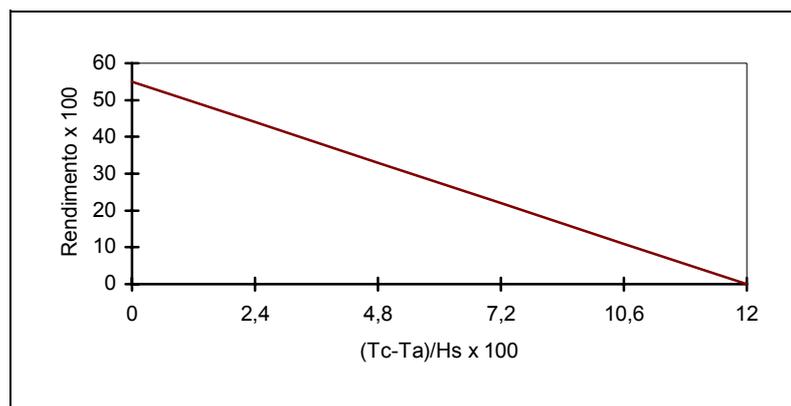
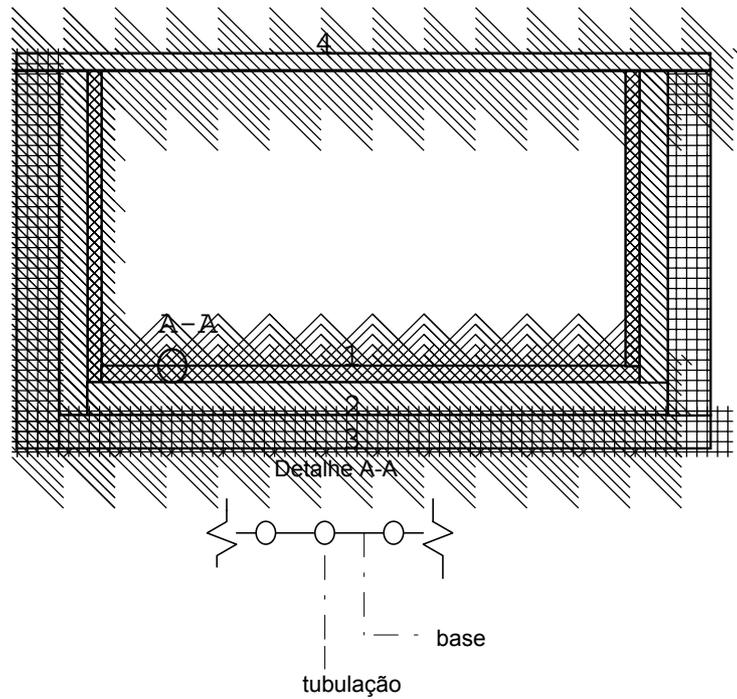


FIGURA 5.6 - Curva de rendimento de um coletor solar plano.

5.4.7 Modelo adotado para a câmara de cura

A Figura 5.7 mostra-nos o perfil transversal da câmara de cura adotada para esse sistema.



1. Lâmina de aço (3mm)
2. Lã de vidro (100mm)
3. Concreto (100mm)
4. Cobertura tipo sandwiche (lona plástica + lã de vidro + lona plástica).

FIGURA 5.7 - Seção transversal, detalhando a câmara de cura e sua composição material.

5.5 Atividades desenvolvidas

Para definir-se uma tabela de energia e temperaturas, utilizou-se de algumas facilidades, como a montagem de um fluxograma, (Figura 5.8 e Figura 5.18), desenvolvimento de planilhas eletrônica de cálculos (anexo B e anexo D) e ainda desenvolvimento de programas de computador (anexo A e anexo F).

5.5.1 Fluxograma e sua análise

O fluxograma proporciona uma melhor visão quanto a apresentação e resolução do problema em questão, onde estão apresentadas as etapas as quais irão requerer o desenvolvimento de algumas atividades e eventos para a resolução do problema. A Figura 5.8 mostra uma definição mais clara do problema em relação aos coletores solares planos.

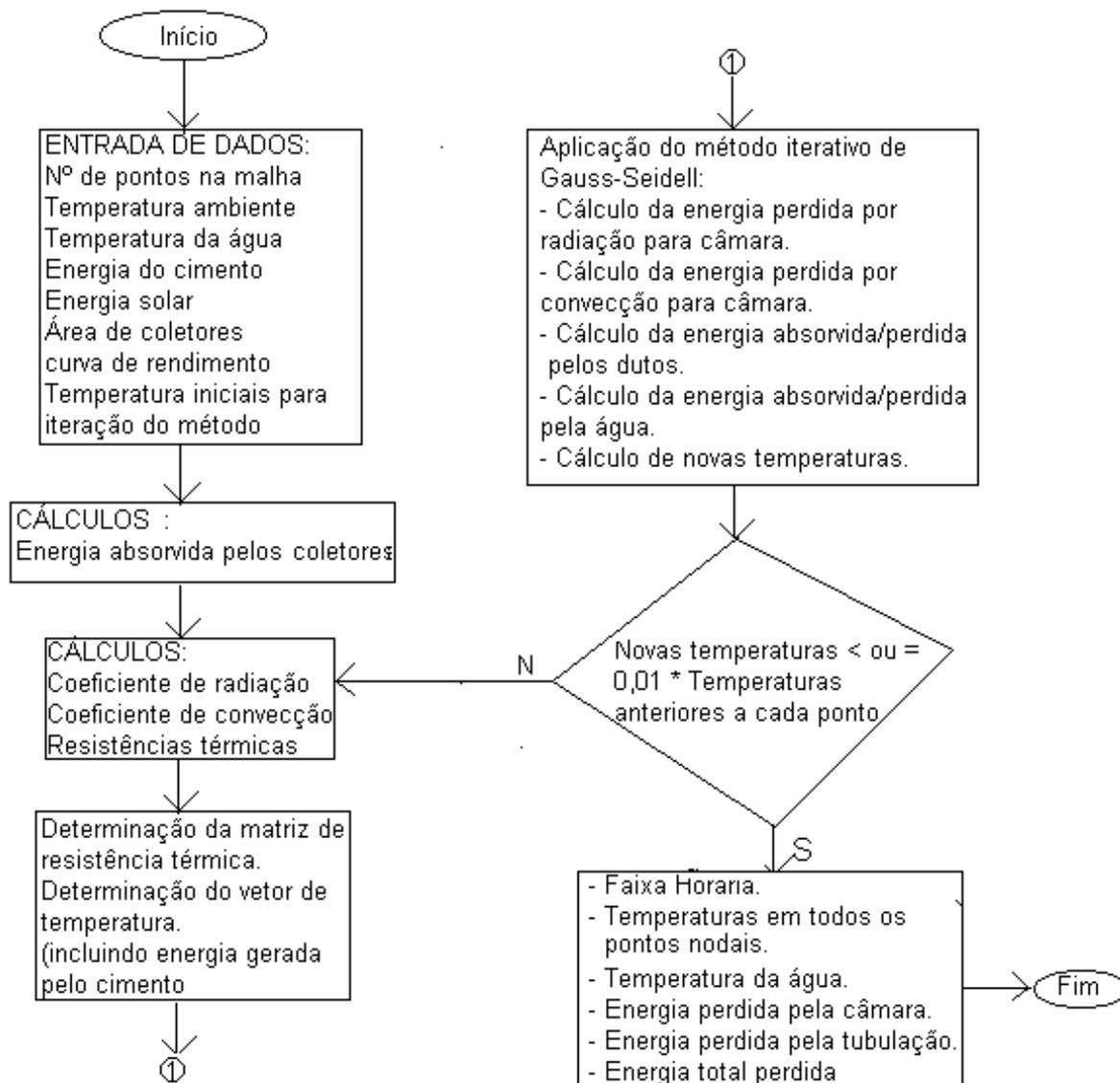


FIGURA 5.8 - Fluxograma da solução para câmara de cura, utilizando-se coletores solares planos, tanto para dia típico de verão quanto de inverno.

Observando e analisando o fluxograma ressalta-se algumas ponderações que poderão se submeter a uma avaliação em separado:

5.5.1.1 dados de entrada

- a) Número de pontos na malha - conforme Figura 5.9, no caso foram adotados 15 pontos nodais.
- b) Temperatura ambiente - dado pela planilha dos dias típicos de verão (tabela 5.1) e inverno (tabela 5.2)
- c) Temperatura da água - é a temperatura resultante da incidência da radiação solar, a cada hora; será entrada para o próximo ciclo.
- d) Energia do cimento - dado pelo gráfico da Figura 2.1 (liberação de energia das reações de hidratação do cimento a cada hora).
- e) Energia solar - energia obtida dos dias típicos (verão e inverno); tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.
- f) Área de coletores - No problema em questão, adotamos uma área de 180 m².
- g) Curva de rendimento - dado pela Figura 5.6.

5.5.1.2 Área total da câmara de cura

$$\text{área da base} = \text{área do topo} = 100 \times 2.70 = 270.0\text{m}^2$$

$$\text{área lateral} = 2 \times (2.70 + 100) \times 0.70 = 143,8\text{m}^2$$

$$\text{área total} = 2 \times (270\text{m}^2) + 143,8\text{m}^2 = 683.8\text{m}^2$$

5.5.1.3 Seção transversal de cálculo

Dada a seção transversal da câmara de cura, discretiza-se essa seção, de modo a aplicar-se o método das resistências térmicas nesses pontos nodais; no caso específico, divide-se essa seção transversal em 15 pontos, conforme Figura 5.9.

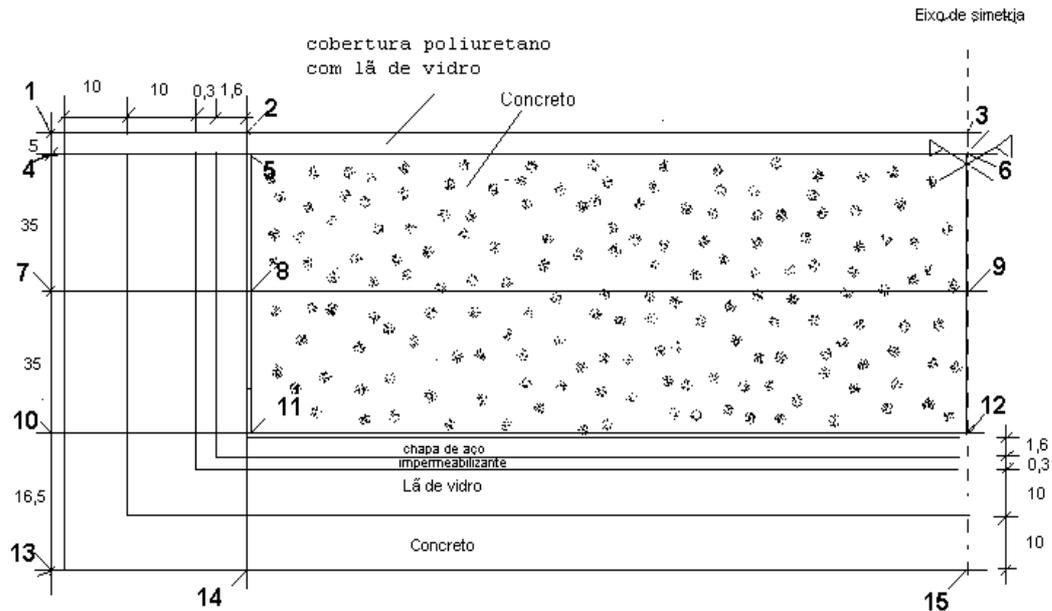


FIGURA 5.9 - seção transversal discretizada (malha com 15 pontos) para o cálculo e a determinação dos valores de energia e temperaturas na câmara de cura.

5.5.1.4 Coeficientes de perdas na câmara de cura

A Figura 5.10 mostra a atuação dos coeficientes de perdas de energia na câmara de cura.

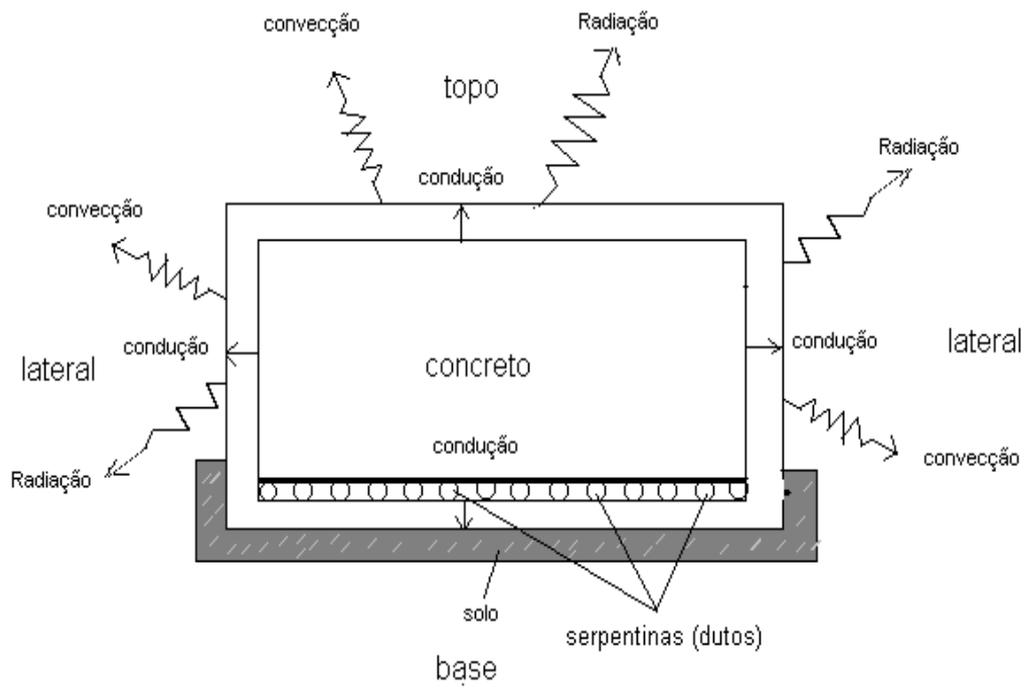


FIGURA 5.10 - Atuação dos coeficientes de perdas por radiação, condução (global) e Convecção.

5.5.1.4.1 Coeficiente de perdas pela base

Pode-se calcular as perdas através da base da câmara, utilizando-se do processo de condução; Desconsiderando-se as perdas por radiação e por Convecção, em vista da base estar em contato com o solo (DUFFIE e BECKMAN, 1980). Desse modo, considerando-se as características materiais da seção transversal (Figura 5.7), tem-se:

- Lâmina de aço (K=47.5 W/m. °C l=0.16cm)

- Concreto (K=1.73 W/m. °C l=10cm)

- Lã de vidro (K=0.050 W/m. °C l=10cm)

Então:

Resistência térmica: $R_t = 2.05 \text{ °C.m /W}$

Coeficiente global : $U_b/A = 1/2,05 = 0,48 \text{ W/m}^2\text{.C}$

5.5.1.4.2 Coeficiente de perdas de energia através da cobertura

A resistência térmica da cobertura, resulta do somatório entre as resistências dos materiais que formam a mesma. No caso da utilização de duas lonas plásticas de poliuretano (0.32m.°C/W), com lã de vidro (5cm) entre elas, têm-se:

$$R_t = 0.32 + 1 + 0.32 = 1.64 \text{ m. °C/W}$$

$$U_t/A = 1/R_t = (1/1.64) = 0.61 \text{ W/m}^2\text{.C}$$

Através das equações 4.3 e 4.5, obtêm-se os coeficientes de radiação e de Convecção, respectivamente, sendo que adotou-se a velocidade do vento na Convecção como zero por tratar-se de um ambiente de cura protegido (galpão).

5.5.1.4.3 Coeficientes de perdas de energia pelas laterais da câmara (U_e):

Levando-se em consideração que as laterais da câmara de cura, possui a mesma composição material que a seção transversal da base da mesma, têm-se:

- Perdas devido a condução: $U_e = U_b$ (item 5.5.1.4.1) = $0.48 \text{ W/m}^2\text{.C}$

- Perdas devido a Convecção (da mesma forma que a cobertura): Adota-se a velocidade do vento como $V=0$ m/s (câmara de cura no interior de um galpão), aplica-se a equação (4.5), obtendo-se $h_c = 5,7$ W/m²°C.

- Perdas devido a radiação: ($h_{r,lat-a}$)

As perdas por radiação, serão obtidas utilizando-se a equação (4.3), da mesma forma que na cobertura.

A energia perdida da câmara para o meio ambiente, consiste no somatório das energias perdidas pela base (U_b), pelas laterais (U_e) e pela cobertura da câmara de cura (U_t).serão obtidas a cada hora do dia típico.

5.5.1.5 Energia produzida pela hidratação do cimento:

A energia a ser produzida pelas reações de hidratação do cimento encontra-se baseada no gráfico da Figura 2.1, onde a cada hora tem-se um valor diferente de energia a ser liberado.

5.6 CÁLCULOS PARA O DIA TÍPICO DE VERÃO

Os cálculos referentes ao dia típico de verão, resultaram de uma ação conjunta das ferramentas já citadas: planilha de cálculo e programa de computador; Dessa forma obtêm-se alguns gráficos, conseguintes da aplicação dessas ferramentas no sistema de cura via utilização da energia solar. Assim definem-se alguns itens:

5.6.1 Absorção da energia solar

A absorção da energia solar, fora quantificada utilizando-se a curva de rendimento do coletor solar plano (Figura 5.6).

Aplicam-se as condições de contorno para essa curva, e obtêm-se a seguinte expressão:

$$\eta = 0.55 - [4,5 (T_e - T_a) / H_s], \quad (5.1)$$

η - Rendimento do coletor.

T_e - Temperatura na entrada do coletor

T_a - Temperatura ambiente

H_s - Radiação Solar no coletor.

O rendimento será dado a cada hora do dia típico, levando-se em consideração, (conforme equação 4.18) a temperatura de entrada, a temperatura ambiente e a radiação solar obtidas nessa hora.

A radiação solar total absorvida (ϵ_a) pelo sistema coletor a cada hora, poderá então ser obtida através da equação:

$$\epsilon_a = \eta \cdot A \cdot H_s \quad (5.2)$$

η - Rendimento.

A - Área total de coletores solares planos (m^2).

H_s - Radiação solar total (W/m^2).

A Figura 5.11, mostra a curva de energia absorvida pelo sistema de coletores para um dia típico de verão.

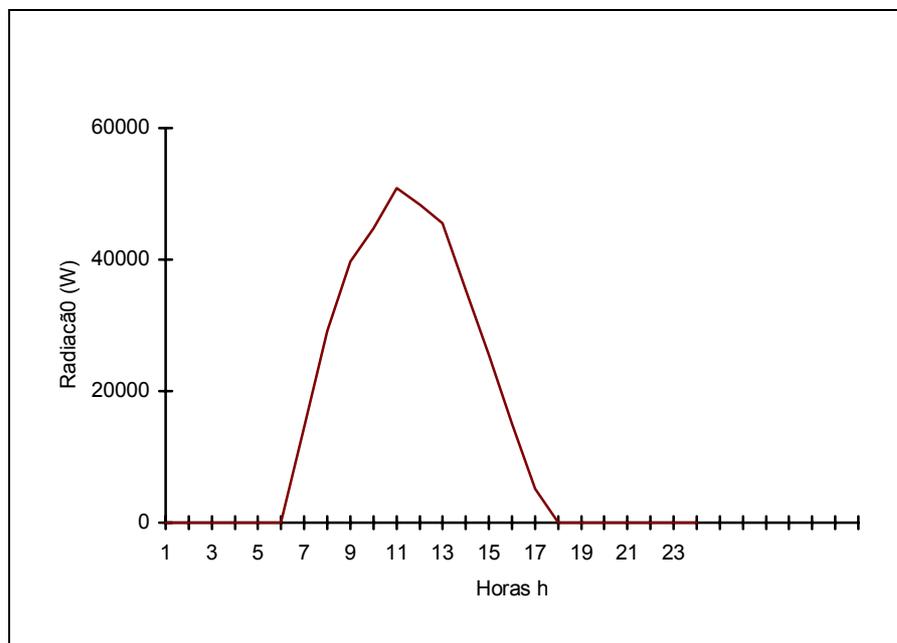


FIGURA 5.11 - Energia absorvida pelo sistema coletor com área total de $180 m^2$ (Valores na planilha, Anexo B - coluna G).

5.6.2 Cálculo da energia perdida durante a distribuição

Dutos de cobre com isolamento de lã de vidro, fazem a distribuição da energia no sistema coletor-reservatório-câmara de cura; Estimou-se um comprimento em torno de 200m para a tubulação cumprir esse trajeto. Na distribuição foram avaliadas duas formas de perdas de energia:

5.6.2.1 Quantidade de energia absorvida pela tubulação:

A quantidade de energia absorvida pela tubulação de cobre (Q_o), foi obtida utilizando-se a equação (4.1).

5.6.2.2 Quantidade de energia perdida através da tubulação com isolamento de lã de vidro de 5cm de espessura.:

A quantidade de energia perdida através da tubulação de cobre (Q_p), foi obtida utilizando-se a equação (4.2).

A Fig. 5.12, mostra os valores da energia total dissipada durante a distribuição, onde seus valores foram obtidos a cada hora do dia típico analisado. (Anexo B)

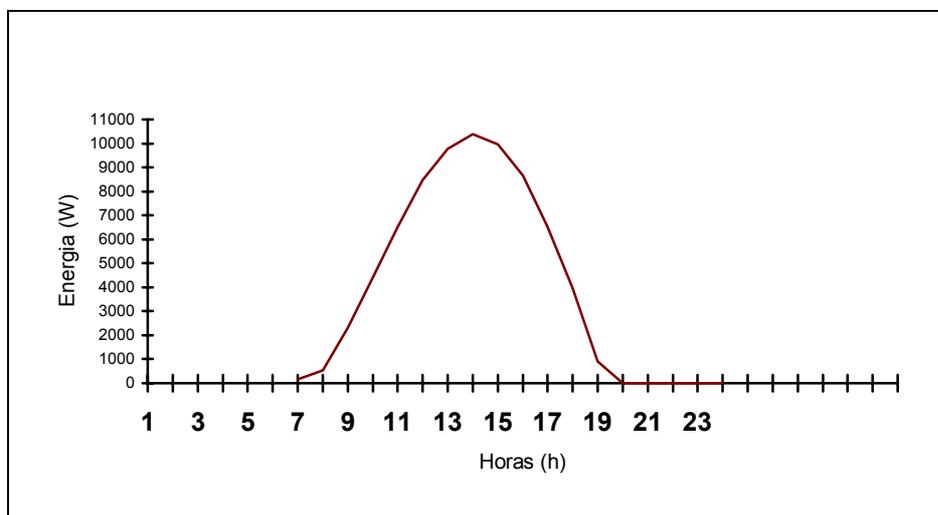


FIGURA 5.12 - Energia total (Perdida + absorvida), na tubulação para 200m de tubulação de cobre (Anexo B).

5.6.3 Energia total perdida pela câmara de cura para o meio ambiente.

A Figura 5.13, mostra a perda total de energia, da câmara de cura para o meio ambiente.

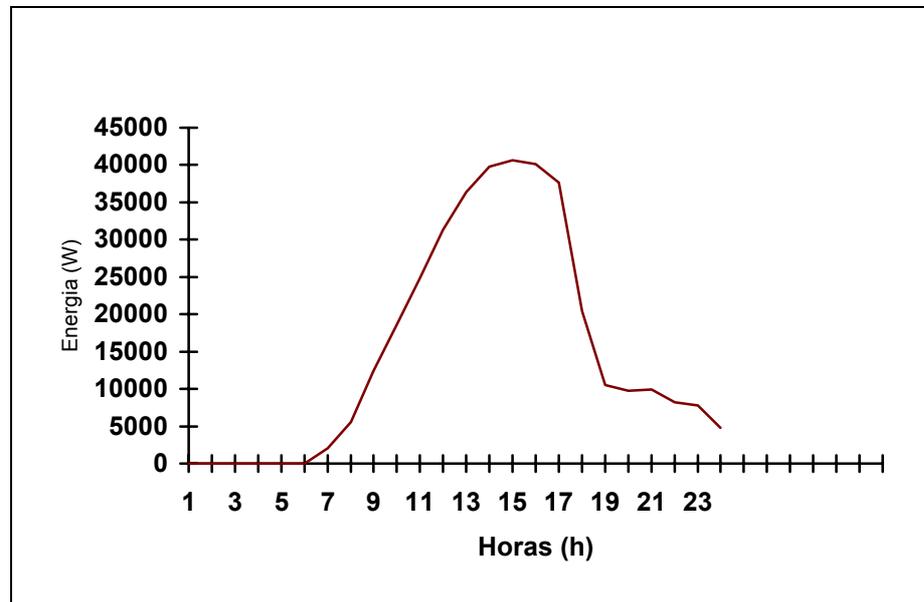


FIGURA 5.13 - Energia total perdida pela câmara de cura. (Área total da câmara = 683.8m^2
(Anexo B).

