

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação computacional
utilizando o método da admitância**

Luciana da Rosa Pinto

**Campinas - SP
2002**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação computacional
utilizando o método da admitância**

Luciana da Rosa Pinto

Orientador: Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki

Tese de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração de Edificações.

Campinas - SP

2002

UNIDADE BC
Nº CHAMADA: P658d
T/UNICAMP
V. _____ EX. _____
TOMBO: BOCL 77164
PROC. 16P-129-08
C. _____ D. X
PREÇO 11,00
DATA 18-06-08
BIB-ID: 437651

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P658d Pinto, Luciana da Rosa
Desempenho térmico de edificações: um programa de
simulação computacional utilizando o método da
admitância / Luciana da Rosa Pinto.--Campinas, SP:
[s.n.], 2002.

Orientador: Lucila Chebel Labaki.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Conforto térmico. 2. Simulação (Computadores).
I. Labaki, Lucila Chebel. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Thermal performance of buildings: application of the admittance
procedure in a simulation computer program

Palavras-chave em Inglês: Thermal comfort e Computer simulation

Área de concentração: Edificações

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Stelamaris Rolla Bertoli e Mauricio Roriz

Data da defesa: 22/02/2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação
computacional utilizando o método da admitância.**

Luciana da Rosa Pinto

Tese de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientador/UNICAMP


Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
UNICAMP


Prof. Dr. Maurício Roriz
UFSCar

Campinas, 22 de fevereiro de 2002.

200812003

Dedico este trabalho aos meus pais, Regina e Luís, pela oportunidade que me deram de estar aqui e agora, além de suas presenças, silenciosas ou não, em todos os momentos da minha vida, sendo sempre os maiores incentivadores ao meu aprimoramento.

Agradecimentos:

À professora Lucila Chebel Labaki, pela orientação, paciência e persistência para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Adolpho Hengeltraub pela dedicação em desenvolver os cálculos, fundamentais para a conclusão deste texto.

À grande amiga Iracema Brito Sucupira, pois foi por sua palavra, sua ajuda e seu exemplo em todos os momentos que tive o incentivo necessário.

À Walter Luiz Conrad, por seu carinho e imensa valorização e participação em todo o meu processo de elaboração deste texto, além das intermináveis conversas ao longo deste período.

A todos os funcionários, professores e colegas da Universidade Estadual de Campinas.

A todos os meus amigos que, de certa forma, estiveram presentes durante meus estudos e souberam incentivar-me quando precisei.

Índice analítico

Índice de figuras	xi
Índice de tabelas.....	xiv
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvii
1. Introdução	1
2. Objetivo	6
3. Conceitos fundamentais.....	7
3.1. Trocas de calor em regime permanente.....	7
3.2. Trocas de calor em regime variável	8
3.3. Temperatura sol-ar	10
4. Modelos de previsão das temperaturas internas.....	12
4.1. Modelo da constante de tempo térmica	12
4.2. Análise do circuito térmico	14
4.3. O modelo de matrizes	16
4.4. Método da análise harmônica para cálculo de temperatura superficial interna.....	19
4.5. Modelo das diferenças finitas.....	21
4.6. O modelo da admitância	22
5. Programas de simulação do desempenho térmico de edificações	24
5.1. O programa THEDES	24
5.2. O programa Arquitrop	27
5.2.1. Descrição do programa	27
A. Projeto – Avaliação e Recomendações	28
B. Módulo 2 – Diversas rotinas opcionais	31
5.2.2 Fluxograma.....	34
5.3. O programa NBSLD	38
5.4. O programa Casamo-clim	39
5.5. O programa Archipack	39
6. Um estudo comparativo entre os programas de simulação do desempenho térmico de edificações.....	41
6.1. Estudos para um projeto padrão.....	41
6.1.1. Quanto à temperatura:.....	43