5.7 ENCAMINHAMENTO PARA A MONTAGEM DA TABELA DE ENERGIA NO INVERNO A CADA HORA DO DIA (ANEXO D)

Segue-se o mesmo encaminhamento, conforme desenvolvido para o verão (item 5.6).

5.7.1 Absorção da energia solar:

Da mesma forma, conforme especificado no item 5.6.1, obteremos a Figura 5.14, no qual teremos a energia absorvida por um sistema de coletores solares com área de 180 m^2 .

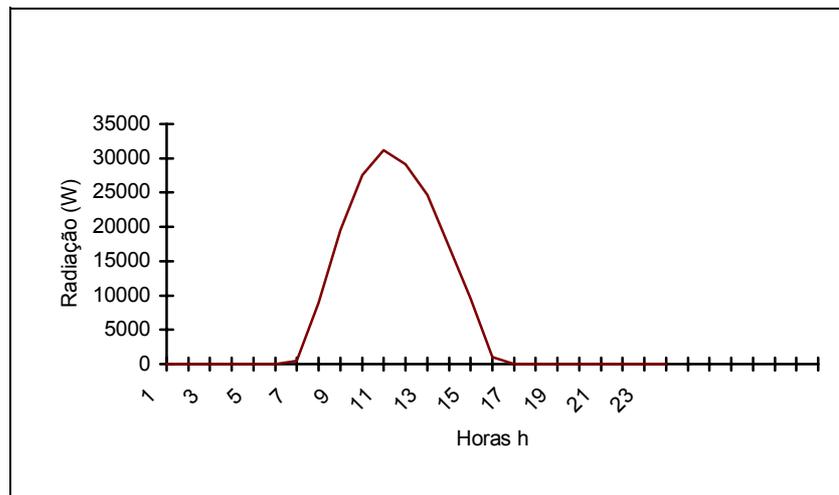


FIGURA 5.14 - Energia absorvida pelo sistema coletor com área total de 180 m^2 ; (Anexo D).

5.7.2 Cálculo da energia a ser perdida durante a distribuição :

Da mesma forma, conforme especificado no item 5.6.2, a energia total perdida pela tubulação, resultará do somatório entre a energia absorvida e a perdida através da mesma. A Figura 5.15, mostra a curva de energia total distribuída em função do tempo.

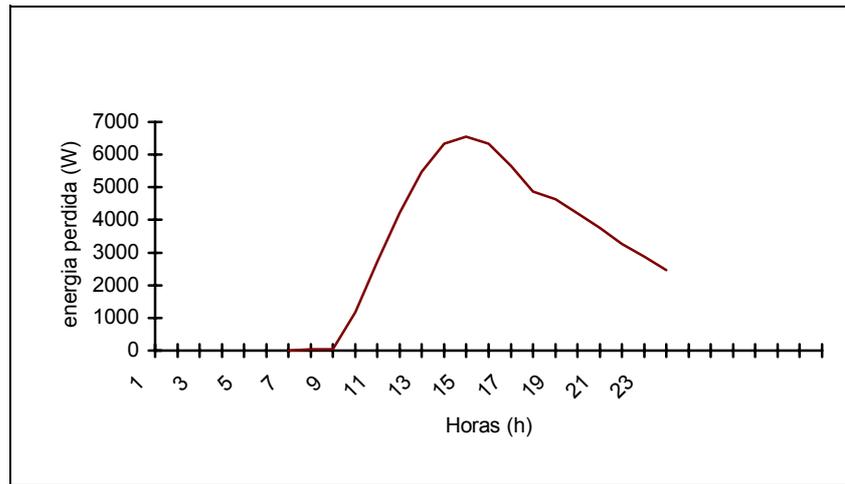


FIGURA 5.15 - Energia total (Perdida + absorvida), na tubulação. (Anexo D).

5.7.3 Cálculo da energia a ser perdida da câmara para o meio ambiente:

Os cálculos serão feitos sobre o perfil transversal da mesma forma que item 5.6.3. Dessa forma, veremos seu reflexo na Figura 5.16.

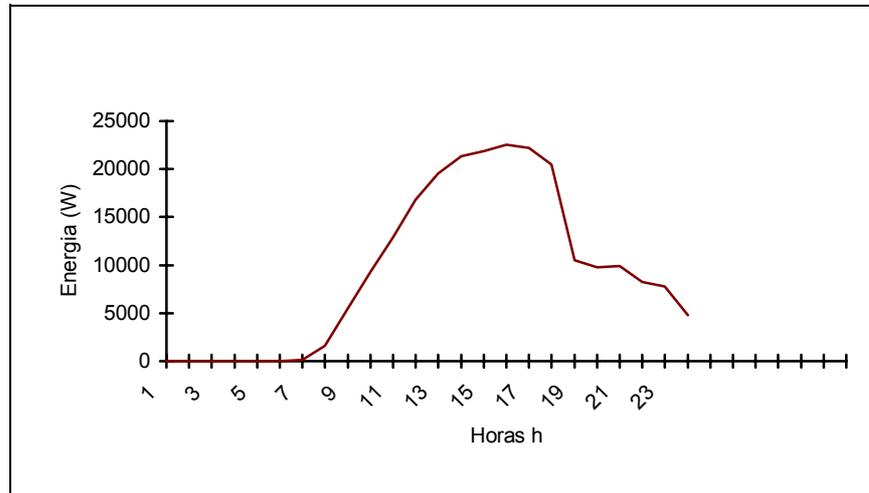


FIGURA 5.16 - Energia total perdida pela câmara de cura. (Área total da câmara = 683.8m^2 .
(Anexo D).

5.8 SOLUÇÃO UTILIZANDO-SE HELIOCÂMARAS:

5.8.1 Modelo adotado

Objetivando solucionar o problema específico da cura de concreto, utiliza-se a Figura 5.17, onde a equação do balanço térmico será dada pela equação 4.8, de forma simplificada, pois não mais haverá circulação de água (caso do destilador solar convencional) mas somente uma lâmina de água em repouso para garantir a saturação por umidade no ambiente de cura.

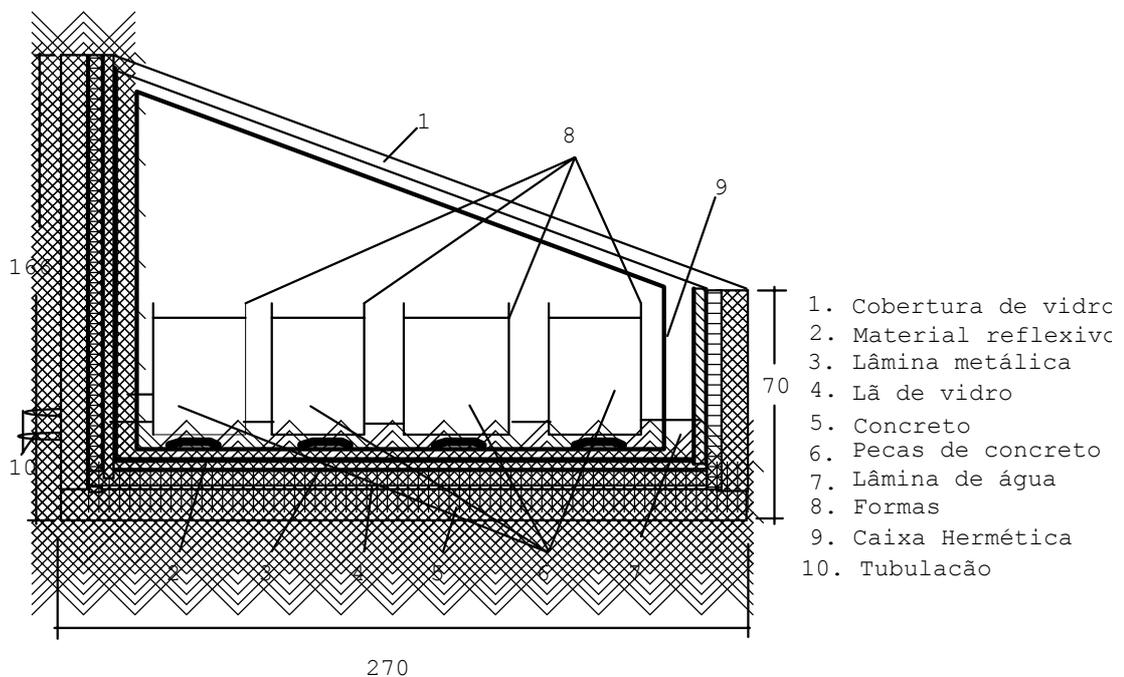


FIGURA 5.17 - Modelo de heliocâmara adotado para essa simulação. Inclinação da tampa de 25 graus com a horizontal frente para o norte. (cotas em centímetros).

5.8.2 Dados da Heliocâmara

a) Cobertura de vidro (inclinação de 25 graus):

- Coeficiente de condutividade térmica: $1,05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Calor específico: $0,23 \text{ W/Kg}^\circ\text{C}$
- Coeficiente de absorção: 0,085
- Emissividade: 0,88
- Refletividade: 0,147
- Espessura: 3mm
- Densidade: 2500 Kg/m^3

b) Lã de vidro:

- Calor específico: $0,19 \text{ W.h/Kg}^\circ\text{C}$
- Densidade: 24 Kg/m^3
- Espessura: 5cm

c) Lâmina metálica:

- Densidade: 7850 Kg/m^3
- Calor específico: $0,13 \text{ W.h/Kg}^\circ\text{C}$
- Absortividade: 0,7
- Coeficiente de condutividade: $47,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Espessura: 3mm

d) Água (Lâmina):

- Espessura: 50mm

e) Pré-Fabricados de concreto:

- Volume: 40 m^3
- Peso específico: $0,23 \text{ W.h/Kg. }^\circ\text{C}$
- Absortividade: 0,66
- Densidade: 2300 Kg/m^3

f) Concreto (Fundação):

- Comprimento: 100m
- Largura Total: 2.70m

- Espessura 0.10m
- Densidade 2300 Kg/m³
- Calor específico: 0.23 W.h/Kg.°C

g) Formas metálicas:

- Espessura: 14mm

5.8.3 Fluxograma

Após a determinação das características físicas da heliocâmara, monta-se na Figura 5.18 um fluxograma, visando facilitar a compreensão do problema, bem como melhor compreender as etapas para a resolução do mesmo.

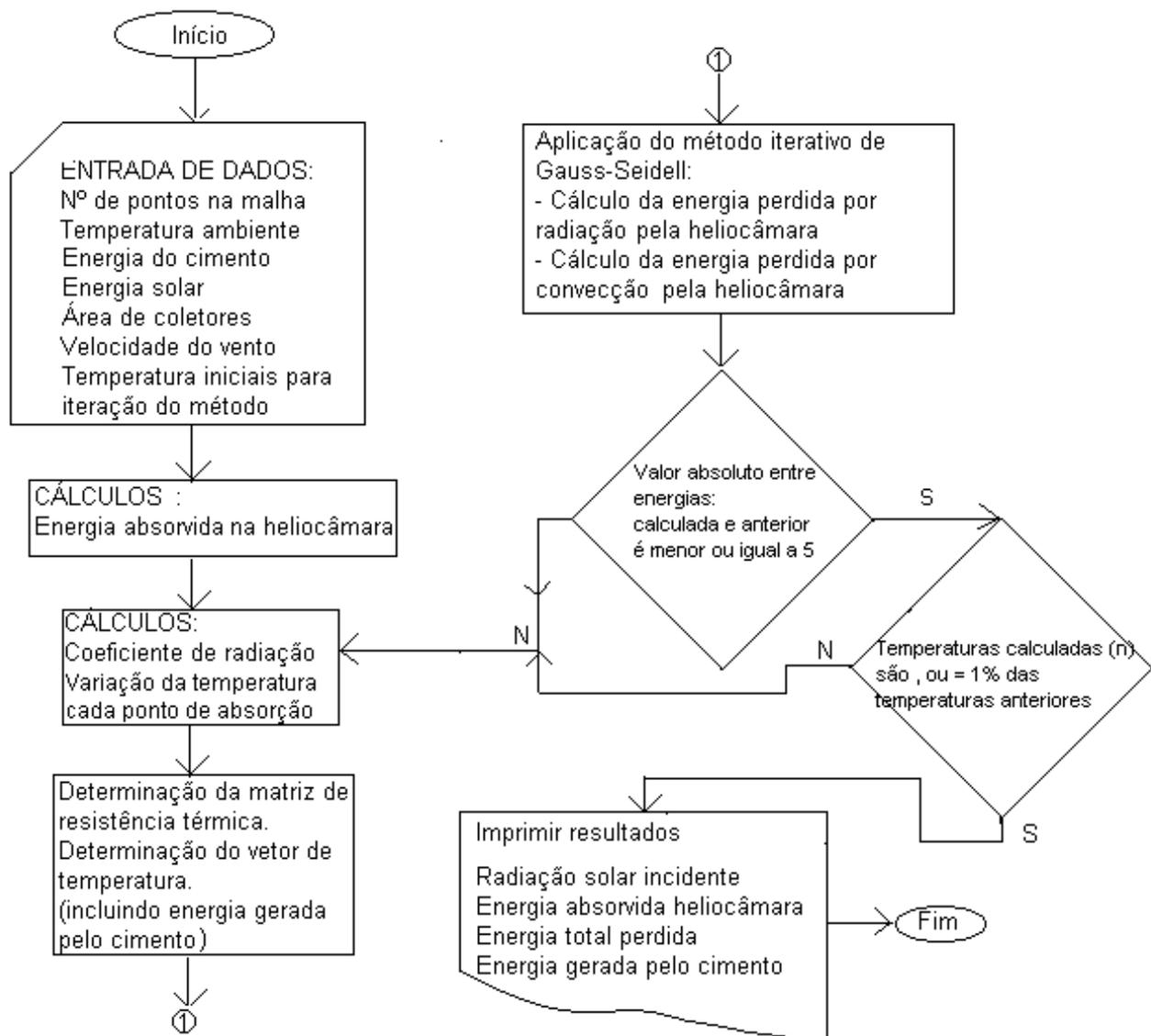


FIGURA 5.18 - Fluxograma contendo as etapas para a solução do problema de heliocâmaras.

O fluxograma citado acima, servirá de base para o desenvolvimento de um programa de computador em linguagem basic, o qual encontra-se especificado no anexo F, onde o utilizamos como ferramenta principal para a resolução do problema em questão.

Têm-se: a energia absorvida pela heliocâmara; a energia perdida pela heliocâmara para o meio ambiente e a energia produzida pela hidratação do cimento. Como consequência a determinação da energia e das temperaturas a cada faixa horária.

Em linhas gerais, o programa desenvolvido consiste da aplicação e utilização do método de Gauss-seidel . O método fora aplicado em uma seção transversal da câmara de, onde foi estabelecido uma malha térmica, formada por pontos nodais, onde foram determinadas suas temperaturas. Fora utilizado o processo de resistências térmicas ,aplicado na vizinhança de cada ponto (HOLMAN, 1963), conforme Figura 5.19. Dessa forma leva-se em consideração a energia gerada e cedida na heliocâmara, bem como suas perdas para o meio ambiente a cada hora.

Em síntese, o processo consiste num método iterativo para determinação de temperaturas onde partindo-se de temperaturas iniciais, determina-se os coeficientes (radiação, convecção e condução) Com esses coeficientes, determina-se novas temperaturas para os nós da malha, que por sua vez recalcula-se novamente os coeficientes e assim sucessivamente de uma forma cíclica.

O processo se repete até uma convergência, que para o caso do programa adotou-se uma diferença em torno de 1% entre dois ciclos consecutivos de temperatura em qualquer ponto.

visando a simplificação de cálculo e também por ter-se adotado a incidência da radiação solar perpendicular como a superfície da heliocâmara, justifica-se adotar o modelo da Figura 5.19, onde nessa seção transversal, adota-se uma malha com 18 pontos nodais.

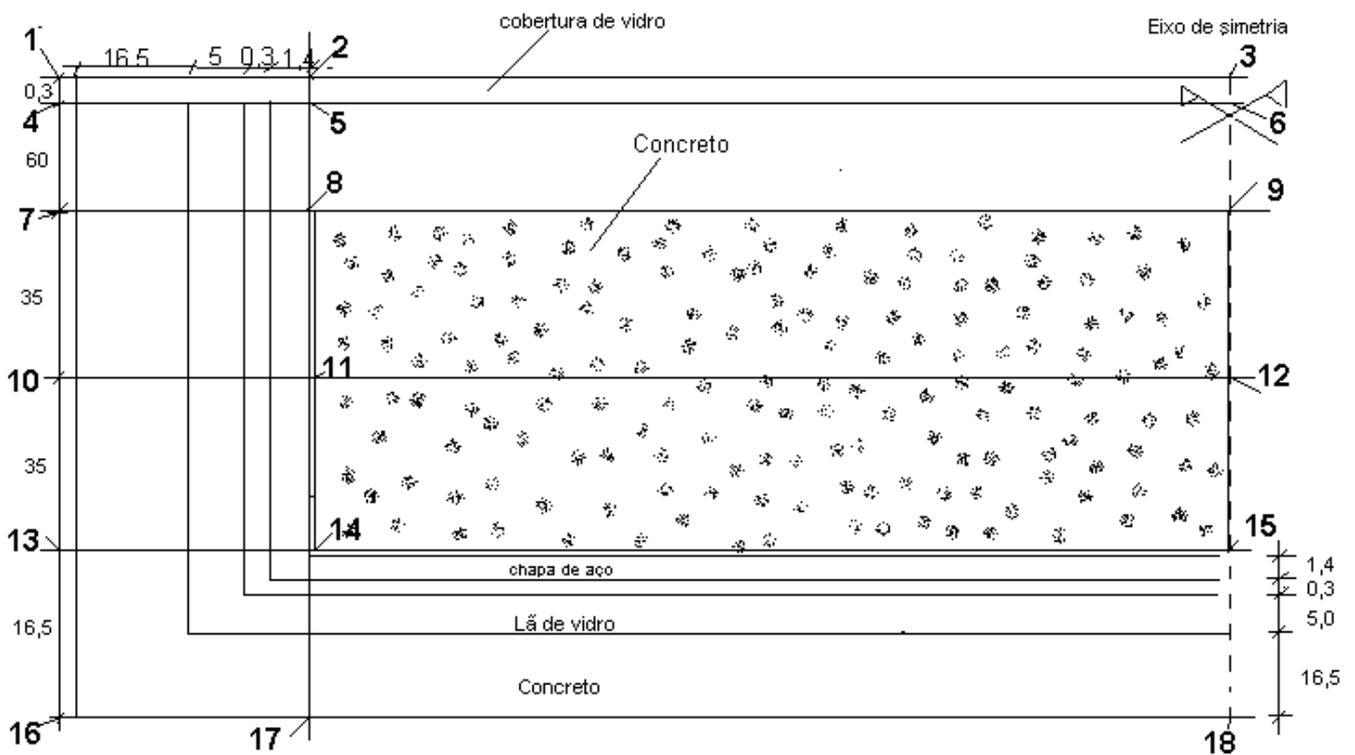


FIGURA 5.19 - Seção transversal da heliocâmara; modelo hipotético para cálculo.

5.8.4 Cálculo da energia a ser perdida da heliocâmara para o meio ambiente

O cálculo da energia a ser perdida da heliocâmara para o meio ambiente, levará em consideração as seguintes parcelas que atuarão de forma conjunta e interativa, através de suas equações:

5.8.4.1 Perdas devido às transferências interna de energia.

As transferências no interior da heliocâmara (U_i), podem ser equacionadas de maneira semelhante ao destilador solar convencional, através das equações 4.4 para Convecção e 4.3 para radiação.

5.8.4.2 Perdas de calor entre a cobertura e o ambiente externo

Utilizam-se as equações 4.16 e 4.17 para determinação dos coeficientes de radiação e Convecção. A cada hora do dia serão calculados novos coeficientes

5.8.4.3 Coeficiente de condutividade térmica global a ser utilizado na base e nas laterais da heliocâmara:

Admitindo-se a seção transversal , do coletor composta por:

- Lâmina de aço ($K=47,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $l=0,3\text{cm}$)
- Concreto ($K=1,73 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $l=12\text{cm}$)
- Lã de vidro ($K=0,050 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $l=8\text{cm}$)

tem-se a resistência térmica : $R_t = 2,07 \text{ m}^\circ\text{C/W}$

o coeficiente de perdas globais: $U_b = 1 / 2,07 = 0,48 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Na base (heliocâmara e solo), adota-se isolamento ideal, ou seja, sem perdas térmicas para o exterior.

5.8.4.4- Energia produzida pela hidratação do cimento:

A energia a ser produzida pelas reações de hidratação do cimento encontram-se baseadas no gráfico da Figura 2.1, onde a cada hora tem-se um valor diferente de energia a ser liberado.

5.8.4.5- Absorção da energia solar

A energia solar será absorvida de uma forma direta, isto é, o próprio ambiente de cura será o ambiente de captação.

Cabe ressaltar que quando do cálculo da energia e também da temperatura no interior da heliocâmara, serão analisados em forma conjunta e interativa, ou seja não serão analisados de forma isolada.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 COLETORES SOLARES PLANOS:

6.1.1 Análise de Verão:

O gráfico Figura 6.1 nos mostra a quantidade de energia absorvida, a quantidade de energia perdida na distribuição bem como a quantidade de energia perdida pela câmara de cura para o meio ambiente.

Observa-se que a energia absorvida no coletor solar plano vai crescendo até atingir um pico de máxima em torno das 12:00 horas, quando então começa a diminuir;

Observa-se ainda que as perdas de energia também crescem até atingir um limite máximo, por volta das 15:00 horas, quando então começa a diminuir as perdas (tanto na câmara de cura quanto nos dutos). Essa defasagem nos dá um ganho real em termos de energia.

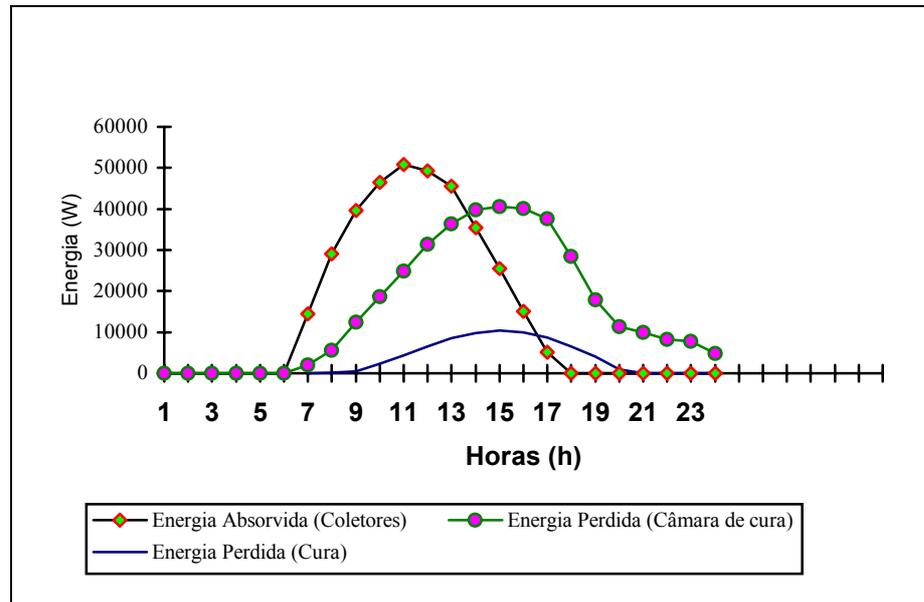


FIGURA 6.1 - Energia de absorção, e energia perdida pela câmara e também pelos dutos.

A Figura 6.2 mostra os saldos (absorção - acima do eixo horizontal e perdas, abaixo desse eixo). Constitui-se num gráfico puramente ilustrativo. Por esse gráfico verifica-se que há um saldo positivo de energia até por volta das 14:00 horas; a partir dessa hora, o sistema terá um saldo negativo de energia, cuja intensidade dependerá da inércia térmica do sistema.