6.1.2. Quanto ao fluxo de calor	43
6.1.3. Interface programa – usuário	44
6.1.4. Análise do estudo comparativo	45
6.1.5 Análise de sensibilidade.....	46
6.1.6. Análise do estudo comparativo	49
6.2. Estudo para uma habitação popular padrão	50
7. O modelo da admitância	54
7.1. Considerações teóricas	54
7.2. Admitância.....	57
7.3. Fator Decremento.....	59
7.4. Fator de superfície.....	59
7.5. O caso especial de divisões internas	60
7.6. Aplicação do modelo da admitância.....	63
7.6.1. O uso dos fatores para frequência fundamental.....	63
7.6.2. Condições de ocupação.....	64
7.7. Uso do modelo.....	65
7.7.1. Variações na temperatura interna do ambiente.....	65
7.7.2. Ganhos cíclicos no ponto ambiental.....	66
A. Através de superfícies externas opacas	66
B. A condução cíclica através do vidro	67
C. Ganhos solares através do vidro	68
D. Ganhos casuais.....	69
7.8. Vantagens do método.....	72
8. Cálculo dos valores de admitância.....	73
8.1. A admitância Y.....	75
8.2. Fator Decremento f.....	75
8.3. Exemplo de cálculo.....	75
9. Cálculos realizados segundo o método da admitância	76
9.1 Cálculos para o fluxo de calor total	76
9.1.1 Cálculo para a temperatura interna	76
9.1.2 Cálculo dos ganhos térmicos instantâneos	77
9.1.3 Cálculo dos fatores de correção.....	77
9.1.4 Flutuação instantânea do fluxo térmico através das vedações.....	79

9.1.5	Cálculo da flutuação do fluxo devido à ventilação	82
9.1.6	Taxas médias dos ganhos solares através das vedações:.....	82
A.	Para superfícies opacas:.....	82
B.	Para superfícies transparentes:	82
9.2.	Cálculo da intensidade de radiação nas superfícies horizontais (cobertura)	83
9.3.	Cálculo da intensidade de radiação para superfícies verticais	86
9.3.1	Média horária da radiação solar direta incidente numa superfície vertical:.....	86
9.3.2	Média horária da radiação solar difusa incidente em uma superfície vertical:	87
9.3.3	Média horária da radiação solar refletida pelo solo e incidente sobre uma superfície vertical:	87
9.3.4	Radiação solar global (média diária) em uma superfície vertical:.....	87
10.	Elaboração do simulador de cálculos	88
10.1.	Instruções	88
10.2.	Dados de Projeto	89
10.3.	Resultados finais.....	107
11.	Estudo comparativo.....	112
11.1	Modelo para realização dos cálculos	112
11.1.1	Modelo Analisado.....	112
12	Referências Bibliográficas	118
13.	Anexos	124
Anexo 1:	Definições e Propriedades Térmicas dos Materiais de Construção	125
	Fluxo de calor ou taxa de transmissão de calor:	125
	Densidade de fluxo de calor.....	125
	Condutividade térmica de um material	125
	Resistência térmica de elementos e componentes	126
	Resistência superficial interna	126
	Coeficiente de condutância superficial interna	126
	Resistência superficial externa.....	126
	Coeficiente de condutância superficial externa	127
	Resistência térmica total	127
	Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor.....	127
	Capacidade térmica de um corpo	127
	Calor específico de um material.....	127

Capacidade térmica de componentes.....	128
Densidade de um material	128
Difusividade térmica de um material	128
Atraso térmico de um componente	128
Fator de calor solar	129
Emissividade.....	129
Absortância à radiação solar.....	129
Refletância à radiação solar.....	129
Transmitância à radiação solar	130
Anexo 2: Valores da admitância para alguns componentes.....	131
Anexo 3 – Desenvolvimento de cálculo para admitância de componentes.....	135
A. Cálculo de A	135
B. Cálculo de B	137
C. Cálculo de D:	138
D. Parâmetros para cálculo da admitância	139
E. Exemplo prático:.....	140
E.1. Cálculos iniciais:.....	141
1. Resistência da camada:.....	141
2. Difusividade térmica:.....	141
3. Cálculo de ϕ	141
4. Cálculo de A.....	142
5. Cálculo de B.....	142
6. Cálculo de D:.....	143
7. Parâmetros para cálculo da admitância	143
8. Cálculo de K:.....	144
E.2. Cálculo do valor da admitância para materiais heterogêneos.	145
1. Cálculo de ϕ	145
2. Cálculo de A.....	145
3. Cálculo de B.....	146
4. Cálculo de D:.....	146
5. Cálculo de E, F, G e H	146