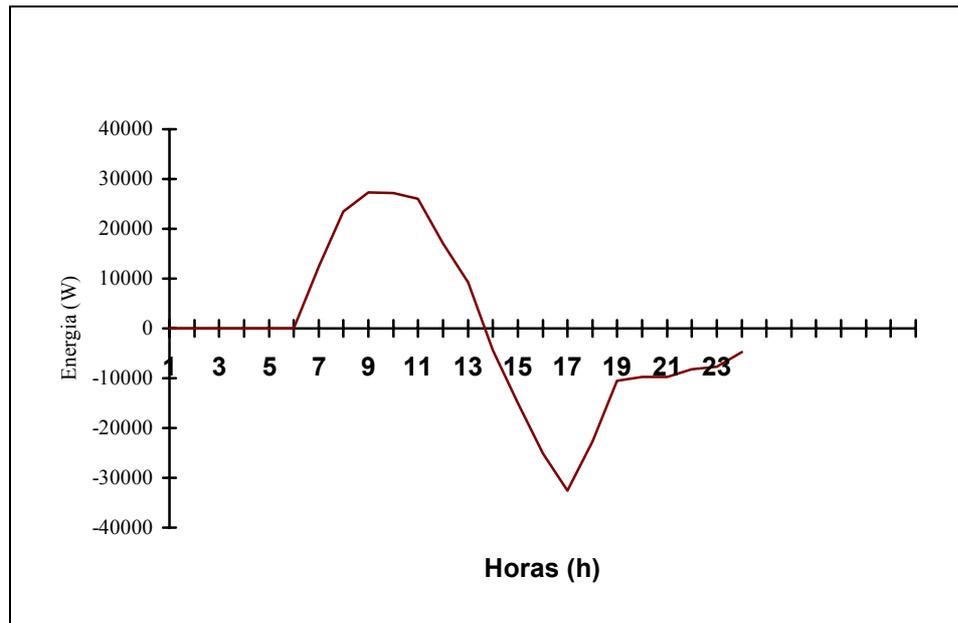


FIGURA 6.2 - Saldos entre Energia absorvida e energia perdida no sistema de cura, em função da hora.

A Figura 6.3, mostra a curva de temperatura da água circulante no sistema. Nota-se que tem-se um crescimento da temperatura desde as 07:00 horas (horário de início da radiação solar), até atingir um pico máximo, na faixa entre as 14:00 e 15:00 horas, a partir do qual começa a diminuir a temperatura da água que circula no sistema.

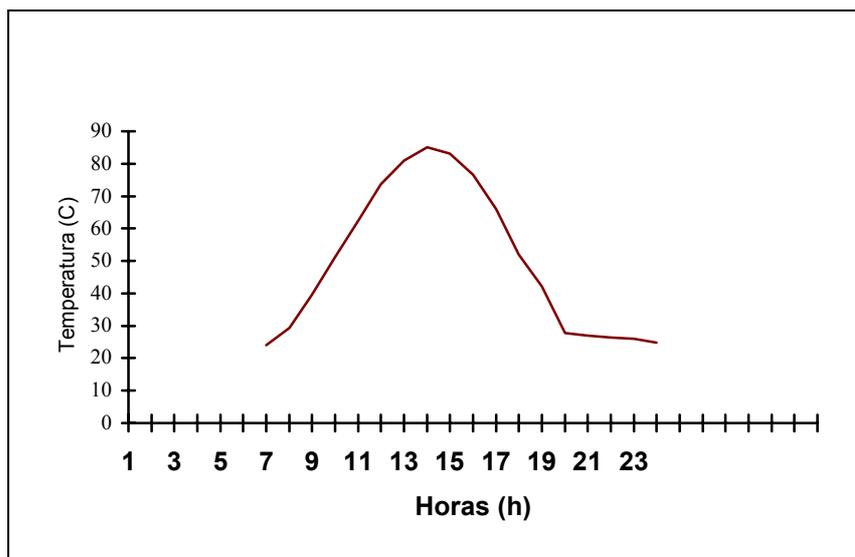


FIGURA 6.3 - Temperatura da água no sistema coletor solar plano (verão).

Essa energia acumulada na água circulante, será transferida até os pré-fabricados de concreto; cabe ressaltar que estão incluídos nos gráficos a energia liberada pela hidratação do cimento.

Como baseai-se na cura a vapor (item 2.9), pode-se adotar os seguintes decisões em relação às fases de cura:

- a) **Fase de pré-tratamento:** Após a mistura, adensamento e lançamento, deixa-se em torno de 03:00 horas somente em função da temperatura ambiente (Em torno de 23 °C entre as 05:00 e 08:00 horas), atendendo a otimização para essa fase, em termos de otimização do ciclo de cura.
- b) Pelo gráfico pode-se observar que entre as 08:00 e as 11:00 horas, a temperatura varia entre 39,5°C e 73,7 °C, ou seja, em torno de 11,4 °C por hora, não estando numa faixa otimizada para cura (15 °C a 35 °C por hora). No entanto, garante-se um dos objetivos dessa fase que seria um gradiente térmico tolerável, o que vem a cumprir as exigências de uma boa qualidade para essa fase de cura.
- c) Ainda em análise ao gráfico da Figura 6.3, pode-se deduzir uma temperatura máxima média em torno dos 77,66 °C, que é a média das temperaturas entre as 11:00 horas e as 16:00 horas; adota-se dessa

forma, uma temperatura isotérmica por um período de 5 horas consecutivas, satisfazendo os requisitos dessa fase de cura .

- d) Por fim, verificamos preencher as exigências da fase IV do ciclo de cura , em vista de termos uma desaceleração numa faixa média em torno de 4,52°C por hora, durante as próximas 3 horas (16:00 as 19:00 horas).**

Essas verificações das fases de cura a vapor (itens a) até d), nos garantem uma **qualidade** de cura, utilizando-se da energia solar como fonte calorífica

A maturidade poderá ser verificada, utilizando-se da Lei de Saul; aplicando-se essa Lei na Figura 6.3, teremos:

$$M_s = 953,8 \text{ }^\circ\text{C.h.}$$

Esse valor encontra-se melhor distribuído no gráfico Figura 6.5

Logo, uma maturidade $953,8 \text{ }^\circ\text{C.h} > 800 \text{ }^\circ\text{C.h}$, significa que **será atingida** a resistência de desforma e portanto se cumprirá o ciclo de cura em um total de 14 horas (05:00 horas até as 19:00 horas);

Assim, serão moldadas as peças de concreto as 05:00 horas e serão desformadas as 19:00 horas.

Conclui-se portanto que A energia Solar através do uso de coletores solares planos para um dia típico de verão da região de Porto Alegre, é suficiente como fonte de calor para a cura de produtos pré-fabricados de concreto, sem requerer portanto fontes de energia alternativa.

A Figura 6.4 a seguir, apresenta uma comparação entre as temperaturas ambiente e a temperatura da água quando da utilização dos coletores solares planos.

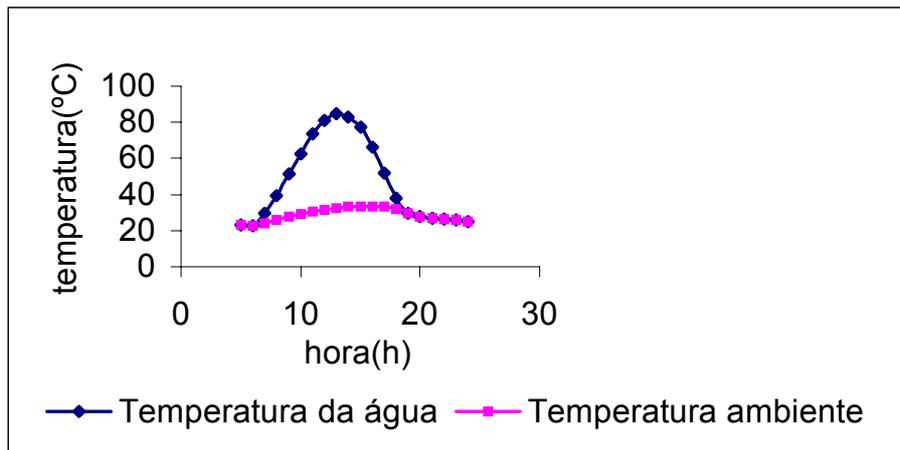


FIGURA 6.4 - Dados comparativos entre a temperatura da água durante a aplicação da energia solar e a temperatura da água na temperatura ambiente.

A figura 6.5 a seguir, apresenta o gráfico de maturidade, segundo a aplicação da Lei de Saul.

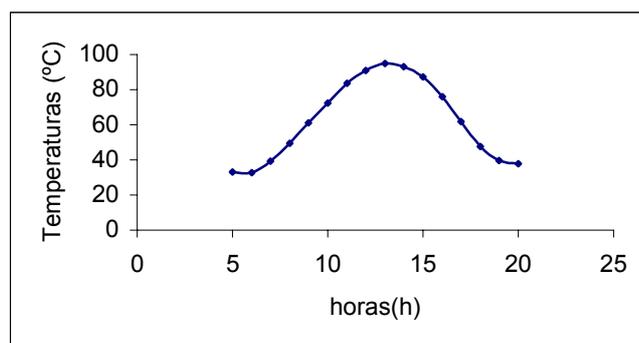


FIGURA 6.5 - Gráfico relativo a aplicação da Lei de Saul.

Os gráficos a seguir, mostram a análise na seção transversal do concreto (Figura 6.6 a 6.18) que fornecem os resultados após a aplicação da energia solar nas peças pré-fabricadas de

concreto. Tem-se assim as temperaturas na superfície, meio e base da peça a cada hora do ciclo de cura:

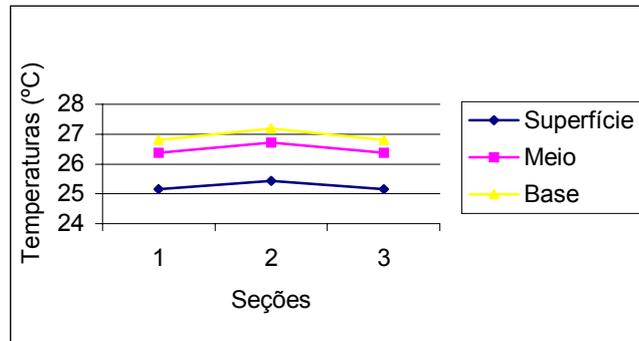


FIGURA 6.6 - Temperaturas na Seção da câmara de cura as 07:00 horas.

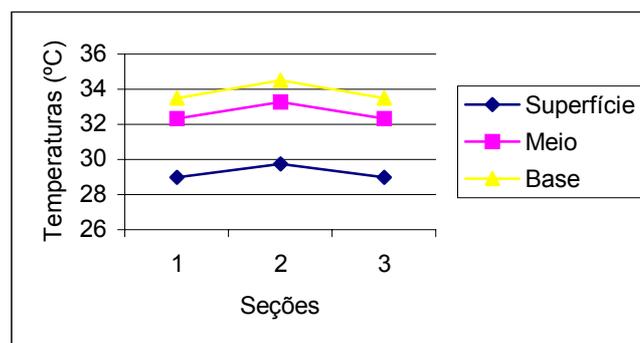


FIGURA 6.7 - Temperaturas na seção da câmara de cura as 08:00 horas.

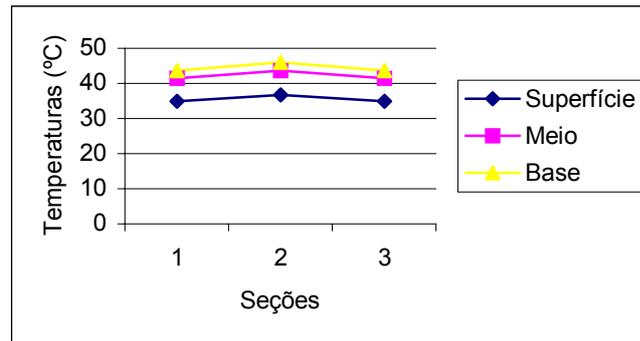


FIGURA 6.8 - Temperaturas na seção transversal da câmara de cura as 09:00 horas.

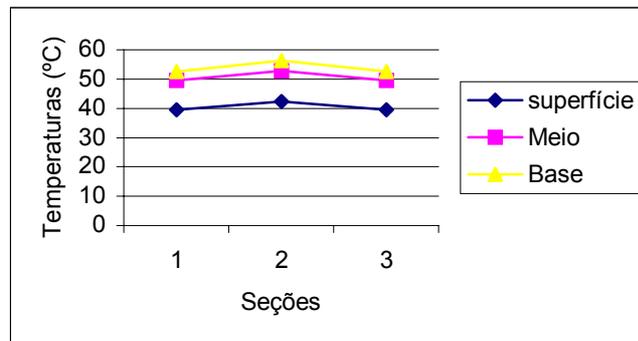


FIGURA 6.9 - Temperaturas na seção transversal da câmara de cura as 10:00 horas.

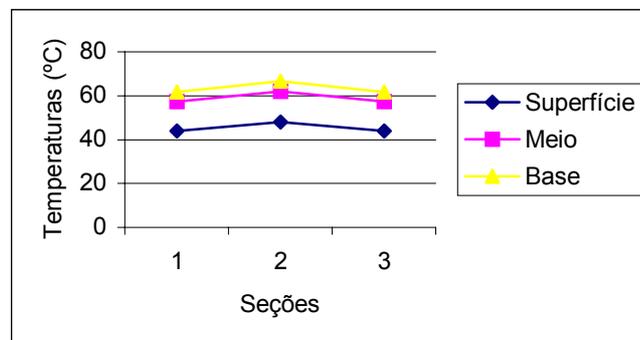


FIGURA 6.10- Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 11:00 horas.

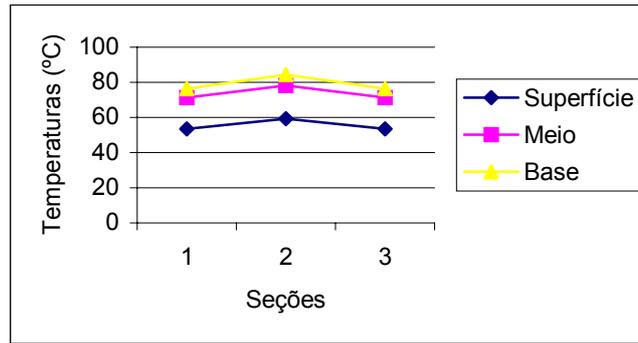


FIGURA 6.11 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 12:00 horas.

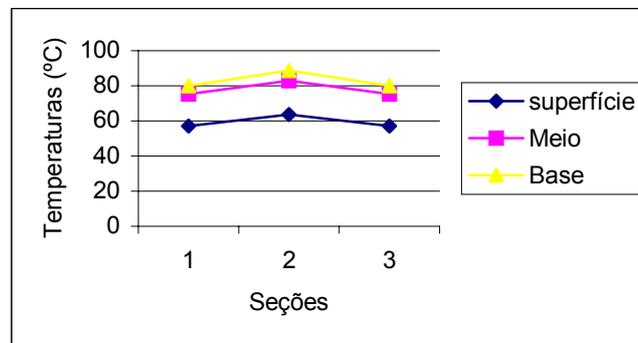


FIGURA 6.12 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 13:00 horas.

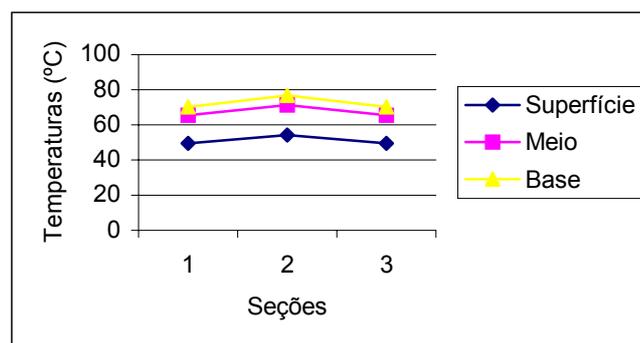


FIGURA 6.13 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 14:00 horas.

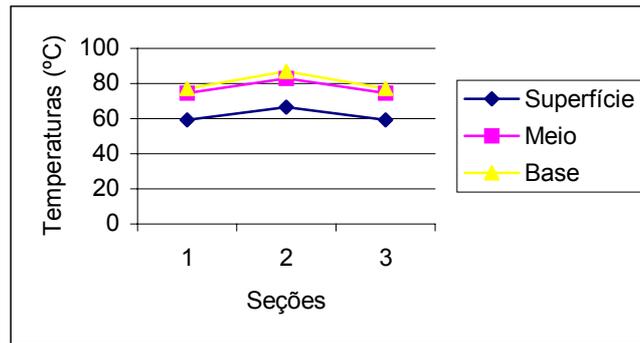


FIGURA 6.14 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 15:00 horas.

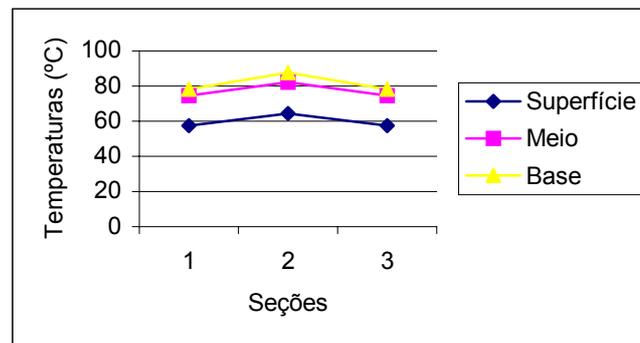


FIGURA 6.15 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 16:00 horas.

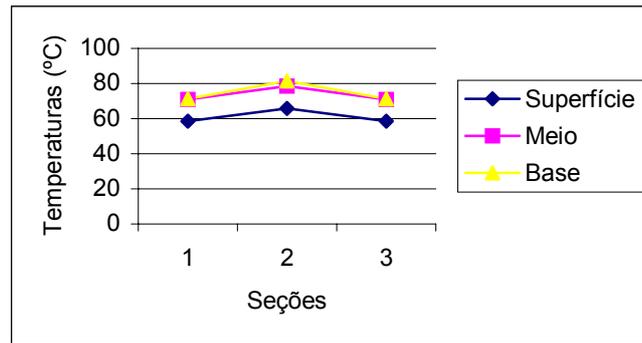


FIGURA 6.16 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 17:00 horas.

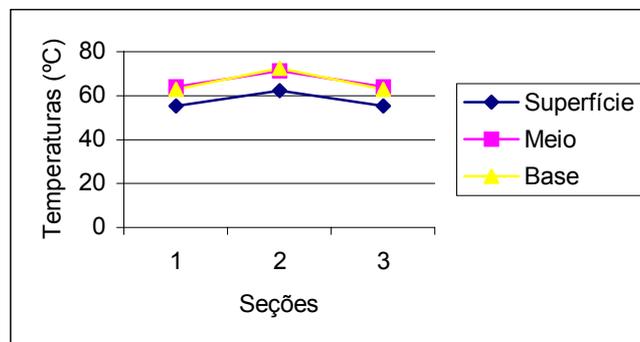


FIGURA 6.17 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 18:00 horas.

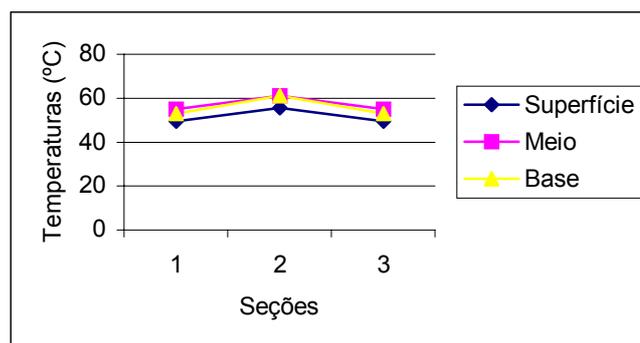


FIGURA 6.18 - Temperaturas na seção transversal da peça de concreto as 19:00 horas.

6.1.2 Análise de Inverno

O gráfico Figura 6.19 nos mostra a quantidade de energia absorvida, a quantidade de energia perdida na distribuição bem como a quantidade de energia perdida pela câmara de cura para o meio ambiente.

Observa-se que a energia absorvida no coletor solar plano vai crescendo até atingir um pico de máxima em torno das 12:00 horas, quando então começa a diminuir;

Observa-se ainda que as perdas de energia também crescem até atingir um limite máximo, por volta das 15:00 horas, quando então começa a diminuir as perdas (tanto na câmara de cura quanto nos dutos). Essa defasagem nos dá um ganho real em termos de energia.

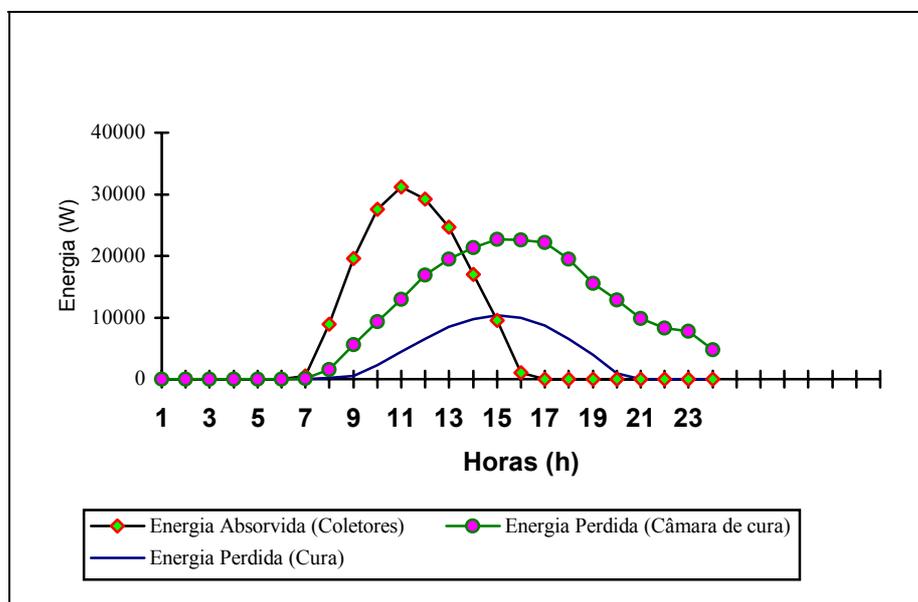


FIGURA 6.19 - Energia de absorção, e energia perdida pela câmara e também pelos dutos.

A Figura 6.20 mostra os saldos (absorção - acima do eixo horizontal e perdas, abaixo desse eixo), constituindo-se num gráfico puramente ilustrativo. Por esse gráfico verifica-se que há um saldo positivo de energia até por volta das 13:30 horas; a partir dessa hora, o sistema terá um saldo negativo de energia, cuja intensidade dependerá da inércia térmica do sistema.

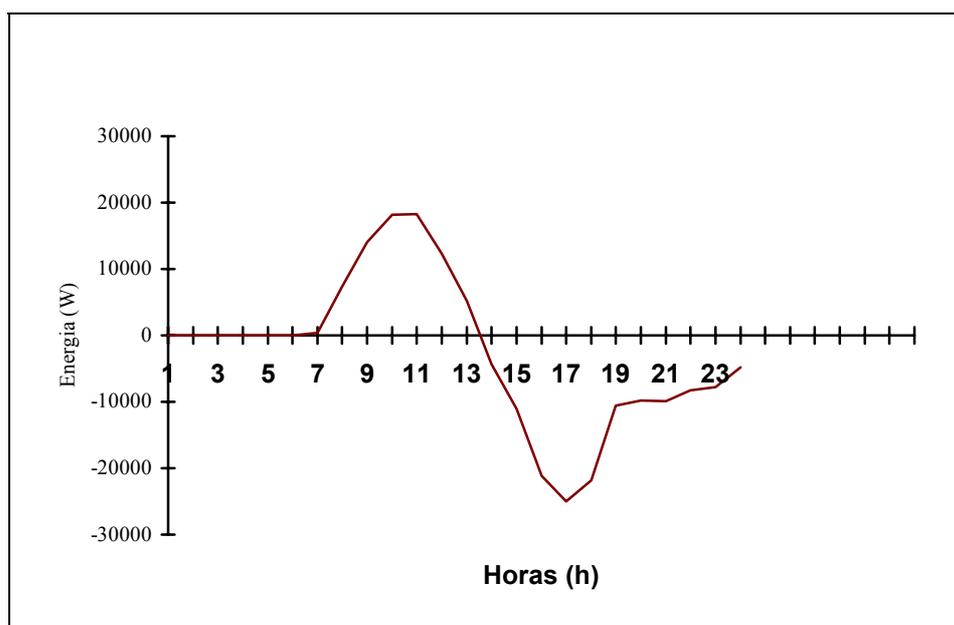


FIGURA 6.20 - Saldos entre Energia absorvida e energia perdida no sistema de cura, em função da hora.

A Figura 6.21, mostra a curva de temperatura da água circulante no sistema. Nota-se que tem-se um crescimento da temperatura desde as 07:00 horas (horário de início da radiação solar), até atingir um pico máximo, em torno das 14:00 horas, a partir do qual começa a diminuir a temperatura da água que circula no sistema.

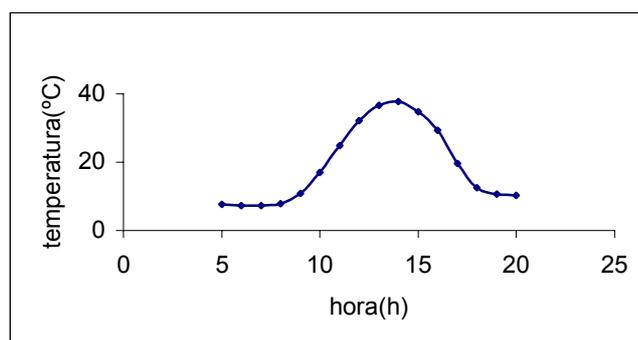


FIGURA 6.21 - Temperatura da água no sistema coletores solares planos (inverno).

Essa energia acumulada na água circulante, será transferida até os pré-fabricados de concreto; cabe ressaltar que estão incluídos nos gráficos a energia liberada pela hidratação do cimento.

Como baseai-se na cura a vapor (item 2.9), pode-se adotar as seguintes decisões em relação às fases de cura:

- a) Fase de pré-tratamento: Após a mistura, adensamento e lançamento, deixaremos em torno de 03:00 horas somente em função da temperatura ambiente (Em torno de 10,75 °C entre as 07:00 e 10:00 horas). Essa determinação não atenderia a otimização em termos de cura (item 2.9.1), estando aquém do esperado, porém sem afetar o ciclo normal de cura, haja vista a manutenção de temperatura sem grandes oscilações o que evita gradientes térmicos.
- b) Pelo gráfico (Figura 6.21), pode-se observar que entre as 10:00 e as 12:00 horas, a temperatura varia entre 17 °C e 32,1 °C, ou seja, em torno de 7,55 °C por hora, o que não cumpre as exigências de uma boa qualidade para essa fase de cura (item 2.9.2), ficando aquém de uma otimização nessa fase.
- c) Ainda em análise ao gráfico da Figura 6.21, pode-se deduzir uma temperatura máxima média em torno dos 34,12 °C, que é a média das temperaturas entre as 12:00 horas e as 16:00 horas; adota-se dessa forma, uma temperatura isotérmica por um período de 4 horas consecutivas, igualmente não satisfazendo os requisitos ideais dessa fase de cura (item 2.9.3).
- d) Por fim, verifica-se preencher as exigências da fase IV do ciclo de cura, em vista de ter-se uma desaceleração numa faixa média em torno de 6,2°C por hora, durante 3 horas, ou seja entre as 16:00 horas e as 19:00 horas.

Da avaliação feita, (itens a até d), conclui-se não serem as condições ideais para a cura, utilizando-se de energia solar como fonte calorífica; O ciclo de cura não estaria otimizado.

Quanto a maturidade, aplica-se a Lei de Saul (item 2.12.2) para a faixa horária do ciclo de cura (07:00 horas as 19:00 horas) e atingimos o seguinte valor:

$$M_s = 401 \text{ } ^\circ\text{C.h}$$

Logo, uma maturidade $401 \text{ } ^\circ\text{C.h} < 800 \text{ } ^\circ\text{C.h}$, significa que **não será atingida** a resistência de desforma e portanto não cumprimos o ciclo de cura em um total de 12 horas, que é a fase onde melhor se adapta a energia solar para a cura de concreto (07:00 horas até as 19:00 horas);

Assim, **será necessária uma energia alternativa para poder cumprir com o ciclo de cura para atingir a resistência de desforma desejada.**

Conclui-se portanto que A energia Solar através do uso de coletores solares planos para um dia **típico de inverno não é suficiente como fonte de calor**, para a cura de produtos pré-fabricados de concreto, na região de Porto Alegre, requerendo assim fontes de energia alternativa.

6.2 HELIOCÂMARAS:

Ao aplicarmos o programa desenvolvido no anexo F, sobre a seção transversal da heliocâmara (Figura 5.19), foram obtidos resultados das temperaturas sobre pontos localizados na superfície, no centro e na base das peças de concreto a cada faixa horária. A Figura 6.22 localiza esses pontos da seção transversal da heliocâmara.

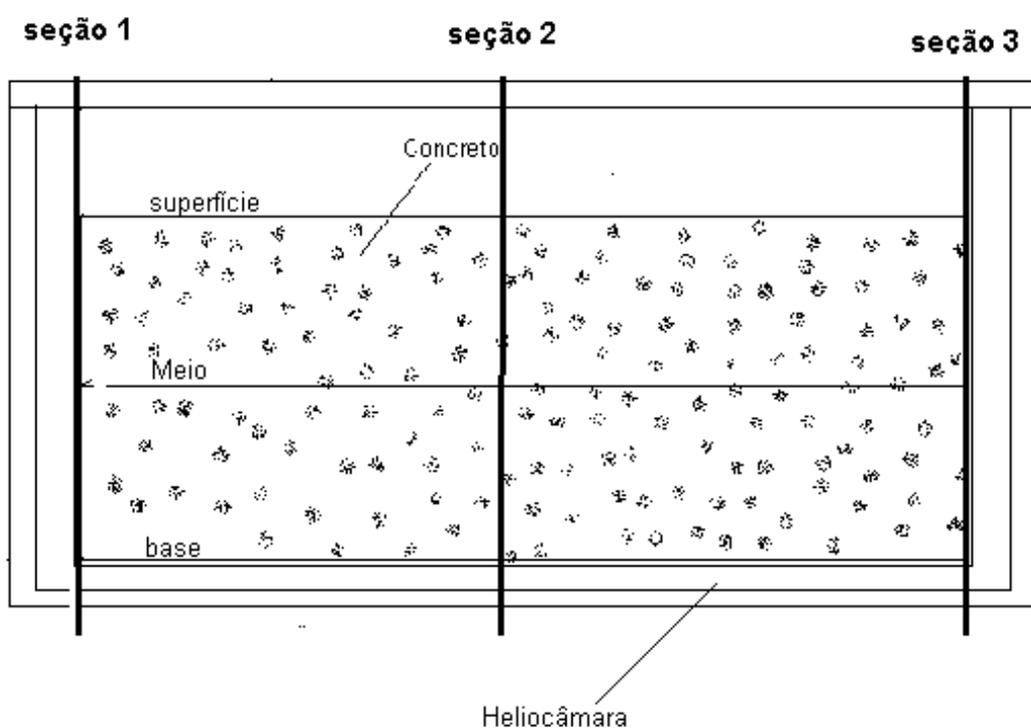


FIGURA 6.22 - Localização das seções (1,2,3) na seção transversal da heliocâmara, localizando os planos de superfície, meio e base da peça de concreto.

6.2.1 Análise de verão:

Os gráficos a seguir relacionados mostram a análise na seção transversal do concreto que foram obtidos como resultado da aplicação da energia solar utilizando-se do programa que fora desenvolvido e constante no anexo F, sobre a heliocâmara da Figura 5.19; Os resultados referem-se às posições definidas na Figura 6.22. Dessa forma têm-se nas seções transversais os seguintes gráficos (6.23 a 6.38):

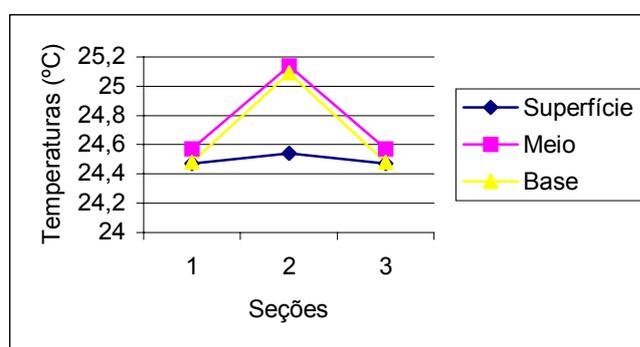


FIGURA 6.23 - Temperaturas na peça de concreto as 07:00 horas.

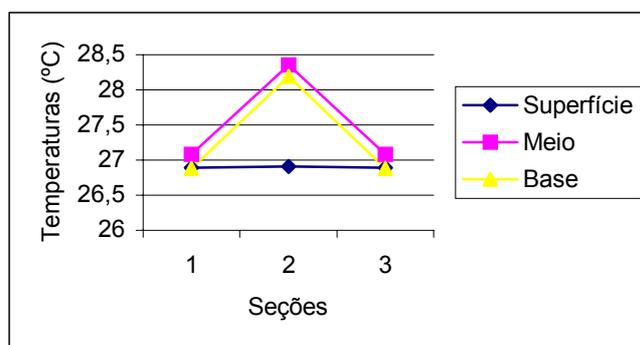


FIGURA 6.24 - Temperaturas na peça de concreto as 08:00 horas.

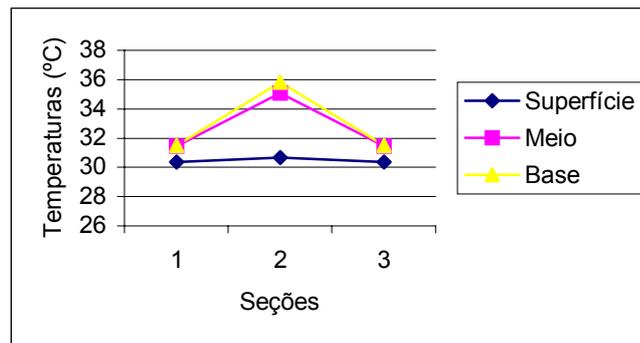


FIGURA 6.25 - Temperatura na peça de concreto as 09:00 horas.

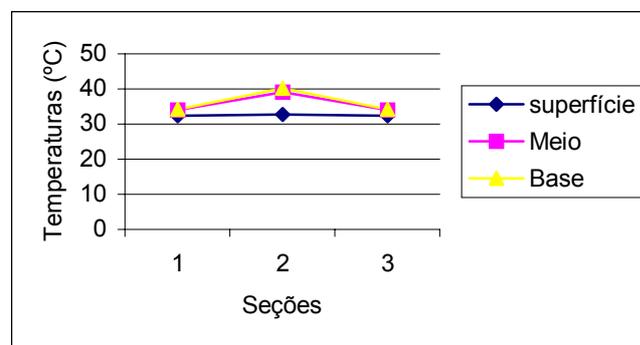


FIGURA 6.26 - Temperatura na peça de concreto as 10:00 horas.

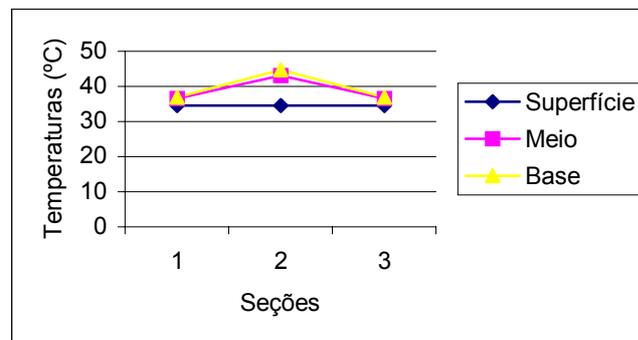


FIGURA 6.27 - Temperatura na peça de concreto as 11:00 horas

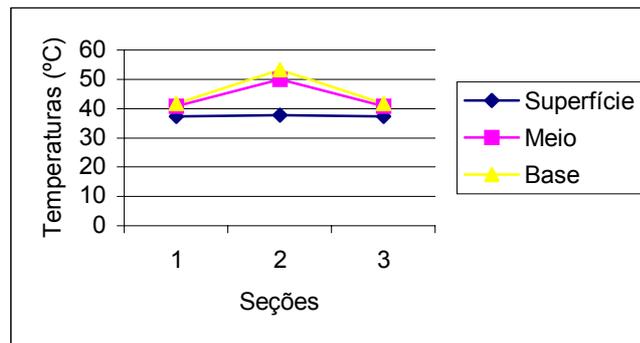


FIGURA 6.28 - Temperatura na peça de concreto as 12:00 horas.

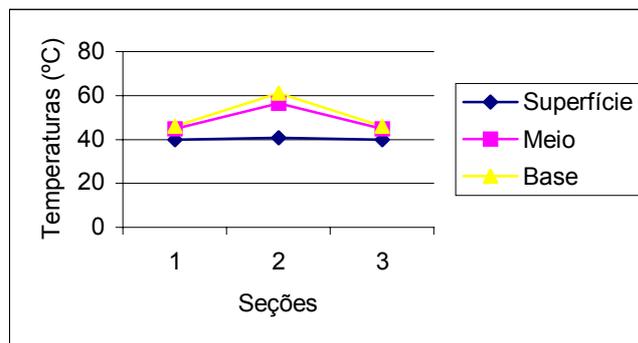


FIGURA 6.29 - Temperatura na peça de concreto as 13:00 horas.

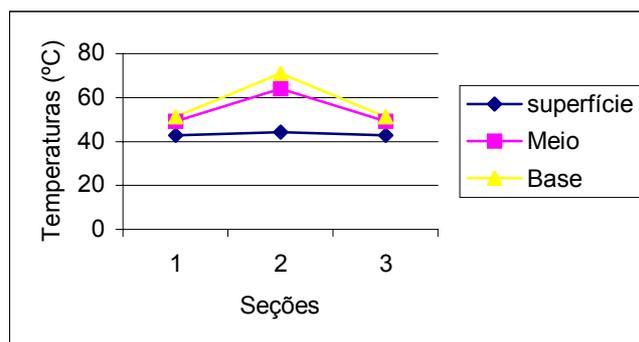


FIGURA 6.30 - Temperatura na peça de concreto as 14:00 horas.

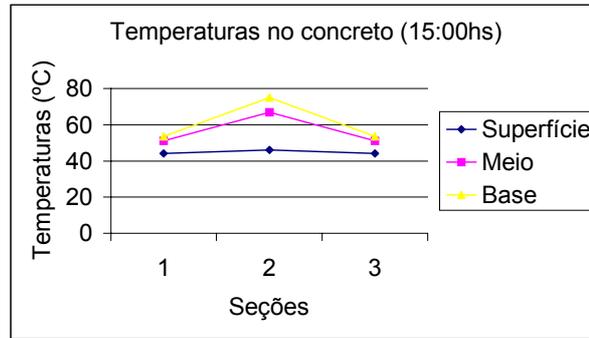


FIGURA 6.31 - Temperatura na peça de concreto as 15:00 horas.

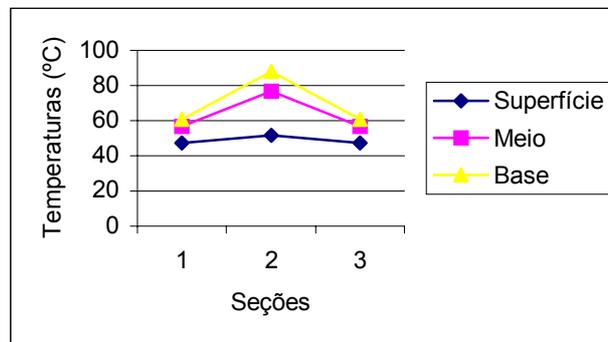


FIGURA 6.32 - Temperatura na peça de concreto as 16:00 horas.

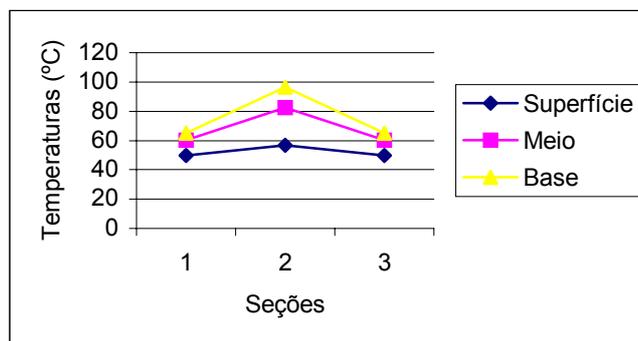


FIGURA 6.33 - Temperatura na peça de concreto as 17:00 horas.

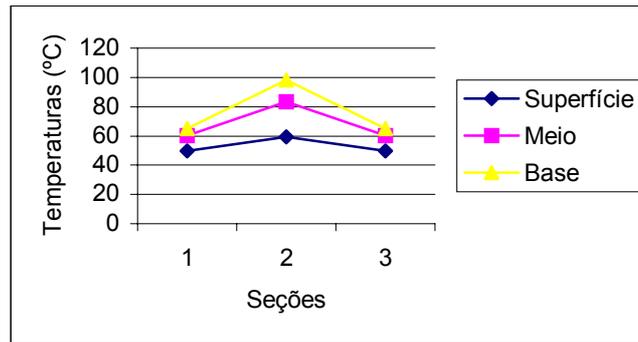


FIGURA 6.34 - Temperatura na peça de concreto as 18:00 horas.

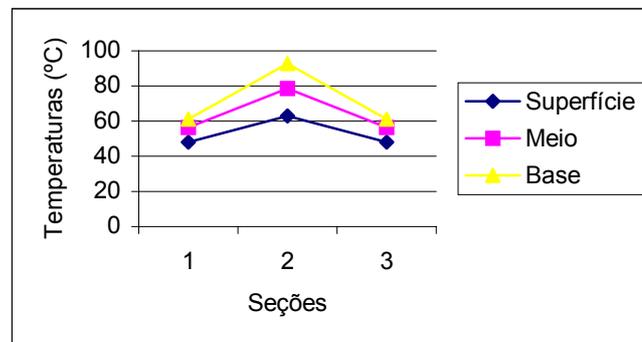


FIGURA 6.35 - Temperatura na peça de concreto as 19:00 horas.

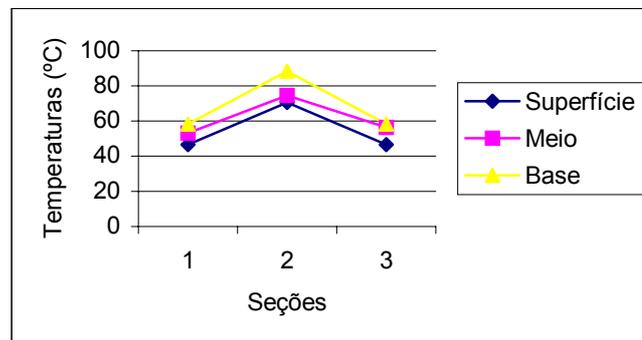


FIGURA 6.36 - Temperatura na peça de concreto as 20:00 horas.

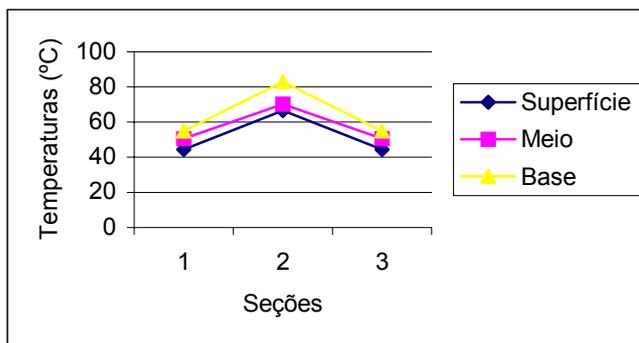


FIGURA 6.37 - temperaturas na peça de concreto as 21:00 horas.

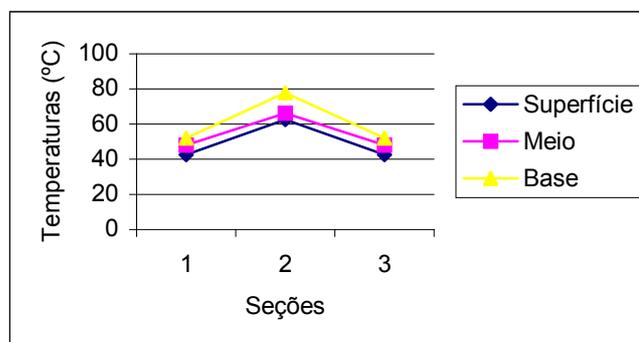


FIGURA 6.38 - Temperaturas na peça de concreto as 22:00 horas.

Observando os gráficos referente as seções transversais anteriormente especificadas, adota-se o ponto do plano de energia intermediária (meio), visando avaliar-se a maturidade. Dessa forma, reunindo os valores de temperatura a cada faixa horária nesse plano, monta-se o gráfico Figura 6.39.

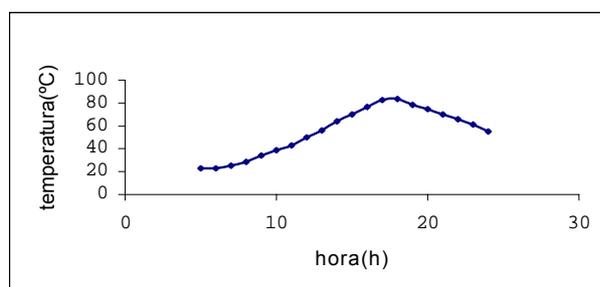


FIGURA 6.39 - temperaturas a cada hora para a seção de ponto central da peça de concreto.

Nota-se que teremos um crescimento da temperatura desde as 07:00horas (horário de início da radiação solar), até atingir um pico máximo, em torno das 17:00 horas, a partir do qual começa a decrescer.

Avaliando o ciclo de cura, segundo recomendações do item 2.9, pode-se descrever algumas observações:

a) Fase de pré-tratamento: Após a mistura, adensamento e lançamento, deixa-se em torno de 03:00 horas somente em função da temperatura ambiente (Em torno de 24,8 °C, entre as 07:00 e 10:00 horas). Essa determinação atenderia ao ideal em termos de temperatura inicial na cura do concreto (item 2.9.1), estando na faixa de valores esperado.

b).Pelo gráfico (Figura 6.39), pode-se observar que entre as 10:00 e as 15:00horas, a temperatura varia entre 28,3 °C e 69,9 °C, ou seja, em torno de 6 °C por hora, não cumprindo de forma a otimizar essa fase (item 2.9.2), porém preservando-se quanto aos gradientes térmicos de maiores intensidade.

c) Ainda em análise ao gráfico da Figura 6.39, pode-se deduzir uma temperatura média em torno dos 76,5 °C, que é a média das temperaturas entre as 15:00 horas e as 21:00 horas; adota-se dessa forma, uma temperatura isotérmica por um período de 6 horas consecutivas, satisfazendo os requisitos ideais dessa fase (item 2.9.3) de cura.

d).Por fim, verifica-se preencher as exigências da fase IV do ciclo de cura (item 2.9.4), em vista de termos uma desaceleração numa faixa média em torno de 5°C por hora, durante 2 horas.

Essas verificações das fases de cura a vapor, (itens a até d), são as condições ideais para a cura, utilizando-se da energia solar como fonte calorífica, portanto garantindo qualidade quanto ao estágio de cura inicial das peças pré-fabricadas de concreto. Aplicando-se a lei de Saul sobre a Figura 6.39, constrói-se a Figura 6.40:

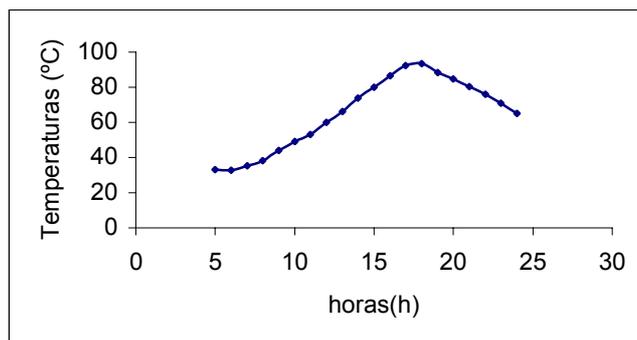


FIGURA 6.40 - Gráfico da aplicação de Lei de Saul (maturidade), no ponto central da peça de concreto.

- Calculando-se a maturidade, encontra-se o seguinte valor: $M_s = 1015 \text{ }^\circ\text{C.h}$

Logo, uma maturidade $1015 \text{ }^\circ\text{C.h} > 800 \text{ }^\circ\text{C.h}$, significa que **será atingida** a resistência de desforma e portanto cumprimos o ciclo de cura em um total de 15 horas (07:00 horas até as 22:00 horas);

Conclui-se portanto que A energia Solar através do uso de heliocâmaras para um dia típico de verão é suficiente como fonte de calor, para a cura de produtos pré-fabricados de concreto, na região de Porto Alegre, não requerendo portanto fontes de energia alternativa.

6.2.2 Análise de inverno:

Avaliando da mesma forma que na análise de verão (item 6.2.1, analisa-se o ponto central da seção transversal da peça de concreto. Dessa forma obtêm-se a Figura 6.41

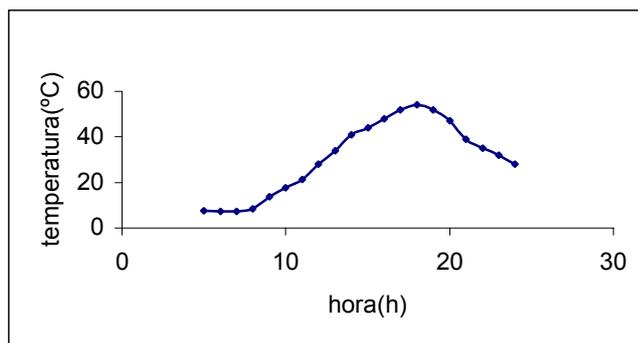


FIGURA 6.41 - Temperatura a cada hora para a seção de ponto central da peça de concreto.