6. Cálculos de ReJ , ImJ , ReK , ImK , ReL , ImL , ReM , ImM , $ReAD$, $ImAD$ e AD ..	148
E.3. Exemplo numérico para componentes heterogêneos:	148
a) Cálculos para a camada 1:.....	149
b) Cálculos para a camada 2:.....	151
Anexo 4 – tabela com valores de fator solar.....	155
Anexo 5 – Planilha “UniClim”.	156

Índice de figuras

Figura 1: separação entre duas superfícies	7
Figura 2: regime variável onde ambas as temperaturas variam com o tempo	8
Figura 3: regime variável onde uma das temperaturas permanece constante	9
Figura 4: regime variável onde uma das temperaturas varia em regime periódico	9
Figura 5: desenho explicativo da incidência de radiação solar.	10
Figura 6 – diagrama de fluxo de dados para o programa Thedes	26
Figura 7 – Fluxograma do Módulo 1	35
Figura 8 – Fluxograma do BanClim.	36
Figura 9 – Fluxograma do BancMat.....	37
Figura 10: Comparação entre valores obtidos para t_{ext} – Caso 1.	52
Figura 11: Comparação entre valores obtidos para t_{int} – Caso 2.	52
Figura 12: Comparação dos dados obtidos para t_{ext} – Caso 2.....	53
Figura 13: Comparação dos dados obtidos para t_{int} – Caso 2.	53
Figura 14: energia pode penetrar no sistema pelos pontos A e B e pelas superfícies C e D.	55
Figura 15: Variação cíclica da temperatura em A induz um ciclo cuja amplitude se reduz com a distância através do material.	56
Figura 16: Admitância e retardamento x espessura e densidade para ciclos de 24 horas em superfícies externas.....	58
Figura 17: o efeito da freqüência na admitância e atrasos de tempo para superfícies externas	58
Figura 18: fator de superfície x espessura e densidade para ciclos de 24 horas em superfícies externas.....	60
Figura 19: para divisões internas: (a) ciclos de energia como um resultado da diferença de duas temperaturas ambientais; (b) ciclos de energia como um resultado das entradas de energia.....	61
Figura 20: admitância x espessura e densidade para superfícies internas (ciclo de 24 horas)	62

Figura 21: comparação do método da admitância e da análise de Fourier para radiação solar incidindo em uma estrutura pesada.....	64
Figura 22: Planilha "Instruções".....	89
Figura 23: nome do projeto.....	89
Figura 24: cidade do projeto.....	90
Figura 25: dados do projeto.....	90
Figura 26: mensagem de informação da data de projeto.....	91
Figura 27: mensagem para entrada das dimensões do ambiente.....	92
Figura 28: comprimento da parede.....	92
Figura 29: largura da parede.....	93
Figura 30: pé direito.....	93
Figura 31: mensagem para informar a orientação das fachadas.....	94
Figura 32: definição para fachada 1.....	94
Figura 33: orientação da fachada 1.....	95
Figura 34: definição de fachadas.....	95
Figura 35: solicitação de material das fachadas.....	96
Figura 36: solicitação de cor das fachadas.....	96
Figura 37: solicitação do material da cobertura.....	97
Figura 38: solicitação da cor da cobertura.....	97
Figura 39: mensagem para o tipo de piso.....	98
Figura 40: escolha do piso.....	98
Figura 41: solicitação para entrada dos dados de aberturas.....	99
Figura 42: localização de tela.....	99
Figura 43: verificação da existência de janelas.....	100
Figura 44: entrada da espessura do vidro.....	100
Figura 45: verificação da existência de janelas na fachada 1.....	101
Figura 46: comprimento da janela.....	101
Figura 47: altura da janela.....	102
Figura 48: verificação da existência de portas na fachada 1.....	102
Figura 49: verificação da existência de janelas na fachada 4.....	103
Figura 50: verificação da existência de portas na fachada 4.....	103