Baseando-se no processo de cura a vapor (item 2.9), adota-se as seguintes decisões em relação às fases de cura:

a). Fase de pré-tratamento: Após a mistura, adensamento e lançamento, deixa-se em torno de 03:00 horas a uma temperatura em torno de 11,8 °C (entre as 07:00 e 10:00 horas). Essa determinação não atenderia a otimização em termos de cura (item 2.9.1), estando aquém do esperado, porém sem afetar seu ciclo normal, haja vista a manutenção de temperatura sem grandes oscilações o que evita gradientes térmicos.

b). Pelo gráfico (Figura 6.41), pode-se observar que entre as 10:00 e as 14:00 horas, a temperatura varia entre 17,7 °C e 40,9 °C, ou seja, numa taxa de crescimento em torno de 5,8 °C por hora, o que não cumpre as exigências de uma boa qualidade para essa fase de cura (item 2.9.2), ficando aquém de uma otimização nessa fase.

c). Ainda em análise ao gráfico da Figura 6.41, pode-se deduzir uma temperatura máxima média em torno dos 48,3 °C, que é a média das temperaturas entre as 14:00 horas e as 20:00 horas; adota-se dessa forma, uma temperatura isotérmica por um período de 6 horas consecutivas, igualmente não satisfazendo os requisitos ideais dessa fase de cura (item 2.9.3).

d). Por fim, verifica-se preencher as exigências da fase IV do ciclo de cura, em vista de termos uma desaceleração numa faixa média em torno de 5,2°C por hora, durante 2 horas, (entre as 20:00 horas e as 22:00 horas).

Da avaliação feita, (itens a até d), conclui-se não serem as condições ideais para a cura, utilizando-se de energia solar como fonte calorífica; O ciclo de cura não estaria otimizado.

Quanto a maturidade, aplica-se a Lei de Saul (item 2.12.2) para a faixa horária do ciclo de cura (07:00 horas as 19:00 horas) e atingindo-se o valor de $M_s = 690 \text{ °C.h}$.

Logo, uma maturidade $690 \text{ }^\circ\text{C.h} < 800 \text{ }^\circ\text{C.h}$, significa que **não atingiremos** a resistência de desforma e portanto não cumprimos o ciclo de cura em um total de 13 horas, que é a fase onde melhor se adapta a energia solar para a cura de concreto (07:00 horas até as 20:00 horas); Porém pode-se utilizar dessa fonte de energia, numa forma de otimizar o processo.

Assim, necessita-se de pouca energia alternativa para poder cumprir com o ciclo de cura e atingir a resistência de desforma desejada, na região de Porto Alegre.

Conclui-se portanto que A energia Solar através do uso de heliocâmaras para um dia **típico de inverno não é suficiente como fonte de calor**, para a cura de produtos pré-fabricados de concreto, porém requer um mínimo em termos de energia alternativa.

7 CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Utilizando **coletores solares planos no verão, atinge-se o grau de maturidade para os pré-fabricados e em conseqüência, a resistência preestabelecidas pela ABCI**, para a região de Porto Alegre. Essa resistência, levando-se em consideração os dados de um dia típico de verão, poderá ser obtida na faixa horária entre as 04:00 horas (concretagem) e as 21:00 horas (desforma), sendo que, as demais horas restantes do dia, poderão ser utilizadas para o preparo do ambiente a ser concretado.
- Utilizando **coletores solares planos no Inverno, Não se atingirá o grau de maturidade requerido para os pré-fabricados e em conseqüência, não atingiremos a resistência preestabelecida pela ABCI** para a região de Porto Alegre. Será necessário o uso de alguma forma de energia alternativa.
- Utilizando **heliocâmaras no verão, atinge-se o grau de maturidade para os pré-fabricados e em conseqüência, a resistência preestabelecidas pela ABCI** para a região de Porto Alegre. Essa resistência, levando-se em consideração os dados de um dia típico de verão, poderá ser obtida na faixa horária entre as 07:00 horas (concretagem) e as 22:00 horas (desforma), sendo que, as demais horas restantes do dia, poderão ser usadas para o preparo do ambiente a ser concretado.
- Utilizando **heliocâmaras no Inverno, Não atingiremos o grau de maturidade requerido para os pré-fabricados e em conseqüência, não atingiremos a resistência preestabelecida pela ABCI** para a região de Porto Alegre. Porém

serão atingidos valores de maturidade muito próximos (690 °C.h) em relação ao exigido 690 °C.h). Será necessário o uso de alguma forma de energia alternativa, para atingir esses valores.

- No caso de utilização de coletores solares planos no dia típico de verão, teremos um volume de 40 m³ de concreto para 180 m² de coletores; Assim utilizaremos para esse caso específico uma relação de 4,5 m² de coletor para cada metro cúbico de concreto;

7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Sugere-se uma melhor discretização da malha, para atingir uma melhor convergência nos resultados, tanto por coletores solares planos, quanto por heliocâmaras; porém o método de eliminação de gauss-seidel juntamente com o método de resistências térmicas requerem uma solução via matriz térmica, onde o número de pontos na malha discretizada, gera a mesma ordem de matriz a ser implantada no programa. Dessa forma teríamos um enorme volume de trabalho, principalmente para a construção dessa matriz.

- O software, desenvolvido nesse trabalho, visou ser uma ferramenta para a resolução de um modelo específico; fez a função de auxílio quanto a resolução do problema apresentado. Sugere-se o desenvolvimento de software mais abrangente, mais genérico, de modo a adaptar-se a qualquer tipo de modelo, tanto de câmara de cura (coletores), quanto de heliocâmaras.

- Ainda em relação ao software, sugere-se desenvolvê-lo estruturadamente, ou seja, baseado no conceito de subrotinas e utilizando-se uma linguagem que se adapta mais aos princípios matemáticos; nesse sentido temos a linguagem "c" e o "fortran", sendo que esse último poderia ser incorporado ao sistema "ANSYS", hoje existente na UFRGS, e que nos auxilia em vários tipos de análises, entre elas a térmica.

- Sugere-se a simulação em outros tipos de modelos e com outras composições materiais para a formação, tanto da câmara solar, quanto da heliocâmara. O anexo H, relaciona alguns modelos que poderão serem utilizados nessas análises.

- Sugere-se o desenvolvimento de estudos técnico-econômico, entre os vários modelos (anexo I), com finalidade de avaliarmos seu desempenho, manutenção e investimentos quanto a implantação de algum dos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AHMADZADEH, J .; and GASCOIGNE M . Efficiency of Solar Collectors, **Energy Conversion**, vol 16, 1976. p 13-21,.
- BASÍLIO, F. A. **Cimento Portland ABCP**, São Paulo, 1983, ET-28, 44 pág.
- BERHANE, ZAWDE. Evaporation of Water from fresh Mortar and Concrete at Different Environmental Conditions, **ACI Journal**, nov/dez, 1984. pp 560-565.
- BEZERRA, ARNALDO M. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. Editora Universitária UFPb, 1986.
- CARINO, N.J.; LEW H.S.; VOLZ, C.K. **Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method**. Journal of the American Concrete Institute, , mar./apr., 1983 p. 93-101.
- CHENGIU, GUO. Maturity of concrete, Method for predicting early-stage strength. **ACI Materials Journal**, July/Aug., 1989.
- COOPER, P. I., Design Philosophy and operating experience for Australian Solar Stills. **Solar energy**. 1974. p.1-8.
- COSTA, ENIO CRUZ. **Conforto térmico**, Ed. E. Blucher Ltda, 1984.
- DILLY, R.L.; LEDBETTER W.B. Concrete strength based on maturity and pullout, **Journal of Structural Engineering**, , feb. 1984. p. 354-369.
- DILLY, R.L.; BEIZAI V.; VOGT W. Integration of Time-Temperature Curing Histories with PC Spreadsheet software, **ACI Materials Journal**, pp 375-386, Set./Cot., 1988.
- DRAGO, PETER, A. Simulated Comparason of the Useful Energy Gain in a Fixed and a Fully Tracking Flat Plate Collector, **Solar Energy**, vol.20, 1978. pp 419-423.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN W.A., **Solar Engineering of thermal precesses**. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1980.
- FRICK, G.; HIRSCHMANN J., Theory and Experience with solar stills in Chile, **Solar Energy**, July, 1972. pp 405-413.
- GOWRIPALAN, N.; CABRERA, J.G.; CUSENS, A.R; WALNWRIGHT, P.J., Effect of Curing on Durability, **Concrete International**, February, 1990. pp 47-54.
- HANSON, J.A., Optimum steam curing procedure in precasting plants. **Journal of the concrete American Institute**, jan., 1963. pp 75-101.
- HIGGSON, E.C., Effect of steam curing on the important properties of concrete. **ACI Journal, proceedings**, sept., 1961. , pp 281-298.

- HOLMAN, J. P., **Heate transfer**. NewYork, Ed. McGraw-Hill, 1963.
- IDORN, G.M., Concrete Energy and Durability, **Concrete International**, Feb., 1984. P. 13 - 20.
- ILLSTON, DINWOODIE & SMITH, Concrete, Timber & Metals - **The Nature and Behaviour of Structural Material**, Van Nostrand, 1979.
- KAFRY, I.D., A Comparative Review of the Energy Requeriments of the Accelerated Curing of Concrete, **Precast Concrete**, Aug., 1977. P. 391-394
- KEE, F. C., Relation between strength and maturity of concrete. **ACI Journal**, mar ,1971. p.196-203
- KELLY, T. D., **Composition and Properties of Concrete**. New York, Ed. McGRAW, 1968.
- KEPPELER, R.O., **Caracterização de materiais para cobertura em coletores solares**, Dissertação (Mestrado). UFRGS, 1978.
- KIRKBRIDE, T.; MICE B., Review of Accelerated Curing Procedures, **Precast Concrete**, Feb., 1971. P. 93-106
- KREZNINGER, A., **Superfícies seletivas para conversão térmica da energia solar-óxidos de cobre sobre cobre**. Dissertação (Mestrado), Porto Alegre, 1979. 189p.
- LUNDE, P. J., **Solar Thermal Engineering**. New York, Ed. John wiley & Sons, 1980.
- MANI, A. C.; TAM C. T.; LEE S. L. Influence of high early temperatures on properties of pfa concrete. **Cement & Concrete Composites**, , 1990. p. 109-115.
- MANUAL TÉCNICO DE PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA, São Paulo, fev., 1987.
- MARROQUIN, A.I. **Relação custo/benefício para coletores solares planos e parâmetros de opção**. Dissertação (Mestrado), Porto Alegre, 1989. 94p.
- MATHER, BRYANT, The Warmer the Concrete the Faster the Cement Hydrates, **Concrete International**, , Aug., 1977. P. 29-33.
- MCCALL, W. C. Energy Consumption for Curing Precast Prestressed Concrete, **Concrete International**, Nov., 1982. P. 70-79.
- MENÉNDEZ, J.M.P. **Aceleración del endurecimiento del hormigón con el uso de la energia solar**. Santiago de Cuba, Ed. ISPJAM, 1989. 83p.
- MONTEIRO, PAULO J.M., **Tecnologia avançada no estudo do comportamento do concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Notas de Aula, 1985.
- MORSE, R.N.; READ, W.R.W. A Rational basis for the engineering developmente of a solar still, **Solar Energy**, Feb., 1968. p 5-17.

- MUNEER, T.; SALUTA, G.S. A Brief Review of Models for Computing Solar Radiation on Inclined Surfaces, **Energy Convers. Mgmt**, vol 25, n.4, 1985, p. 443-458.
- NAIK, T.R. Concrete strength prediction by the maturity method. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, , june 1980. P. 465-480
- NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. São Paulo, Ed. PINI, 1982.
- PFEIFER, D.W.; LANDGREN R. Energy-Efficient Accelerated Curing of Concrete for Plant-Produced **Prestressed Concrete**, **PCI Journal**, mar./apr., 1982. P.94-107.
- PINHEIRO, ALCINA K. **Tecnologia do concreto de cimento portland**. Escola de Engenharia da Universidade Federal de São Paulo, 1987.
- PLOWMAN, J.M. Maturity and strength of concrete. **Magazine of concrete research**, London, mar., 1956. p.13-22.
- POLISNER, L., SNELL, L. Reducing Energy Costs in Accelerated Curing of Concrete Masonry Units, **Concrete International**, feb., 1985. p. 49-52.
- POPOVICS, S. Effect of curing method and final moisture condition on compressive strength of concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, July-Aug., 1986.
- RALPH ; SPEARS. The 80% Solution to inadequate curing problems, **Concrete International**, april, 1983.
- SARTORI, E; JAGUARIBE, E.F. A produção de um Destilador solar convencional alimentado com água aquecida por via solar, **Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS)**, , jan./jun., 1985. P. 51-69.
- SATTLER, M.A. Dias climáticos típicos para o projeto térmico de edificações em Porto Alegre, **Boletim Cientec** n°. 9, Janeiro, 1989.
- SAUL, A.G.A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. **Magazine of concrete research**, London, , mar., 1951. p.127 - 140.
- SCANLON, J.M. Quality Control During Hot and Cold Weather, **Concrete International**, Sept., 1979. p. 58-65.
- SMITH, J. R. Estimating Later Age Strengths of Concrete, **ACI Journal**, , Nov.-Dec., 1984. P. 609-612.
- SMITH, M. A.; MATTHEWS J. D. Conduction calorimetric studies of the effect of sulphate on the hydration reactions of portland cement. **Cement and Concrete Research**, , 1974. P. 45-55.
- SOROKA, I.; JAEGERMANN, H.; BENTUR, A. Short-term Steam-Curing and Concrete Later-Age Strength, **Materiaux et Constructions**, Vol. 11, N°. 2.
- TARTUCE, R., **Dosagem experimental do concreto**., São Paulo, Ed. PINI, 1989. 115p.

- TAYEB, A. M. Performance Study of Some Designs of Solar Stills, **Energy Convers. Management**, , November, 1992. P. 889-898.
- TIWARI, R.C.; KUMAR A.; GUPTA, S.K.; SOOHA, G.D. Thermal Performance of Flat-Plate Solar Collectors Manufactured in India, **Energy Convers. Management**, , vol 1 31, n.4, p. 309-313 1991.
- TIWARY, G.N.; LAWRENCE S.A. New Heat and Mass Transfer Relations for a Solar Still, **Energy Convers. Mgmt.**, , vol31, N.2, 1991. P. 201-203.
- TREIS, LUIS FERNANDO, **Simulação de sistemas de aquecimento de água por energia solar com circulação natural**. Dissertação (Mestrado) UFRGS, 1991, 98 p.
- VILAGUT, F. **Prefabricados de hormigón. Barcelona**, 1975. Ed. Gustavo Gili S.A.
- YADAD, Y.P. Analitical Performance of a Solar Still integrated with a Flat Plate Solar Collector: Termosiphon Mode, **Energy Convers. Mgmt.** vol 31, Nº.3, 1991. P. 255-263.
- YADAV, Y.P.; TIWARI, G.N. Large Scale Solar Water Heaters: Experimental and Theoretical Studies, **Energy Convers. Management**, vol. 31, n.4, 1991. p. 337-351.
- ZILLES, R. **Comparação experimental de testes de coletores solares planos com simulador e com radiação solar**. Dissertação (Mestrado), UFRGS, Porto Alegre, 1988. 97 p.

ANEXOS

ANEXO A
LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO EM COLETORES SOLARES
PLANOS

Listagem do Programa em linguagem BASIC, para calcular a utilização de energia solar em pré-fabricados de concreto, através do uso de coletores solares planos. Esse programa se utiliza tanto para o dia típico de inverno quanto para o dia típico de verão.

```

1 CLS
2 REM ***** entrada de dados *****
4 CLEAR
5 INPUT "numero de pontos na malha"; n
6 DIM R(n): DIM rij(n + 2): DIM a(n, n): DIM b(n): DIM qt(150)
7 DIM tub(150): DIM ti(150)
8 INPUT "TITULO :"; T1$
10 INPUT "TEMPERATURA AMBIENTE "; ta
20 INPUT "TEMPERATURA DA AGUA j-1 "; tjn1
30 INPUT "ENERGIA DO CIMENTO "; ci
40 INPUT "TEMPERATURA INICIAL "; ti(0)
50 T1 = 300: t2 = 300: t3 = 300: t4 = 300: t7 = 300: t10 = 300
60 REM ***** energia absorvida pelos coletores *****
70 INPUT "ENERGIA ABSORVIDA (COL. G - TESVER) "; ener
:78 if tjn1 < ta then tjn1 = ta
85 cont = 0: ktd = 0: liga = 0
90 qt(0) = 0: tub(0) = 0
95 convt = 0: radt = 0
96 FOR i = 1 TO n: FOR j = 1 TO n: a(i, j) = 0: NEXT j: rij(i) = 0: b(i) = 0: NEXT i
97 REM ***** calculo dos coeficientes de radiacao *****
100 R(1) = ((5.67E-08 * .95 * .1085 * (T1 ^ 2 + ta ^ 2) * (T1 + ta)) +
          (5.67E-08 * .03 * .95 * (T1 ^ 2 + ta ^ 2) * (T1 + ta)))
110 R(2) = ((5.67E-08 * .95 * .6748 * (t2 ^ 2 + ta ^ 2) * (t2 + ta)))
120 R(3) = ((5.67E-08 * .95 * 1.133 * (t3 ^ 2 + ta ^ 2) * (t3 + ta)))
130 R(4) = ((5.67E-08 * .32 * .175 * (t4 ^ 2 + ta ^ 2) * (t4 + ta))
          + (5.67E-08 * .03 * .95 * (t4 ^ 2 + ta ^ 2) * (t4 + ta)))
140 R(7) = ((5.67E-08 * .32 * .35 * (t7 ^ 2 + ta ^ 2) * (t7 + ta)))
150 R(10) = ((5.67E-08 * .32 * .175 * (t10 ^ 2 + ta ^ 2) * (t10 + ta)))
155 REM ***** temperaturas da água na base da câmara *****
160 t11 = (tjn1 + ((ti(ktd) - tjn1) * EXP((8.31 * 210) / (7800 * .14 * 5.46)
          * (-1))))
170 t12 = (tjn1 + ((ti(ktd) - tjn1) * EXP((8.31 * 210) / (7800 * .14 * 5.46)
          * (-1))))
175 REM ***** calculo das resistências térmicas para cada ponto *****
180 rij(1) = 1.9768 + R(1)
190 rij(2) = 10.801 + R(2)
200 rij(3) = 18.01 + R(3)
210 rij(4) = 2.891 + R(4)
220 rij(5) = 9.924: rij(6) = 16.409
230 rij(7) = 3.0668 + R(7)
240 rij(8) = 5.927: rij(9) = 9.7162
250 rij(10) = 2.0134 + R(10)
259 rij(11) = 4.743: rij(12) = 7.4563: rij(13) = .48: rij(14) = 1.779
          : rij(15) = 2.5981
260 REM ***** calculo matriz coef. de resistências e vetor temperaturas ***
261 a(1, 1) = -1: a(1, 2) = .08433 / rij(1): a(1, 3) = 0
          : a(1, 4) = 1.1031 / rij(1): a(1, 5) = 0: a(1, 6) = 0
262 a(1, 7) = 0: a(1, 8) = 0: a(1, 9) = 0: a(1, 10) = 0: a(1, 11) = 0
          : a(1, 12) = 0: a(1, 13) = 0: a(1, 14) = 0: a(1, 15) = 0
263 b(1) = -(ta * .7894 + R(1) * ta) / rij(1)
264 a(2, 1) = .08433 / rij(2): a(2, 2) = -1: a(2, 3) = .01615 / rij(2)
          : a(2, 4) = 0: a(2, 5) = 6.8605 / rij(2): a(2, 6) = 0
265 a(2, 7) = 0: a(2, 8) = 0: a(2, 9) = 0: a(2, 10) = 0: a(2, 11) = 0
          : a(2, 12) = 0: a(2, 13) = 0: a(2, 14) = 0: a(2, 15) = 0

```

$$\begin{aligned}
266 & b(2) = -((ta * 3.84 + R(2) * ta) / rij(2)) \\
267 & a(3, 1) = 0: a(3, 2) = 2 * .01615 / rij(3): a(3, 3) = -1: a(3, 4) = 0 \\
& \quad : a(3, 5) = 0: a(3, 6) = 11.5188 / rij(3): a(3, 7) = 0 \\
268 & a(3, 8) = 0: a(3, 9) = 0: a(3, 10) = 0: a(3, 11) = 0: a(3, 12) = 0 \\
& \quad : a(3, 13) = 0: a(3, 14) = 0: a(3, 15) = 0 \\
269 & b(3) = -((ta * 6.458 + R(3) * ta) / rij(3)) \\
270 & a(4, 1) = 1.1031 / rij(4): a(4, 2) = 0: a(4, 3) = 0: a(4, 4) = -1 \\
& \quad : a(4, 5) = .47143 / rij(4): a(4, 6) = 0 \\
271 & a(4, 7) = .1488 / rij(4): a(4, 8) = 0: a(4, 9) = 0: a(4, 10) = 0 \\
& \quad : a(4, 11) = 0: a(4, 12) = 0: a(4, 13) = 0: a(4, 14) = 0: a(4, 15) = 0 \\
272 & b(4) = -((ta * 1.168 + R(4) * ta) / rij(4)) \\
273 & a(5, 1) = 0: a(5, 2) = .6913: a(5, 3) = 0: a(5, 4) = .0475: a(5, 5) = -1 \\
& \quad : a(5, 6) = .02294: a(5, 7) = 0 \\
274 & a(5, 8) = .2383: a(5, 9) = 0: a(5, 10) = 0: a(5, 11) = 0: a(5, 12) = 0 \\
& \quad : a(5, 13) = 0: a(5, 14) = 0: a(5, 15) = 0 \\
275 & b(5) = -((.1 * 320 * .0991 * ci) / rij(5)) \\
276 & a(6, 1) = 0: a(6, 2) = 0: a(6, 3) = .70198: a(6, 4) = 0 \\
& \quad : a(6, 5) = .027753: a(6, 6) = -1: a(6, 7) = 0 \\
277 & a(6, 8) = 0: a(6, 9) = .27027: a(6, 10) = 0: a(6, 11) = 0: a(6, 12) = 0 \\
& \quad : a(6, 13) = 0: a(6, 14) = 0: a(6, 15) = 0 \\
278 & b(6) = -((.1 * 320 * .1982 * ci) / rij(6)) \\
279 & a(7, 1) = 0: a(7, 2) = 0: a(7, 3) = 0: a(7, 4) = .1488 / rij(7) \\
& \quad : a(7, 5) = 0: a(7, 6) = 0: a(7, 7) = -1 \\
280 & a(7, 8) = .7742 / rij(7): a(7, 9) = 0: a(7, 10) = .1488 / rij(7) \\
& \quad : a(7, 11) = 0: a(7, 12) = 0: a(7, 13) = 0: a(7, 14) = 0 \\
& \quad : a(7, 15) = 0 \\
281 & b(7) = -((1.995 * ta + R(7) * ta) / rij(7)) \\
282 & a(8, 1) = 0: a(8, 2) = 0: a(8, 3) = 0: a(8, 4) = 0: a(8, 5) = .39902 \\
& \quad : a(8, 6) = 0: a(8, 7) = .13062 \\
283 & a(8, 8) = -1: a(8, 9) = .071402: a(8, 10) = 0: a(8, 11) = 0: a(8, 12) = 0 \\
& \quad : a(8, 13) = 0: a(8, 14) = 0: a(8, 15) = 0 \\
284 & b(8) = -((.1 * 320 * .1982 * ci) + (2.365 * t11)) / rij(8) \\
285 & a(9, 1) = 0: a(9, 2) = 0: a(9, 3) = 0: a(9, 4) = 0: a(9, 5) = 0 \\
& \quad : a(9, 6) = .4564: a(9, 7) = 0 \\
286 & a(9, 8) = .08711: a(9, 9) = -1: a(9, 10) = 0: a(9, 11) = 0: a(9, 12) = 0 \\
& \quad : a(9, 13) = 0: a(9, 14) = 0: a(9, 15) = 0 \\
287 & b(9) = -((.1 * 320 * .39641 * ci) + (4.4349 * t12)) / rij(9) \\
288 & a(10, 1) = 0: a(10, 2) = 0: a(10, 3) = 0: a(10, 4) = 0: a(10, 5) = 0 \\
& \quad : a(10, 6) = 0: a(10, 7) = .1488 / rij(10) \\
289 & a(10, 8) = 0: a(10, 9) = 0: a(10, 10) = -1: a(10, 11) = 0: a(10, 12) = 0 \\
& \quad : a(10, 13) = .24 / rij(10): a(10, 14) = 0: a(10, 15) = 0 \\
290 & b(10) = -((.9975 * ta + R(10) * ta) + (.6271 * t11)) / rij(10) \\
291 & a(11, 1) = 0: a(11, 2) = 0: a(11, 3) = 0: a(11, 4) = 0: a(11, 5) = 0 \\
& \quad : a(11, 6) = 0: a(11, 7) = 0 \\
292 & a(11, 8) = .4985: a(11, 9) = 0: a(11, 10) = .1322: a(11, 11) = -1 \\
& \quad : a(11, 12) = .0543: a(11, 13) = 0: a(11, 14) = .3147: a(11, 15) = 0 \\
293 & b(11) = -((.1 * 320 * .0991 * ci) / rij(11)) \\
294 & a(12, 1) = 0: a(12, 2) = 0: a(12, 3) = 0: a(12, 4) = 0: a(12, 5) = 0 \\
& \quad : a(12, 6) = 0: a(12, 7) = 0 \\
295 & a(12, 8) = 0: a(12, 9) = .5948: a(12, 10) = 0: a(12, 11) = .0691 \\
& \quad : a(12, 12) = -1: a(12, 13) = 0: a(12, 14) = 0: a(12, 15) = .3361 \\
296 & b(12) = -((.1 * 320 * .1982 * ci) / rij(12)) \\
297 & a(13, 1) = 0: a(13, 2) = 0: a(13, 3) = 0: a(13, 4) = 0: a(13, 5) = 0 \\
& \quad : a(13, 6) = 0: a(13, 7) = 0 \\
298 & a(13, 8) = 0: a(13, 9) = 0: a(13, 10) = .5: a(13, 11) = 0: a(13, 12) = 0 \\
& \quad : a(13, 13) = -1: a(13, 14) = .5: a(13, 15) = 0 \\
299 & b(13) = 0 \\
300 & a(14, 1) = 0: a(14, 2) = 0: a(14, 3) = 0: a(14, 4) = 0: a(14, 5) = 0 \\
& \quad : a(14, 6) = 0: a(14, 7) = 0: a(14, 8) = 0: a(14, 9) = 0
\end{aligned}$$

```

301 a(14, 10) = 0: a(14, 11) = 0: a(14, 12) = 0: a(14, 13) = .1349      -
      : a(14, 14) = -1: a(14, 15) = .02584                          -
302 b(14) = -(1.493 * t11 / rij(14))                                  -
303 a(15, 1) = 0: a(15, 2) = 0: a(15, 3) = 0: a(15, 4) = 0: a(15, 5) = 0  -
      : a(15, 6) = 0: a(15, 7) = 0: a(15, 8) = 0                    -
304 a(15, 9) = 0: a(15, 10) = 0: a(15, 11) = 0: a(15, 12) = 0: a(15, 13) = 0  -
      : a(15, 14) = .03602: a(15, 15) = -1                          -
305 b(15) = -(2.5062 * t12 / rij(15))                                -
310 REM ***** método de eliminação de gauss-seidell *****      -
330 n1 = n - 1                                                        -
340 FOR k = 1 TO n1                                                  -
350 c = a(k, k)                                                       -
360 k1 = k + 1                                                        -
370 IF (ABS(c) - .000001) > 0 THEN GOTO 420                          -
380 D = 0                                                              -
390 PRINT "matriz singular": PRINT "no"; k                            -
400 STOP                                                                -
410 REM divide linha pelo coeficiente da diagonal                    -
420 FOR j = k1 TO n                                                  -
430 a(k, j) = a(k, j) / c                                             -
440 NEXT j                                                            -
450 b(k) = b(k) / c                                                  -
460 REM elimina a incógnita x(k) da linha i                          -
470 FOR i = k1 TO n                                                  -
480 c = a(i, k)                                                       -
490 FOR j = k1 TO n                                                  -
500 a(i, j) = a(i, j) - c * a(k, j)                                   -
510 NEXT j                                                            -
520 b(i) = b(i) - c * b(k)                                           -
530 NEXT i                                                            -
540 NEXT k                                                            -
550 IF (ABS(a(n, n)) - .000001) <= 0 THEN GOTO 390                  -
560 REM calculo das variáveis                                         -
570 b(n) = b(n) / a(n, n)                                             -
580 REM retrosubstituição                                           -
590 FOR l = 1 TO n1                                                  -
600 k = n - l                                                         -
610 k1 = k + 1                                                        -
620 FOR j = k1 TO n                                                  -
630 b(k) = b(k) - a(k, j) * b(j)                                     -
640 NEXT j: NEXT l                                                    -
650 FOR k = 1 TO n                                                    -
660 REM PRINT "B("; k; ")="; b(k)                                     -
670 NEXT k                                                            -
680 REM valores do determinante                                     -
690 D = 1                                                              -
700 FOR i = 1 TO n                                                    -
710 D = D * a(i, i)                                                   -
720 NEXT i                                                            -
730 REM PRINT t11; "c": REM PRINT t12                                -
740 REM ***** calculo da energia perdida por radiação e Convecção ***** -
990 rad(1) = (2 * R(1) * 100 * (b(1) - ta))                          -
1000 rad(2) = (2 * R(2) * 100 * (b(2) - ta))                         -
1010 rad(3) = (R(3) * 100 * (b(3) - ta))                             -
1020 rad(4) = (2 * R(4) * 100 * (b(4) - ta))                         -
1030 rad(7) = (2 * R(7) * 100 * (b(7) - ta))                         -
1040 rad(10) = (2 * R(10) * 100 * (b(10) - ta))                     -
1050 conv(1) = 5.7 * 2 * (.6184 + .171) * 100 * (b(1) - ta)        -
1060 conv(2) = 5.7 * 2 * (.1085 + .5663) * 100 * (b(2) - ta)      -

```

```

1070 conv(3) = 5.7 * 1.133 * 100 * (b(3) - ta)
1080 conv(4) = 5.7 * 2 * (.03 + .175) * 100 * (b(4) - ta)
1090 conv(7) = 5.7 * 2 * (.35 * 100) * (b(7) - ta)
1100 conv(10) = 5.7 * 2 * (.175 * 100) * (b(10) - ta)
1110 FOR i = 1 TO 6
1120 l = i
1130 IF i = 5 THEN l = i + 2
1140 IF i = 6 THEN l = i + 4
1150 convt = convt + conv(l)
1160 radt = radt + rad(l)
1170 NEXT i
1180 cont = cont + 1
1190 qt(cont) = convt + radt
1195 REM PRINT qt(cont)
1196 REM ***** calculo da energia perdida pelos dutos *****
1198 IF ener = 0 THEN tub(cont) = 0: GOTO 1210
1200 tub(cont) = 32.09 * (ti(ktd) - ta)
1210 IF (qt(cont) + tub(cont)) - (qt(cont - 1) + tub(cont - 1)) >= 5 THEN GOTO
1215 IF tub(cont) < 0 THEN tub(cont) = 0
1218 REM ***** energia absorvida ou perdida pela água *****
1220 DIFENER = ener - tub(cont) - qt(cont)
1225 REM ***** calculo de novas temperaturas *****
1230 ktd = ktd + 1
1240 ti(ktd) = (tjn1 + DIFENER / (2000 * 1.163))
1250 IF ABS(ti(ktd) - ti(ktd - 1)) > .01 THEN GOTO 95
1255 IF ABS(T1 - b(1)) > .01 OR ABS(t2 - b(2)) > .01 THEN liga = 1
1257 IF ABS(t3 - b(3)) > .01 OR ABS(t4 - b(4)) > .01 THEN liga = 1
1258 IF ABS(t7 - b(7)) > .01 OR ABS(t10 - b(10)) > .01 THEN liga = 1
1259 IF liga = 1 THEN T1 = b(1): t2 = b(2): t3 = b(3): t4 = b(4): t7 = b(7)
: t10 = b(10): liga = 0: GOTO 95
1260 REM ***** impressão dos resultados a cada ponto
1261 CLS : PRINT T1$: PRINT
1262 FOR i = 1 TO n
1264 if ti(ktd) < ta then ti(ktd) = ta
1265 m = i: IF i = 11 THEN PRINT "T("; i; ")="; t11
: PRINT "T("; m + 1; ")="; t12: PRINT ; "T("; m + 2; ")="; b(i): GOTO 1280
1266 REM IF i = 12 OR i = 13 THEN PRINT "T("; m + 2; ")="; b(i): GOTO 1280
1270 PRINT "T("; i; ")="; b(i)
1280 NEXT i: PRINT
1285 REM ***** lista de valores finais (temperatura e perdas energia) ***
1290 PRINT "TEMPERATURA DA AGUA ="; ti(ktd)
1300 PRINT "ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA :"; qt(cont)
1302 PRINT "ENERGIA TUBULACAO"; tub(cont)
1305 PRINT "ENERGIA TOTAL PERDIDA ."; qt(cont) + tub(cont)
1310 END

```

-

ANEXO B

PLANILHA DE CÁLCULO UTILIZADO EM COLETORES SOLARES
PLANO (DIA TÍPICO DE VERÃO).

Planilha de Cálculo, utilizada juntamente com o programa de coletores solares plano; Constitui-se numa ferramenta auxiliar ao mesmo. (Resultados para o dia típico de verão).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	24.1	0	0	1.7	0.00	0	0	0			
2	23.8	0		1.3	0.00	0	0	0			
3	23.5	0		1.1	0.00	0	0	0			
4	23.2	0		1.0	0.00	0	0	0			
5	23.0	0	8	0.8	0.00	0	0	0			
6	22.9	0		1.0	0.00	0	0	0			
7	24.1	24.1	146	0.9	0.55	14454	2061	12393	0	171	1890
8	26.1	29.4	321	1.7	0.50	29083	5577	23506	0	430	5147
9	28.0	39.5	495	2.8	0.45	39663	12395	27268	1	745	11650
10	29.2	51.2	633	3.1	0.39	44801	18607	26194	1.5	1068	17495
11	30.1	62.5	779	3.1	0.36	50862	24820	26042	2	1391	32298
12	31.5	73.7	834	3.1	0.32	48372	31348	17024	3.5	1589	29758
13	32.4	81.0	858	2.9	0.29	45549	36351	9198	5	1686	34665
14	33.2	84.9	782	3.0	0.25	35470	39806	4336	7	1602	38203
15	33.5	83.1	664	3.1	0.21	25541	39185	-15059	8	1403	37782
16	33.5	77.2	505	2.6	0.17	15044	40116	-25072	11	1047	39259
17	33.3	66.1	318	1.9	0.09	5100	37636	-32536	13	600	37087
18	32.0	52.0	141	2.8	0.08	2146	20486	-22632	14	0	33024
19	29.6	37.8	21	3.0	0.00	0	10530	-10530	13.5	0	27278
20	27.7	29.6	0	3.1	0.00	0	9788	-9788	13	0	
21	27.0	27.0	0	3.6	0.00	0	9884	-9884	12		
22	26.3	26.3	0	3.1	0.00	0	8242	-8242	11		
23	26.0	26.0	0	2.6	0.00	0	7762	-7762	10.5		
24	24.8	24.8	0	1.9	0.00	0	4782	-4782	10		

Descrição das colunas:

Coluna A:	Horas	(h).
coluna B:	Temperatura Ambiente	(°C).
Coluna C:	Temperatura da água	(°C).
Coluna D:	Radiação Solar	(W/m ²).
Coluna E:	Velocidade do vento	(m/s).
Coluna F:	Rendimento do coletor.	
Coluna G:	Energia absorvida pelo coletor solar plano.	(W)
Coluna H:	Energia total perdida pela Câmara de cura	(W).
Coluna I:	Diferença entre energia absorvida pelo coletor e energia perdida pela câmara de cura	(W).
Coluna J:	Energia gerada pelo cimento portland comum	(320 Kg/m ³).
Coluna K:	Energia perdida pela distribuição (dutos)	(W).
Coluna L:	Energia perdida pela câmara de cura	(W).

ANEXO C
RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE COLETORES
SOLARES PLANO (DIA TÍPICO DE VERÃO).

Resultado dos cálculos do programa de coletores solares planos (anexo A), para um dia típico de verão; Temperatura em °C; Energia em Watts.

07:00 horas

T(1)= 24.2	T(2)= 24.7	T(3)= 24.9
T(4)= 24.3	T(5)= 25.1	T(6)= 25.4
T(7)= 24.7	T(8)= 26.3	T(9)= 26.7
T(10)= 25.7	T(11)= 26.8	T(12)= 27.1
T(13)= 26.8	T(14)= 27.9	T(15)= 28.0

TEMPERATURA DA AGUA = 29.4
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 1890.183
 ENERGIA TUBULACAO : 170.9762
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 2061.16

08:00 horas

T(1)= 26.5	T(2)= 27.9	T(3)= 28.4
T(4)= 26.8	T(5)= 28.9	T(6)= 29.7
T(7)= 27.9	T(8)= 32.3	T(9)= 33.2
T(10)= 30.4	T(11)= 33.4	T(12)= 34.5
T(13)= 33.4	T(14)= 36.4	T(15)= 36.9

TEMPERATURA DA AGUA = 39.50545
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 5147.54
 ENERGIA TUBULACAO : 430.1859
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 5577.726

09:00 horas

T(1)= 29.1	T(2)= 32.3	T(3)= 33.6
T(4)= 29.7	T(5)= 34.8	T(6)= 36.7
T(7)= 31.8	T(8)= 41.5	T(9)= 43.7
T(10)= 36.2	T(11)= 43.5	T(12)= 46.0
T(13)= 41.8	T(14)= 47.3	T(15)= 48.2

TEMPERATURA DA AGUA = 51.22287
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 11650.38
 ENERGIA TUBULACAO : 745.2208
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 12395.6

10:00 horas

T(1)= 30.9	T(2)= 35.7	T(3)= 37.6
T(4)= 31.8	T(5)= 39.4	T(6)= 42.3
T(7)= 35.0	T(8)= 49.4	T(9)= 52.8
T(10)= 41.5	T(11)= 52.5	T(12)= 56.3
T(13)= 49.9	T(14)= 58.3	T(15)= 59.6

TEMPERATURA DA AGUA = 62.48009
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 17495.57
 ENERGIA TUBULACAO : 1067.957
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 18563.52

11:00 horas

T(1)= 32.7	T(2)= 39.1	T(3)= 41.6
T(4)= 33.9	T(5)= 44.0	T(6)= 47.9
T(7)= 38.1	T(8)= 57.4	T(9)= 61.8
T(10)= 46.8	T(11)= 61.5	T(12)= 66.5
T(13)= 58.0	T(14)= 69.1	T(15)= 70.8

TEMPERATURA DA AGUA = 73.75215
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 23298.32
 ENERGIA TUBULACAO : 1391.171
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 24689.49

12:00 horas

T(1)= 34.5	T(2)= 42.8	T(3)= 46.1
T(4)= 36.0	T(5)= 49.2	T(6)= 54.3
T(7)= 41.2	T(8)= 65.4	T(9)= 71.2
T(10)= 50.9	T(11)= 70.1	T(12)= 76.7
T(13)= 64.0	T(14)= 77.1	T(15)= 79.1

TEMPERATURA DA AGUA = 81.01913
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 29758.63
 ENERGIA TUBULACAO : 1589.073
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 31347.71

13:00 horas

T(1)= 35.9	T(2)= 45.8	T(3)= 49.6
T(4)= 37.7	T(5)= 53.4	T(6)= 59.4
T(7)= 43.5	T(8)= 71.4	T(9)= 78.1
T(10)= 53.4	T(11)= 76.3	T(12)= 84.2
T(13)= 67.6	T(14)= 81.7	T(15)= 83.9

TEMPERATURA DA AGUA = 84.95431
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 34664.81
 ENERGIA TUBULACAO : 1686.475
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 36351.29

14:00 horas

T(1)= 37.1	T(2)= 48.3	T(3)= 52.7
T(4)= 39.2	T(5)= 56.9	T(6)= 63.7
T(7)= 45.1	T(8)= 75.3	T(9)= 82.9
T(10)= 53.8	T(11)= 79.8	T(12)= 88.9
T(13)= 67.6	T(14)= 81.4	T(15)= 83.5

TEMPERATURA DA AGUA = 83.13574
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 38203.8
 ENERGIA TUBULACAO : 1602.456
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 39806.26

15:00 horas

T(1)= 37.5	T(2)= 48.6	T(3)= 53.1
T(4)= 39.5	T(5)= 57.3	T(6)= 64.1
T(7)= 45.0	T(8)= 74.6	T(9)= 82.1
T(10)= 52.1	T(11)= 78.3	T(12)= 87.5
T(13)= 64.4	T(14)= 76.7	T(15)= 78.7

TEMPERATURA DA AGUA = 77.23366
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 37782.68
 ENERGIA TUBULACAO : 1403.431
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 39186.11

16:00 horas

T(1)= 37.7	T(2)= 49.8	T(3)= 54.7
T(4)= 39.9	T(5)= 59.2	T(6)= 66.6
T(7)= 44.9	T(8)= 74.6	T(9)= 82.7
T(10)= 48.2	T(11)= 76.9	T(12)= 87.0
T(13)= 57.8	T(14)= 67.4	T(15)= 68.9

TEMPERATURA DA AGUA = 66.12752
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 39259.55
 ENERGIA TUBULACAO : 1047.038
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 40306.59

17:00 horas

T(1)= 37.4	T(2)= 49.3	T(3)= 54.1
T(4)= 39.5	T(5)= 58.5	T(6)= 65.8
T(7)= 43.5	T(8)= 70.7	T(9)= 78.5
T(10)= 42.8	T(11)= 71.2	T(12)= 81.3
T(13)= 48.7	T(14)= 54.6	T(15)= 55.5

TEMPERATURA DA AGUA = 51.98043
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 37087.63
 ENERGIA TUBULACAO : 599.4691
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 37687.1

18:00 horas

T(1)= 35.8	T(2)= 46.8	T(3)= 51.3
T(4)= 37.7	T(5)= 55.3	T(6)= 62.1
T(7)= 40.5	T(8)= 63.9	T(9)= 71.1
T(10)= 36.3	T(11)= 62.9	T(12)= 72.4
T(13)= 38.6	T(14)= 41.0	T(15)= 41.4

TEMPERATURA DA AGUA = 37.80196
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 20486.08
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 20486.08

19:00 horas

T(1)= 32.8

T(2)= 42.3

T(3)= 46.1

T(4)= 34.4

T(5)= 49.5

T(6)= 55.4

T(7)= 36.2

T(8)= 54.9

T(9)= 60.9

T(10)= 29.9

T(11)= 52.8

T(12)= 61.1

T(13)= 29.6

T(14)= 29.6

T(15)= 29.6

TEMPERATURA DA AGUA = 29.60000

ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 10530.68

ENERGIA TUBULACAO : 0

ENERGIA TOTAL PERDIDA : 10530.68

ANEXO D
PLANILHA DE CÁLCULO UTILIZADO EM COLETORES
SOLARES PLANO (DIA TÍPICO DE INVERNO).

Planilha de Cálculo, utilizada juntamente com o programa de coletores solares plano; Constitui-se numa ferramenta auxiliar ao mesmo. (Resultados para o dia típico de inverno).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	9	0	2.3	2.3	0	0	0				
2	8.7	0	2.2	2.2	0	0	0				
3	8.4	0	2.1	2.1	0	0	0				
4	8	0	2.3	2.3	0	0	0				
5	7.6	0	2.4	2.4	0	0	0				
6	7.3	0	2.3	2.3	0	0	0				
7	7.3	7.3	5	2.4	0.55	495	71	424	0	5.83	65.5
8	7.8	7.8	90	2.0	0.57	9167	1306	7861	0	108	1197
9	8.7	10.9	216	2.6	0.50	19633	5618	14015	1	272	5345
10	10	16.9	335	3.4	0.46	27586	9675	17911	1.5	477	9197
11	11.1	24.6	427	3.4	0.41	31348	13953	17395	2	682	13270
12	12.2	32.1	462	3.7	0.36	29646	19101	10545	3.5	792	18308
13	12.8	36.6	455	4.1	0.31	25767	22879	2888	5	812	22067
14	13	37.8	394	4.0	0.27	18884	25850	6966	7	710	25139
15	13.2	34.8	302	3.9	0.23	12364	25280	-12916	8	525	24755
16	13	29.3	178	3.8	0.14	4424	27082	-22658	11	220	26862
17	12.6	19.6	69	3.3	0.10	1199	26134	-24935	13	0	26134
18	11.5	12.6	5	3.2	0.00	0	25234	-25234	14	0	25234
19	10.6	10.6	0	2.6	0.00	0	24266	-24266	13.5	0	24266
20	10.2	10.2	0	2.7	0.00	0	23276	-23276	13	0	23176
21	9.8	9.8	0	2.9	0.00	0	21406	-21406	12	0	21406
22	9.6	9.6	0	2.6	0.00	0	8242	-8242	11	0	8242
23	9.3	9.3	0	2.4	0.00	0	7764	-7764	10.5	0	7764
24	9.2	9.2	0	2.8	0.00	0	4782	-4782	10	0	4782

Descrição das colunas:

Coluna A:	Horas	(h).
coluna B:	Temperatura Ambiente	(°C).
Coluna C:	Temperatura da água	(°C).
Coluna D:	Radiação Solar	(W/m ²).
Coluna E:	Velocidade do vento	(m/s).
Coluna F:	Rendimento do coletor.	
Coluna G:	Energia absorvida pelo coletor solar plano.	(W)
Coluna H:	Energia total perdida pela Câmara de cura	(W).
Coluna I:	Diferença entre energia absorvida pelo coletor e energia perdida pela câmara de cura	(W).
Coluna J:	Energia gerada pelo cimento portland comum	(320 Kg/m ³).
Coluna K	Energia perdida pela distribuição (dutos)	(W).
Coluna L	Energia perdida pela câmara de cura	(W)

ANEXO E
RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE COLETORES
SOLARES PLANO (DIA TÍPICO DE INVERNO).

Resultado dos cálculos do programa de coletores solares planos (anexo A), para um dia típico de inverno Temperaturas em °C; Energia em Watts.

07:00: horas

T(1)= 7.3	T(2)= 7.3	T(3)= 7.3
T(4)= 7.3	T(5)= 7.3	T(6)= 7.3
T(7)= 7.3	T(8)= 7.3	T(9)= 7.3
T(10)= 7.3	T(11)= 7.3	T(12)= 7.4
T(13)= 7.3	T(14)= 7.4	T(15)= 7.4

TEMPERATURA DA AGUA = 7.482125
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 65.5426
 ENERGIA TUBULACAO : 5.834173
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 71.37678

08:00 horas

T(1)= 7.9	T(2)= 8.2	T(3)= 8.3
T(4)= 7.9	T(5)= 8.4	T(6)= 8.6
T(7)= 8.2	T(8)= 9.2	T(9)= 9.4
T(10)= 8.8	T(11)= 9.5	T(12)= 9.7
T(13)= 9.5	T(14)= 10.2	T(15)= 10.3

TEMPERATURA DA AGUA = 11.17956
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 1197.701
 ENERGIA TUBULACAO : 108.451
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 1306.152

09:00 horas

T(1)= 9.2	T(2)= 10.8	T(3)= 11.4
T(4)= 9.5	T(5)= 12.0	T(6)= 12.9
T(7)= 10.3	T(8)= 14.5	T(9)= 15.6
T(10)= 11.5	T(11)= 15.2	T(12)= 16.4
T(13)= 13.4	T(14)= 15.3	T(15)= 15.6

TEMPERATURA DA AGUA = 17.19526
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 5345.63
 ENERGIA TUBULACAO : 272.6174
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 5618.247

10:00 horas

T(1)= 10.9	T(2)= 13.6	T(3)= 14.6
T(4)= 11.4	T(5)= 15.6	T(6)= 17.2
T(7)= 12.9	T(8)= 20.2	T(9)= 22.0
T(10)= 15.2	T(11)= 21.4	T(12)= 23.5
T(13)= 18.8	T(14)= 22.3	T(15)= 22.9

TEMPERATURA DA AGUA = 24.89017
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 9197.577
 ENERGIA TUBULACAO : 477.8244
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 9675.401

11:00 horas

T(1)= 12.4	T(2)= 16.2	T(3)= 17.7
T(4)= 13.1	T(5)= 19.1	T(6)= 21.5
T(7)= 15.3	T(8)= 26.0	T(9)= 28.5
T(10)= 19.0	T(11)= 27.8	T(12)= 30.8
T(13)= 24.3	T(14)= 29.6	T(15)= 30.4

TEMPERATURA DA AGUA = 32.36868
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 13270.09
 ENERGIA TUBULACAO : 682.5102
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 13952.6

12:00 horas

T(1)= 14.1	T(2)= 19.4	T(3)= 21.6
T(4)= 15.0	T(5)= 23.6	T(6)= 26.9
T(7)= 17.89	T(8)= 32.3	T(9)= 35.9
T(10)= 21.8	T(11)= 34.3	T(12)= 38.7
T(13)= 28.3	T(14)= 34.7	T(15)= 35.7

TEMPERATURA DA AGUA = 36.89349
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 18308.69
 ENERGIA TUBULACAO : 792.412
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 19101.11

13:00 horas:

T(1)= 15.1	T(2)= 21.7	T(3)= 24.3
T(4)= 16.3	T(5)= 26.8	T(6)= 30.9
T(7)= 19.4	T(8)= 36.6	T(9)= 41.0
T(10)= 23.1	T(11)= 38.6	T(12)= 44.0
T(13)= 29.9	T(14)= 36.7	T(15)= 37.8

TEMPERATURA DA AGUA = 38.13129
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 22066.88
 ENERGIA TUBULACAO : 812.879
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 22879.76

14:00 horas:

T(1)= 15.7	T(2)= 23.5	T(3)= 26.6
T(4)= 17.1	T(5)= 29.4	T(6)= 34.2
T(7)= 20.3	T(8)= 39.4	T(9)= 44.5
T(10)= 22.5	T(11)= 40.8	T(12)= 47.3
T(13)= 28.7	T(14)= 34.9	T(15)= 35.8

TEMPERATURA DA AGUA = 35.13522
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 25139.55
 ENERGIA TUBULACAO : 710.3175
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 25849.87

15:00 horas:

T(1)= 15.9	T(2)= 23.7	T(3)= 26.9
T(4)= 17.3	T(5)= 29.8	T(6)= 34.6
T(7)= 20.1	T(8)= 38.5	T(9)= 43.7
T(10)= 20.7	T(11)= 39.3	T(12)= 45.9
T(13)= 25.4	T(14)= 30.2	T(15)= 30.9

TEMPERATURA DA AGUA = 29.57682
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 24755.18
 ENERGIA TUBULACAO : 525.5306
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 25280.71

16:00 horas:

T(1)= 16.0	T(2)= 25.0	T(3)= 28.6
T(4)= 17.6	T(5)= 31.8	T(6)= 37.4
T(7)= 20.0	T(8)= 39.2	T(9)= 45.0
T(10)= 17.2	T(11)= 38.6	T(12)= 46.3
T(13)= 19.5	T(14)= 21.9	T(15)= 22.3

TEMPERATURA DA AGUA = 19.85868
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 26862.21
 ENERGIA TUBULACAO : 220.0939
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 27082.31

17:00 horas:

T(1)= 15.7	T(2)= 24.8	T(3)= 28.5
T(4)= 17.2	T(5)= 31.7	T(6)= 37.4
T(7)= 18.9	T(8)= 36.8	T(9)= 42.6
T(10)= 12.7	T(11)= 34.7	T(12)= 42.8
T(13)= 12.6	T(14)= 12.6	T(15)= 12.6

TEMPERATURA DA AGUA = 12.6
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 26134.81
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 26134.81

18:00 horas:

T(1)= 14.5	T(2)= 23.6	T(3)= 27.3
T(4)= 16.0	T(5)= 30.5	T(6)= 36.1
T(7)= 17.3	T(8)= 34.0	T(9)= 39.8
T(10)= 11.5	T(11)= 31.2	T(12)= 39.2
T(13)= 11.5	T(14)= 11.5	T(15)= 11.5

TEMPERATURA DA AGUA = 11.5
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 25234.43
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 25234.43

19:00 horas:

T(1)= 13.5	T(2)= 22.2	T(3)= 25.8
T(4)= 14.9	T(5)= 28.8	T(6)= 34.3
T(7)= 16.1	T(8)= 32.2	T(9)= 37.8
T(10)= 10.6	T(11)= 29.5	T(12)= 37.2
T(13)= 10.6	T(14)= 10.6	T(15)= 10.6.7

TEMPERATURA DA AGUA = 10.6
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 24266.86
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 24266.86

20:00 horas:

T(1)= 13.0	T(2)= 21.3	T(3)= 24.7
T(4)= 14.4	T(5)= 27.7	T(6)= 32.9
T(7)= 15.5	T(8)= 30.8	T(9)= 36.1
T(10)= 10.2	T(11)= 28.1	T(12)= 35.5
T(13)= 10.2	T(14)= 10.2	T(15)= 10.2

TEMPERATURA DA AGUA = 10.2
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 23175.88
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 23175.88

21:00 horas:

T(1)= 12.4	T(2)= 20.1	T(3)= 23.2
T(4)= 13.6	T(5)= 25.9	T(6)= 30.8
T(7)= 14.6	T(8)= 28.8	T(9)= 33.7
T(10)= 9.8	T(11)= 26.3	T(12)= 33.2
T(13)= 9.8	T(14)= 9.8	T(15)= 9.8

TEMPERATURA DA AGUA = 9.8
 ENERGIA PERDIDA P/ CAMARA : 21405.78
 ENERGIA TUBULACAO : 0
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 21405.78

ANEXO F

LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO EM HELIOCÂMARAS

Listagem do programa , em linguagem BASIC, para o cálculo da utilização de energia solar em pré-fabricados de concreto, utilizando-se de heliocâmaras. Esse programa será utilizado tanto para o cálculo em um dia típico de verão quanto para um dia típico de inverno.

```

1 REM ##### entrada de dados #####
2 CLS
3 CLEAR
4 INPUT "numero de equações"; N
6 DIM r(N): DIM rij(N + 2): DIM a(N, N): DIM B(N): DIM qt(150)
   : DIM tub(150): DIM ti(150): DIM C(N)
7 DIM rad(N): DIM conv(N): DIM EN(N)
8 REM NO PRIMEIRO CALCULO, CONSIDERO TEMPERATURA TI(i)=TA.
9 OPEN "R", #1, "VET1"
10 FIELD #1, 8 AS TEMP$
11 FOR I = 1 TO N
12 GET #1, I
13 ti(I) = CVD(TEMP$)
16 PRINT ti(I): NEXT I
17 CLOSE #1
18 INPUT "TITULO "; T1$
20 INPUT "TEMPERATURA AMBIENTE "; ta
30 INPUT "ENERGIA DO CIMENTO "; CI
35 INPUT "VENTO (m/s) "; VENTO
38 INPUT "ENERGIA SOLAR "; ENERGIA
39 REM ##### calculo da energia absorvida na heliocâmara #####
40 absvidro = .085: REFLVIDRO = .147: TRANSVIDRO = 1 - (absvidro + REFLVIDRO)
   : absconcre = .66: absaco = .7
41 ener1 = ENERGIA * TRANSVIDRO
42 Q1 = absvidro * ENERGIA * .083
43 Q2 = absvidro * ENERGIA * .6493
44 Q3 = absvidro * ENERGIA * 1.1326
45 Q4 = absvidro * ENERGIA * .083 + absconcre * ener1 * .083
46 Q5 = absvidro * ENERGIA * .6493 + absaco * ener1 * .083
47 Q6 = absvidro * ENERGIA * 1.1326
48 Q8 = absconcre * ener1 * .5663 + ener1 * .5663 * (1 - absconcre)
49 Q9 = absconcre * ener1 * 1.1326 + ener1 * 1.1326 * (1 - absconcre)
50 REM ##### variação de temperatura em cada ponto de absorção #####
53 dt1 = Q1 / (1 * .0015 * .083 * 2500 * .22)
54 dt2 = Q2 / (1 * .0015 * .6493 * 2500 * .22)
55 dt3 = Q3 / (1 * .0015 * 1.1326 * 2500 * .22)
56 dt4 = Q4 / (1 * .0015 * .083 * 2500 * .22 + 1 * .3 * .083 * 2300 * .23)
57 FOR I = 1 TO N: IF ti(I) < ta THEN ti(I) = ta
58 NEXT I
60 T1 = dt1 + ta: T2 = dt2 + ta: T3 = dt3 + ta: T4 = dt4 + ta: T7 = ta
   : T10 = ta: T13 = ta
68 dt5 = Q5 / (1 * .3 * .083 * 7800 * .124 + 1 * .0015 * .6493 * 2500 * .22
   + 1 * .3 * .5663 * 1.2928 * .2803)
69 dt6 = Q6 / (1 * 1.1326 * .0015 * 2300 * .23 + 1 * .3 * 1.1326 * 1.2928 * .2
71 dt8 = Q8 / (1 * .083 * .475 * 7800 * .124 + 1 * .5663 * .175 * 2300 * .23
   + 1 * .3 * .5663 * 1.2928 * .2803)
72 dt9 = Q9 / (1 * 1.1326 * .175 * 2300 * .23 + 1 * 1.1326 * .3 * 1.2928 * .28
75 t8 = dt8 + ta: t5 = dt5 + ta: t9 = dt9 + ta: t6 = dt6 + ta
78 REM ##### calculo dos coeficientes de Convecção #####
80 HCONV = 5.7 + 3.8 * VENTO
82 C(1) = HCONV * (.0015 + .083): C(2) = HCONV * .6493: C(3) = HCONV * 1.1326
   : C(4) = HCONV * (.0015 + .3)
83 C(7) = HCONV * .475: C(10) = HCONV * .35
84 C(13) = HCONV * .258

```

```

85 cont = 0: ktd = 0: liga = 0
90 qt(0) = 0: REM tub(0) = 0
95 convt = 0: radt = 0
96 FOR I = 1 TO N: FOR j = 1 TO N: a(I, j) = 0: NEXT j: rij(I) = 0: B(I) = 0
: NEXT I
97 REM ##### calculo dos coeficientes de radiacao #####
100 r(1) = ((5.67E-08 * .88 * (.0015 + .083) * (T1 ^ 2 + ta ^ 2) * (T1 + ta)))
110 r(2) = ((5.67E-08 * .88 * .6493 * (T2 ^ 2 + ta ^ 2) * (T2 + ta)))
120 r(3) = ((5.67E-08 * .88 * 1.1326 * (T3 ^ 2 + ta ^ 2) * (T3 + ta)))
130 r(4) = ((5.67E-08 * .9 * .3 * (T4 ^ 2 + ta ^ 2) * (T4 + ta))
+ (5.67E-08 * .88 * .0015 * (T4 ^ 2 + ta ^ 2) * (T4 + ta)))
140 r(7) = ((5.67E-08 * .9 * .475 * (T7 ^ 2 + ta ^ 2) * (T7 + ta)))
150 r(10) = ((5.67E-08 * .9 * .35 * (T10 ^ 2 + ta ^ 2) * (T10 + ta)))
159 r(13) = ((5.67E-08 * .9 * .258 * (T13 ^ 2 + ta ^ 2) * (T13 + ta)))
160 REM ---- Convecção e radiação para os pontos internos -----
161 PW9 = 10 ^ (9.1488 - (2316 / t9))
162 PW8 = 10 ^ (9.1488 - (2316 / t8))
163 PG6 = 10 ^ (9.1488 - (2316 / t6))
164 PG5 = 10 ^ (9.1488 - (2316 / t5))
165 C(8) = 3.182 * (ABS((t8 - t5) + ((PW8 - PG5) / (2009 - PW8)) * t8)
^ (1 / 3)): C(8) = C(8) * .5663: C(5) = C(8)
166 r(8) = 4.44E-09 * (t8 ^ 2 + t5 ^ 2) * (t8 + t5): r(8) = r(8) * .5663
: r(5) = r(8)
167 C(9) = 3.182 * (ABS((t9 - t6) + ((PW9 - PG6) / (2009 - PW9)) * t9)
^ (1 / 3)): C(9) = C(9) * 1.1326: C(6) = C(9)
168 r(9) = 4.44E-09 * (t9 ^ 2 + t6 ^ 2) * (t9 + t6): r(9) = r(9) * 1.1326
: r(6) = r(9)
175 REM ##### calculo das resistências térmicas para cada ponto #####
180 rij(1) = 29.05949 + C(1) + r(1)
190 rij(2) = 227.2659 + C(2) + r(2)
200 rij(3) = 396.4128 + C(3) + r(3)
210 rij(4) = 30.898 + C(4) + r(4)
220 rij(5) = 229.1325 + C(5) + r(5): rij(6) = 396.4688 + C(6) + r(6)
230 rij(7) = 3.0588 + C(7) + r(7)
240 rij(8) = 5.5153 + C(8) + r(8): rij(9) = 4.91275 + C(9) + r(9)
250 rij(10) = 2.44067 + C(10) + r(10)
255 rij(11) = 7.29735: rij(12) = 9.7132: rij(13) = 2.16533 + C(13) + r(13)
256 rij(14) = 7.88671: rij(15) = 11.4428: rij(16) = .945: rij(17) = 4.23807
: rij(18) = 6.5861
260 REM ##### calculo matriz coef. resistências e vetor de temperaturas #####
261 a(1, 1) = -1: a(1, 2) = .009488 / rij(1): a(1, 3) = 0
: a(1, 4) = 29.05 / rij(1): a(1, 5) = 0: a(1, 6) = 0: a(1, 7) = 0
: a(1, 8) = 0: a(1, 9) = 0
262 a(1, 10) = 0: a(1, 11) = 0: a(1, 12) = 0: a(1, 13) = 0: a(1, 14) = 0
: a(1, 15) = 0: a(1, 16) = 0: a(1, 17) = 0: a(1, 18) = 0
263 B(1) = -(C(1) * ta + r(1) * ta) / rij(1)
264 a(2, 1) = .009488 / rij(2): a(2, 2) = -1: a(2, 3) = .00139 / rij(2)
: a(2, 4) = 0: a(2, 5) = 227.255 / rij(2): a(2, 6) = 0
: a(2, 7) = 0: a(2, 8) = 0: a(2, 9) = 0
265 a(2, 10) = 0: a(2, 11) = 0: a(2, 12) = 0: a(2, 13) = 0: a(2, 14) = 0
: a(2, 15) = 0: a(2, 16) = 0: a(2, 17) = 0: a(2, 18) = 0
266 B(2) = -(C(2) * ta + r(2) * ta) / rij(2)
267 a(3, 1) = 0: a(3, 2) = 2 * .00139 / rij(3): a(3, 3) = -1: a(3, 4) = 0
: a(3, 5) = 0: a(3, 6) = 396.41 / rij(3): a(3, 7) = 0
: a(3, 8) = 0: a(3, 9) = 0
268 a(3, 10) = 0: a(3, 11) = 0: a(3, 12) = 0: a(3, 13) = 0: a(3, 14) = 0
: a(3, 15) = 0: a(3, 16) = 0: a(3, 17) = 0: a(3, 18) = 0
269 B(3) = -(C(3) * ta + r(3) * ta) / rij(3)
270 a(4, 1) = 29.05 / rij(4): a(4, 2) = 0: a(4, 3) = 0: a(4, 4) = -1

```

$$\begin{aligned}
& : a(4, 5) = 1.71732 / rij(4): a(4, 6) = 0 & - \\
& : a(4, 7) = .1307 / rij(4): a(4, 8) = 0: a(4, 9) = 0 & - \\
271 & a(4, 10) = 0: a(4, 11) = 0: a(4, 12) = 0: a(4, 13) = 0: a(4, 14) = 0 & - \\
& : a(4, 15) = 0: a(4, 16) = 0: a(4, 17) = 0: a(4, 18) = 0 & - \\
272 & B(4) = -(C(4) * ta + r(4) * ta) / rij(4) & - \\
273 & a(5, 1) = 0: a(5, 2) = 227.255 / rij(5): a(5, 3) = 0 & - \\
& : a(5, 4) = 1.71732 / rij(5): a(5, 5) = -1 & - \\
& : a(5, 6) = .007537 / rij(5): a(5, 7) = 0 & - \\
& : a(5, 8) = (r(8) + C(8) + .1526) / rij(5): a(5, 9) = 0 & - \\
274 & a(5, 10) = 0: a(5, 11) = 0: a(5, 12) = 0: a(5, 13) = 0: a(5, 14) = 0 & - \\
& : a(5, 15) = 0: a(5, 16) = 0: a(5, 17) = 0: a(5, 18) = 0 & - \\
275 & B(5) = 0 & - \\
276 & a(6, 1) = 0: a(6, 2) = 0: a(6, 3) = 396.41 / rij(6): a(6, 4) = 0 & - \\
& : a(6, 5) = 2 * .007537 / rij(6): a(6, 6) = -1: a(6, 7) = 0 & - \\
& : a(6, 8) = 0: a(6, 9) = (r(6) + C(6) + .04379) / rij(6) & - \\
277 & a(6, 10) = 0: a(6, 11) = 0: a(6, 12) = 0: a(6, 13) = 0: a(6, 14) = 0 & - \\
& : a(6, 15) = 0: a(6, 16) = 0: a(6, 17) = 0: a(6, 18) = 0 & - \\
278 & B(6) = 0 & - \\
279 & a(7, 1) = 0: a(7, 2) = 0: a(7, 3) = 0: a(7, 4) = .1307 / rij(7) & - \\
& : a(7, 5) = 0: a(7, 6) = 0: a(7, 7) = -1: a(7, 8) = 2.704 / rij(7) & - \\
& : a(7, 9) = 0 & - \\
280 & a(7, 10) = .2241 / rij(7): a(7, 11) = 0: a(7, 12) = 0: a(7, 13) = 0 & - \\
& : a(7, 14) = 0: a(7, 15) = 0: a(7, 16) = 0: a(7, 17) = 0 & - \\
& : a(7, 18) = 0 & - \\
281 & B(7) = -(C(7) * ta + r(7) * ta) / rij(7) & - \\
282 & a(8, 1) = 0: a(8, 2) = 0: a(8, 3) = 0: a(8, 4) = 0 & - \\
& : a(8, 5) = (.1526 + r(8) + C(8)) / rij(8): a(8, 6) = 0 & - \\
& : a(8, 7) = 2.704 / rij(8): a(8, 8) = -1 & - \\
& : a(8, 9) = .21782 / rij(8) & - \\
283 & a(8, 10) = 0: a(8, 11) = 2.4407 / rij(8): a(8, 12) = 0: a(8, 13) = 0 & - \\
& : a(8, 14) = 0: a(8, 15) = 0: a(8, 16) = 0: a(8, 17) = 0: a(8, 18) = 0 & - \\
284 & B(8) = -(1 * CI * 320 * .0991) / rij(8) & - \\
285 & a(9, 1) = 0: a(9, 2) = 0: a(9, 3) = 0: a(9, 4) = 0: a(9, 5) = 0 & - \\
& : a(9, 6) = (r(9) + C(9) + .04379) / rij(9): a(9, 7) = 0 & - \\
& : a(9, 8) = 2 * .21782 / rij(9): a(9, 9) = -1 & - \\
286 & a(9, 10) = 0: a(9, 11) = 0: a(9, 12) = 4.4333 / rij(9): a(9, 13) = 0 & - \\
& : a(9, 14) = 0: a(9, 15) = 0: a(9, 16) = 0: a(9, 17) = 0 & - \\
& : a(9, 18) = 0 & - \\
287 & B(9) = -(1 * CI * 320 * 2 * .0991) / rij(9) & - \\
288 & a(10, 1) = 0: a(10, 2) = 0: a(10, 3) = 0: a(10, 4) = 0: a(10, 5) = 0 & - \\
& : a(10, 6) = 0: a(10, 7) = .2241 / rij(10): a(10, 8) = 0: a(10, 9) = 0 & - \\
289 & a(10, 10) = -1: a(10, 11) = 1.99247 / rij(10): a(10, 12) = 0 & - \\
& : a(10, 13) = .2241 / rij(10): a(10, 14) = 0: a(10, 15) = 0 & - \\
& : a(10, 16) = 0: a(10, 17) = 0: a(10, 18) = 0 & - \\
290 & B(10) = -(C(10) * ta + r(10) * ta) / rij(10) & - \\
291 & a(11, 1) = 0: a(11, 2) = 0: a(11, 3) = 0: a(11, 4) = 0: a(11, 5) = 0 & - \\
& : a(11, 6) = 0: a(11, 7) = 0: a(11, 8) = 0: a(11, 9) = 0 & - \\
292 & a(11, 10) = 1.99247 / rij(11): a(11, 11) = -1: a(11, 12) = .4233 / rij(11) & - \\
& : a(11, 13) = 0: a(11, 14) = 2.4407 / rij(11): a(11, 15) = 0 & - \\
& : a(11, 16) = 0: a(11, 17) = 0: a(11, 18) = 0 & - \\
293 & B(11) = -(1 * CI * 320 * .1982 + 2.4407 * t8) / rij(11) & - \\
294 & a(12, 1) = 0: a(12, 2) = 0: a(12, 3) = 0: a(12, 4) = 0: a(12, 5) = 0 & - \\
& : a(12, 6) = 0: a(12, 7) = 0: a(12, 8) = 0: a(12, 9) = 0 & - \\
295 & a(12, 10) = 0: a(12, 11) = 2 * .4233 / rij(12): a(12, 12) = -1 & - \\
& : a(12, 13) = 0: a(12, 14) = 0: a(12, 15) = 4.4333 / rij(12) & - \\
& : a(12, 16) = 0: a(12, 17) = 0: a(12, 18) = 0 & - \\
296 & B(12) = -(1 * 320 * 2 * .1982 * CI + 4.4333 * t9) / rij(12) & - \\
297 & a(13, 1) = 0: a(13, 2) = 0: a(13, 3) = 0: a(13, 4) = 0: a(13, 5) = 0 & - \\
& : a(13, 6) = 0: a(13, 7) = 0: a(13, 8) = 0: a(13, 9) = 0 & -
\end{aligned}$$

```

298 a(13, 10) = .2241 / rij(13): a(13, 11) = 0: a(13, 12) = 0: a(13, 13) = -1 _
   : a(13, 14) = 1.4687 / rij(13): a(13, 15) = 0
   : a(13, 16) = .4725 / rij(13): a(13, 17) = 0: a(13, 18) = 0 _
299 B(13) = -(C(13) * ta + r(13) * ta) / rij(13)
300 a(14, 1) = 0: a(14, 2) = 0: a(14, 3) = 0: a(14, 4) = 0: a(14, 5) = 0 _
   : a(14, 6) = 0: a(14, 7) = 0: a(14, 8) = 0: a(14, 9) = 0
   : a(14, 10) = 0: a(14, 11) = 2.4407 / rij(14): a(14, 12) = 0 _
   : a(14, 13) = 1.4687 / rij(14): a(14, 14) = -1
   : a(14, 15) = .2809 / rij(14): a(14, 16) = 0
   : a(14, 17) = 3.6963 / rij(14): a(14, 18) = 0
302 B(14) = -(1 * 320 * .0991 * CI) / rij(14)
303 a(15, 1) = 0: a(15, 2) = 0: a(15, 3) = 0: a(15, 4) = 0: a(15, 5) = 0 _
   : a(15, 6) = 0: a(15, 7) = 0: a(15, 8) = 0: a(15, 9) = 0
304 a(15, 10) = 0: a(15, 11) = 0: a(15, 12) = 4.4333 / rij(15): a(15, 13) = 0 _
   : a(15, 14) = 2 * .2809 / rij(15): a(15, 15) = -1: a(15, 16) = 0
   : a(15, 17) = 0: a(15, 18) = 6.4476 / rij(15)
305 B(15) = -(1 * 320 * 2 * .0991 * CI) / rij(15)
306 a(16, 1) = 0: a(16, 2) = 0: a(16, 3) = 0: a(16, 4) = 0: a(16, 5) = 0
   : a(16, 6) = 0: a(16, 7) = 0: a(16, 8) = 0: a(16, 9) = 0
308 a(16, 10) = 0: a(16, 11) = 0: a(16, 12) = 0: a(16, 13) = .4725 / rij(16) _
   : a(16, 14) = 0: a(16, 15) = 0: a(16, 16) = -1
   : a(16, 17) = .4725 / rij(16): a(16, 18) = 0
310 B(16) = 0
312 a(17, 1) = 0: a(17, 2) = 0: a(17, 3) = 0: a(17, 4) = 0: a(17, 5) = 0 _
   : a(17, 6) = 0: a(17, 7) = 0: a(17, 8) = 0: a(17, 9) = 0
314 a(17, 10) = 0: a(17, 11) = 0: a(17, 12) = 0: a(17, 13) = 0
   : a(17, 14) = 3.6963 / rij(17): a(17, 15) = 0
   : a(17, 16) = .4725 / rij(17): a(17, 17) = -1
   : a(17, 18) = .06925 / rij(17)
316 B(17) = 0
317 a(18, 1) = 0: a(18, 2) = 0: a(18, 3) = 0: a(18, 4) = 0: a(18, 5) = 0 _
   : a(18, 6) = 0: a(18, 7) = 0: a(18, 8) = 0: a(18, 9) = 0
318 a(18, 10) = 0: a(18, 11) = 0: a(18, 12) = 0: a(18, 13) = 0: a(18, 14) = 0 _
   : a(18, 15) = 6.4476 / rij(18): a(18, 16) = 0
   : a(18, 17) = 2 * .06925 / rij(18): a(18, 18) = -1
319 B(18) = 0
320 REM ##### método de eliminação de gauss-seidell #####
330 n1 = N - 1
340 FOR k = 1 TO n1
350 C = a(k, k)
360 k1 = k + 1
370 IF (ABS(C) - .000001) > 0 THEN GOTO 420
380 D = 0
390 PRINT "matriz singular": PRINT "no"; k
400 STOP
410 REM divide linha pelo coeficiente da diagonal
420 FOR j = k1 TO N
430 a(k, j) = a(k, j) / C
440 NEXT j
450 B(k) = B(k) / C
460 REM elimina a incógnita x(k) da linha i
470 FOR I = k1 TO N
480 C = a(I, k)
490 FOR j = k1 TO N
500 a(I, j) = a(I, j) - C * a(k, j)
510 NEXT j
520 B(I) = B(I) - C * B(k)
530 NEXT I
540 NEXT k

```

```

550 IF (ABS(a(N, N)) - .000001) <= 0 THEN GOTO 390
560 REM calculo das variáveis
570 B(N) = B(N) / a(N, N)
580 REM retrosubstituição
590 FOR L = 1 TO n1
600 k = N - L
610 k1 = k + 1
620 FOR j = k1 TO N
630 B(k) = B(k) - a(k, j) * B(j)
640 NEXT j: NEXT L
650 FOR k = 1 TO N
660 PRINT "B("; k; ")="; B(k)
670 NEXT k
680 REM valores do determinante
690 D = 1
700 FOR I = 1 TO N
710 D = D * a(I, I)
720 NEXT I
740 REM ##### calculo da energia perdida por radiação e Convecção #####
990 rad(1) = (2 * r(1) * 100 * (B(1) - ta))
1000 rad(2) = (2 * r(2) * 100 * (B(2) - ta))
1010 rad(3) = (r(3) * 100 * (B(3) - ta))
1020 rad(4) = (2 * r(4) * 100 * (B(4) - ta))
1030 rad(7) = (2 * r(7) * 102.26 * (B(7) - ta))
1040 rad(10) = (2 * r(10) * 102.26 * (B(10) - ta))
1045 rad(13) = (2 * r(13) * 102.26 * (B(13) - ta))
1050 conv(1) = 2 * C(1) * 100 * (B(1) - ta)
1060 conv(2) = 2 * C(2) * 100 * (B(2) - ta)
1070 conv(3) = C(3) * 100 * (B(3) - ta)
1080 conv(4) = 2 * C(4) * 100 * (B(4) - ta)
1090 conv(7) = 2 * C(7) * 102.26 * (B(7) - ta)
1100 conv(10) = 2 * C(10) * 102.26 * (B(10) - ta)
1105 conv(13) = 2 * C(13) * 102.26 * (B(13) - ta)
1110 FOR I = 1 TO 7
1120 L = I
1130 IF I = 5 THEN L = I + 2
1140 IF I = 6 THEN L = I + 4
1145 IF I = 7 THEN L = I + 6
1150 convt = convt + conv(L)
1160 radt = radt + rad(L)
1170 NEXT I
1175 REM ----- diferença máxima de 5 watts entre energias (gauss seidel)--
1180 cont = cont + 1
1190 qt(cont) = convt + radt
1210 IF ABS(qt(cont) - qt(cont - 1)) >= 5 THEN GOTO 95
1215 REM ----- diferença de 1% entre temperaturas -----
1255 IF ABS(T1 - B(1)) > .01 OR ABS(T2 - B(2)) > .01 THEN liga = 1
1257 IF ABS(T3 - B(3)) > .01 OR ABS(T4 - B(4)) > .01 THEN liga = 1
1258 IF ABS(T7 - B(7)) > .01 OR ABS(T10 - B(10)) > .01 THEN liga = 1
1259 IF ABS(T13 - B(13)) > .01 THEN liga = 1
1260 IF liga = 1 THEN T1 = B(1): T2 = B(2): T3 = B(3): T4 = B(4): T7 = B(7)
: T10 = B(10): T13 = B(13): liga = 0: GOTO 95
1261 REM ##### impressão dos resultados #####
1262 CLS : PRINT T1$; "HORAS": PRINT
1263 FOR I = 1 TO N
1270 PRINT "T("; I; ")="; B(I)
1280 NEXT I: PRINT
1282 OPEN "R", #1, "VET1"
1284 FIELD #1, 8 AS TEMPS

```

```
|1286 FOR L = 1 TO N
|1288 LSET TEMP$ = MKD$(B(L))
|1290 PUT #1, L: NEXT L
|1292 CLOSE #1
|1295 HS = (1 - REFLVIDRO) * ENERGIA * 100 * 2.26
|1298 ENERCIM = CI * 100 * 2.26 * .7
|1300 PRINT "ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA"; HS
|1305 PRINT "ENERGIA TOTAL PERDIDA :"; qt(cont)
|1308 PRINT "ENERGIA GERADA PELO CIMENTO"; ENERCIM
|1310 END
```

ANEXO G
RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE HELIOCÂMARAS
(DIA TÍPICO DE VERÃO).

Resultado dos cálculos do programa de heliocâmaras (anexo F), para um dia típico de Verão.
Temperaturas em °C; Energia em Watts.

07:00 horas

T(1)= 24.2	T(2)= 24.6	T(3)= 24.2
T(4)= 24.2	T(5)= 24.6	T(6)= 24.2
T(7)= 24.2	T(8)= 24.4	T(9)= 24.5
T(10)= 24.2	T(11)= 24.5	T(12)= 25.1
T(13)= 24.2	T(14)= 24.4	T(15)= 25.0
T(16)= 24.3	T(17)= 24.4	T(18)= 25.0

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 28145.59
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 2037.879
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 0

08:00 horas

T(1)= 26.3	T(2)= 27.3	T(3)= 26.4
T(4)= 26.3	T(5)= 27.3	T(6)= 26.4
T(7)= 26.4	T(8)= 26.8	T(9)= 26.9
T(10)= 26.3	T(11)= 27.0	T(12)= 28.3
T(13)= 26.3	T(14)= 26.8	T(15)= 28.1
T(16)= 26.6	T(17)= 26.8	T(18)= 28.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 61881.74
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 5008.579
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 0

09:00 horas

T(1)= 28.3	T(2)= 29.8	T(3)= 29.0
T(4)= 28.3	T(5)= 29.8	T(6)= 29.1
T(7)= 28.4	T(8)= 30.3	T(9)= 30.6
T(10)= 28.7	T(11)= 31.4	T(12)= 35.0
T(13)= 28.8	T(14)= 31.5	T(15)= 35.8
T(16)= 30.1	T(17)= 31.4	T(18)= 35.7

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 95425.11
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 11638.09
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 1280

10:00 horas

T(1)= 29.6	T(2)= 31.6	T(3)= 30.6
T(4)= 29.6	T(5)= 31.5	T(6)= 30.7
T(7)= 29.8	T(8)= 32.4	T(9)= 32.6
T(10)= 30.1	T(11)= 34.0	T(12)= 39.0
T(13)= 30.3	T(14)= 34.1	T(15)= 40.2
T(16)= 32.1	T(17)= 34.0	T(18)= 40.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 122028.5
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 15999.2
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 1920

11:00 horas

T(1)= 30.9	T(2)= 33.3	T(3)= 32.3
T(4)= 30.9	T(5)= 33.3	T(6)= 32.4
T(7)= 31.1	T(8)= 34.5	T(9)= 34.6
T(10)= 31.6	T(11)= 36.6	T(12)= 43.0
T(13)= 31.8	T(14)= 36.8	T(15)= 44.6
T(16)= 34.2	T(17)= 36.6	T(18)= 44.5

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 150174.1
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 20269
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 2560

12:00 horas

T(1)= 32.0	T(2)= 34.6	T(3)= 34.3
T(4)= 33.0	T(5)= 34.6	T(6)= 34.5
T(7)= 32.2	T(8)= 37.3	T(9)= 37.7
T(10)= 33.3	T(11)= 40.8	T(12)= 49.9
T(13)= 33.7	T(14)= 41.5	T(15)= 53.1
T(16)= 37.5	T(17)= 41.3	T(18)= 52.8

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 160776.8
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 25718.18
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 4480

13:00 horas

T(1)= 32.9	T(2)= 35.6	T(3)= 36.3
T(4)= 32.9	T(5)= 35.6	T(6)= 36.6
T(7)= 33.2	T(8)= 39.9	T(9)= 40.6
T(10)= 34.8	T(11)= 44.7	T(12)= 56.3
T(13)= 35.4	T(14)= 46.0	T(15)= 61.2
T(16)= 40.5	T(17)= 45.7	T(18)= 60.8

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 165403.5
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 30205.75
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 6400

14:00 horas

T(1)= 33.7	T(2)= 36.1	T(3)= 38.2
T(4)= 33.7	T(5)= 36.2	T(6)= 38.5
T(7)= 33.9	T(8)= 42.8	T(9)= 44.2
T(10)= 36.3	T(11)= 49.2	T(12)= 63.8
T(13)= 37.2	T(14)= 51.3	T(15)= 70.8
T(16)= 44.0	T(17)= 50.8	T(18)= 70.4

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 150752.4
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 34708.61
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 8960

15:00 horas

T(1)= 33.9	T(2)= 36.0	T(3)= 38.8
T(4)= 33.9	T(5)= 36.0	T(6)= 39.2

T(7)= 34.1	T(8)= 44.0	T(9)= 46.1
T(10)= 36.9	T(11)= 51.1	T(12)= 66.9
T(13)= 37.8	T(14)= 53.6	T(15)= 75.0
T(16)= 45.4	T(17)= 53.0	T(18)= 74.6

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 128004.6
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 35347.76
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 10240

16:00 horas

T(1)= 33.8	T(2)= 35.4	T(3)= 40.8
T(4)= 33.8	T(5)= 35.5	T(6)= 41.3
T(7)= 34.0	T(8)= 47.3	T(9)= 51.5
T(10)= 38.3	T(11)= 56.7	T(12)= 76.7
T(13)= 39.7	T(14)= 60.5	T(15)= 88.1
T(16)= 49.7	T(17)= 59.7	T(18)= 87.5

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 97352.89
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 39685.88
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 14080

17:00 horas

T(1)= 33.5	T(2)= 34.5	T(3)= 42.3
T(4)= 33.5	T(5)= 34.6	T(6)= 42.8
T(7)= 33.7	T(8)= 49.7	T(9)= 56.7
T(10)= 39.4	T(11)= 60.3	T(12)= 82.5
T(13)= 41.4	T(14)= 65.1	T(15)= 96.3
T(16)= 52.8	T(17)= 64.3	T(18)= 95.6

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 61303.4
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 40082.91
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 16640

18:00 horas

T(1)= 32.1	T(2)= 32.5	T(3)= 39.6
T(4)= 32.1	T(5)= 32.6	T(6)= 40.1
T(7)= 32.2	T(8)= 49.8	T(9)= 59.2
T(10)= 37.6	T(11)= 60.0	T(12)= 83.5
T(13)= 39.4	T(14)= 65.1	T(15)= 98.3
T(16)= 51.8	T(17)= 64.1	T(18)= 97.6

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 27181.7
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 39253.84
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 17920

19:00 horas

T(1)= 29.6	T(2)= 29.6	T(3)= 35.3
T(4)= 29.6	T(5)= 29.7	T(6)= 35.6
T(7)= 29.7	T(8)= 47.9	T(9)= 63.0
T(10)= 34.8	T(11)= 56.2	T(12)= 78.4
T(13)= 36.5	T(14)= 61.1	T(15)= 92.8
T(16)= 48.4	T(17)= 60.2	T(18)= 92.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 4048.338
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 32303.41
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 17280

20:00 horas

T(1)= 27.7	T(2)= 27.7	T(3)= 31.1
T(4)= 27.7	T(5)= 27.7	T(6)= 31.3
T(7)= 27.7	T(8)= 46.6	T(9)= 70.5
T(10)= 32.6	T(11)= 53.2	T(12)= 74.6
T(13)= 34.3	T(14)= 58.0	T(15)= 88.4
T(16)= 45.7	T(17)= 57.1	T(18)= 87.8

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 192.778
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 25641.5
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 16640

21:00 horas

T(1)= 27.0	T(2)= 27.0	T(3)= 29.9
T(4)= 27.0	T(5)= 27.0	T(6)= 30.1
T(7)= 27.0	T(8)= 44.4	T(9)= 66.4
T(10)= 31.2	T(11)= 50.4	T(12)= 70.2
T(13)= 32.7	T(14)= 54.7	T(15)= 83.0
T(16)= 43.3	T(17)= 53.9	T(18)= 82.4

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 192.778
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 23797.66
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 15360

22:00 horas

T(1)= 26.3	T(2)= 26.3	T(3)= 29.2
T(4)= 26.3	T(5)= 26.3	T(6)= 29.4
T(7)= 26.3	T(8)= 42.3	T(9)= 62.6
T(10)= 30.5	T(11)= 47.9	T(12)= 66.0
T(13)= 31.9	T(14)= 51.9	T(15)= 77.7
T(16)= 41.6	T(17)= 51.2	T(18)= 77.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 192.778
 ENERGIA TOTAL PERDIDA : 21668.15
 ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 14080

ANEXO H
RESULTADO DOS CÁLCULOS DO PROGRAMA DE HELIOCÂMARAS
(DIA TÍPICO DE INVERNO).

Resultado dos cálculos do programa de heliocâmaras (anexo F), para um dia típico de inverno.

Temperaturas em

07:00 horas

T(1)= 7.3	T(2)= 7.3	T(3)= 7.3
T(4)= 7.3	T(5)= 7.3	T(6)= 7.3
T(7)= 7.3	T(8)= 7.3	T(9)= 7.3
T(10)= 7.3	T(11)= 7.3	T(12)= 7.3
T(13)= 7.3	T(14)= 7.3	T(15)= 7.3
T(16)= 7.3	T(17)= 7.3	T(18)= 7.3

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 963.89

ENERGIA TOTAL PERDIDA : 142.6318

ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 0

08:00 horas

T(1)= 7.8	T(2)= 8.1	T(3)= 7.8
T(4)= 7.8	T(5)= 8.1	T(6)= 7.8
T(7)= 7.8	T(8)= 8.0	T(9)= 8.0
T(10)= 7.8	T(11)= 8.0	T(12)= 8.4
T(13)= 7.8	T(14)= 8.0	T(15)= 8.4
T(16)= 7.9	T(17)= 8.0	T(18)= 8.4

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 17350.02

ENERGIA TOTAL PERDIDA : 1438.026

ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 0

09:00 horas

T(1)= 8.8	T(2)= 9.5	T(3)= 9.4
T(4)= 8.8	T(5)= 9.5	T(6)= 9.5
T(7)= 8.9	T(8)= 10.4	T(9)= 11.2
T(10)= 9.2	T(11)= 11.3	T(12)= 13.8
T(13)= 9.4	T(14)= 11.5	T(15)= 14.8
T(16)= 10.4	T(17)= 11.5	T(18)= 14.7

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 41640.05

ENERGIA TOTAL PERDIDA : 6268.73

ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 1280

10:00 horas

T(1)= 10.2	T(2)= 11.2	T(3)= 11.0
T(4)= 10.2	T(5)= 11.2	T(6)= 11.1
T(7)= 10.3	T(8)= 12.5	T(9)= 13.4
T(10)= 10.7	T(11)= 13.9	T(12)= 17.7
T(13)= 10.9	T(14)= 14.2	T(15)= 19.1
T(16)= 12.5	T(17)= 14.1	T(18)= 19.0

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 64580.63

ENERGIA TOTAL PERDIDA : 10264.84

ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 1920

11:00 horas

T(1)= 11.3	T(2)= 12.7	T(3)= 12.5
T(4)= 11.3	T(5)= 12.7	T(6)= 12.6
T(7)= 11.5	T(8)= 14.4	T(9)= 14.4
T(10)= 12.1	T(11)= 16.2	T(12)= 21.2
T(13)= 12.3	T(14)= 16.7	T(15)= 296.1
T(16)= 14.4	T(17)= 16.5	T(18)= 23.0

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 82316.2
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 13410.24
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 2560

12:00 horas

T(1)= 12.4	T(2)= 13.9	T(3)= 14.4
T(4)= 12.5	T(5)= 13.9	T(6)= 14.5
T(7)= 12.6	T(8)= 17.3	T(9)= 18.8
T(10)= 13.7	T(11)= 20.3	T(12)= 28.0
T(13)= 14.1	T(14)= 21.3	T(15)= 31.4
T(16)= 17.6	T(17)= 21.1	T(18)= 31.2

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 89063.44
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 18557.22
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 4480

13:00 horas

T(1)= 13.0	T(2)= 14.5	T(3)= 15.6
T(4)= 13.0	T(5)= 14.5	T(6)= 15.8
T(7)= 13.2	T(8)= 19.7	T(9)= 21.7
T(10)= 14.7	T(11)= 23.8	T(12)= 33.9
T(13)= 15.3	T(14)= 25.3	T(15)= 39.0
T(16)= 20.14	T(17)= 24.9	T(18)= 38.7

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 87713.99
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 23012.69
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 6400

14:00 horas

T(1)= 13.2	T(2)= 14.4	T(3)= 16.8
T(4)= 13.2	T(5)= 14.5	T(6)= 17.1
T(7)= 13.3	T(8)= 22.2	T(9)= 25.4
T(10)= 15.6	T(11)= 27.7	T(12)= 40.9
T(13)= 16.4	T(14)= 30.0	T(15)= 48.1
T(16)= 22.9	T(17)= 29.5	T(18)= 47.7

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 75954.53
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 27135.39
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 8960

15:00 horas

T(1)= 286.3901	T(2)= 14.3	T(3)= 17.4
T(4)= 13.3	T(5)= 14.3	T(6)= 17.7
T(7)= 13.5	T(8)= 23.5	T(9)= 27.7
T(10)= 16.1	T(11)= 29.6	T(12)= 44.1
T(13)= 17.1	T(14)= 32.3	T(15)= 52.4
T(16)= 14.4	T(17)= 31.7	T(18)= 52.0

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 58218.96
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 27704.41
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 10240

16:00 horas

T(1)= 13.1	T(2)= 13.6	T(3)= 18.4
T(4)= 13.1	T(5)= 13.7	T(6)= 18.8
T(7)= 13.2	T(8)= 27.1	T(9)= 34.2
T(10)= 17.0	T(11)= 34.9	T(12)= 53.8
T(13)= 18.3	T(14)= 38.8	T(15)= 65.4
T(16)= 28.2	T(17)= 38.0	T(18)= 64.8

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 34314.48
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 32598.44
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 14080

17:00 horas

T(1)= 12.6	T(2)= 12.8	T(3)= 18.7
T(4)= 12.6	T(5)= 12.9	T(6)= 19.1
T(7)= 12.7	T(8)= 29.8	T(9)= 41.1
T(10)= 17.6	T(11)= 38.3	T(12)= 60.0
T(13)= 19.3	T(14)= 43.0	T(15)= 73.7
T(16)= 30.7	T(17)= 42.2	T(18)= 73.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 13301.68
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 33807.63
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 16640

18:00 horas

T(1)= 11.5	T(2)= 11.5	T(3)= 16.2
T(4)= 11.5	T(5)= 11.5	T(6)= 16.5
T(7)= 11.5	T(8)= 31.5	T(9)= 52.8
T(10)= 16.9	T(11)= 39.0	T(12)= 62.0
T(13)= 18.8	T(14)= 44.2	T(15)= 76.9
T(16)= 31.0	T(17)= 43.3	T(18)= 76.2

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 963.89
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 29955.72
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 17920

19:00 horas

T(1)= 10.6	T(2)= 10.5	T(3)= 11.8
T(4)= 10.6	T(5)= 10.6	T(6)= 11.9
T(7)= 10.6	T(8)= 11.7	T(9)= 68.6

T(10)= 16.3	T(11)= 37.4	T(12)= 59.4
T(13)= 18.3	T(14)= 42.6	T(15)= 73.8
T(16)= 30.0	T(17)= 41.7	T(18)= 73.1

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 0
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 19859.51
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 17280

20:00 horas

T(1)= 10.2	T(2)= 10.1	T(3)= 11.2
T(4)= 10.2	T(5)= 10.2	T(6)= 11.3
T(7)= 10.2	T(8)= 28.9	T(9)= 61.8
T(10)= 15.2	T(11)= 34.0	T(12)= 53.6
T(13)= 16.9	T(14)= 38.6	T(15)= 66.4
T(16)= 27.3	T(17)= 37.7	T(18)= 65.8

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 0
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 17678.79
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 15360

21:00 horas

T(1)= 9.8	T(2)= 9.7	T(3)= 10.7
T(4)= 9.8	T(5)= 9.8	T(6)= 10.8
T(7)= 9.8	T(8)= 26.9	T(9)= 57.1
T(10)= 14.3	T(11)= 31.5	T(12)= 49.5
T(13)= 15.8	T(14)= 35.7	T(15)= 61.2
T(16)= 15.4	T(17)= 34.9	T(18)= 60.7

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 0
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 16254.92
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 14080

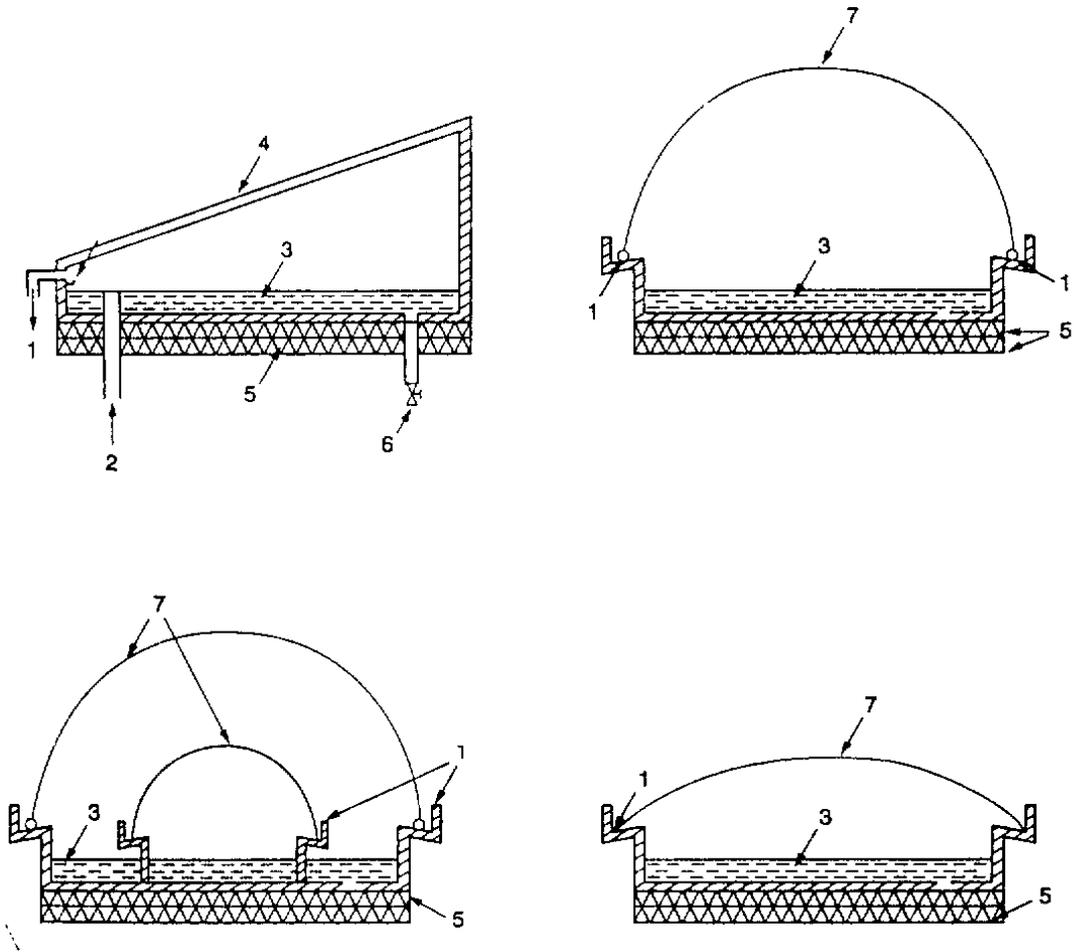
22:00 horas

T(1)= 9.6	T(2)= 9.5	T(3)= 10.5
T(4)= 9.6	T(5)= 9.6	T(6)= 10.6
T(7)= 9.6	T(8)= 26.0	T(9)= 54.8
T(10)= 14.1	T(11)= 30.5	T(12)= 47.5
T(13)= 15.6	T(14)= 34.5	T(15)= 58.8
T(16)= 24.7	T(17)= 33.8	T(18)= 58.2

ENERGIA INCIDENTE NA CAMARA 0
ENERGIA TOTAL PERDIDA : 15435.4
ENERGIA GERADA PELO CIMENTO 13440

ANEXO I
MODELOS DE HELIOCÂMARAS

Modelos de Destiladores solares, que poderão servir de base em futuras adaptações para heliocâmaras bem como suas avaliações.



1- entrada de água; 2 - dreno; 3 - nível de água; 4 - cobertura plana;
5 - estrutura; 6 - saída de água; 7 - cobertura em arco.