Figura 51: largura da porta.	104
Figura 52: altura da porta.....	104
Figura 53: início do horário de funcionamento das aberturas.....	105
Figura 54: fim do horário de funcionamento das aberturas.....	105
Figura 55: material do vidro.	106
Figura 56: informação para cálculo dos valores.	106
Figura 57: localização do botão "Calcular Valores".	107
Figura 58: menu de opções para os resultados finais.	107
Figura 59: resultados da incidência de radiação solar.....	108
Figura 60: resultado do fluxo de calor por ventilação.	109
Figura 61: resultados do fluxo de calor transmitido pelas superfícies envidraçadas.	109
Figura 62: resultados do fluxo de calor transmitido por vedações opacas.....	110
Figura 63: temperaturas finais.	110
Figura 64: gráficos com resultados finais.....	111
Figura 65: planta do modelo estudado.	113
Figura 66: gráfico comparativo de temperaturas internas.....	117

Índice de tabelas

Tabela 1: Valores para a constante de tempo térmica.	14
Tabela 2: Resultados da simulação obtidos para os programas, nos dois casos.....	51
Tabela 3: valores horários para o fator multiplicador B(h).	67
Tabela 4: Produção de calor, em relação à área superficial do corpo humano (W/m^2) para alguns tipos de atividades	70
Tabela 5: potências aproximadas de aparelhos eletrodomésticos.	71
Tabela 6: fator de ponderação ω	78
Tabela 7: fator ω para as fórmulas.....	79
Tabela 8: classificação da construção segundo o fator de resposta.....	81
Tabela 9: Cálculo de FS através do fator de resposta.....	81
Tabela 10: Valores das constantes a e b referentes a algumas estações meteorológicas do estado de São Paulo.	85
Tabela 11: características dos materiais das paredes.....	113
Tabela 12: valores obtidos.....	114
Tabela 13: características dos materiais da cobertura.....	114
Tabela 14: valores obtidos para a cobertura.....	115
Tabela 15: características das superfícies envidraçadas.....	115
Tabela 16: valores finais de temperaturas internas para os dois simuladores.....	116
Tabela A.1: valores de admitâncias.....	131
Tabela A.2: valores comparativos entre componentes.....	145
Tabela A.3: valores de componentes	149
Tabela A.4: valores obtidos para admitância.....	154
Tabela A.5: fator de ganho solar para os vidros	155

Resumo

Pinto, Luciana da Rosa. Desempenho térmico de edificações: um programa de simulação computacional utilizando o método da admitância. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 156 p. Tese de Mestrado.

O conhecimento do comportamento térmico de uma edificação é necessário, não só para que seja possível planejar e obter ambientes confortáveis termicamente, como para minimizar o consumo de energia, principalmente para refrigeração, em climas quentes como o do Brasil. Na fase de projeto, ferramentas de simulação computacional são de grande valia para esse fim. Porém as ferramentas disponíveis em geral são de difícil utilização, necessitando de um treinamento especial para seu uso. O objetivo desse trabalho foi o de produzir uma ferramenta de simulação de desempenho térmico de edificações, de fácil utilização pelos projetistas. São analisados os conceitos envolvidos nas trocas térmicas entre a edificação e o ambiente, buscando um método simples para a avaliação de seu desempenho térmico. Entre vários modelos analisados, adotou-se o método da admitância, cuja principal vantagem é que a previsão das temperaturas e fluxos de energia aceitáveis é obtida através de um procedimento simples, onde os três parâmetros envolvidos: admitância, fator decremento e fator de superfície dão uma indicação qualitativa do provável comportamento das construções. Com base neste método foi desenvolvida uma ferramenta de simulação computacional que permite ao projetista, ainda na fase de concepção, utilizar-

se de uma planilha eletrônica, para simular e comparar as várias alternativas de projeto e avaliar o correspondente desempenho térmico da edificação em estudo.

Palavras chave: desempenho térmico, método da admitância, ferramenta de simulação computacional.

Abstract

Pinto, Luciana da Rosa. Thermal performance of buildings: application of the admittance procedure in a simulation computer program.

It is well known the importance of a good knowledge of the thermal performance of a building, allowing the planning and design of thermally comfortable environments, as well as energy efficient buildings. Architectural design methods in their early development phases define building's internal environment, and computer simulation can be of great value for this purpose. The aim of this work was to develop a design tool for the simulation of thermal performance of buildings, which could be user friendly and presenting trustful results. The work analyzes the concepts involved in the thermal exchanges between the building and the environment, according to the admittance model. This method has as main advantage that acceptable temperature and energy determinations are given by a simple procedure, where the three involved parameters: admittance, decrement factor and surface factor provide a qualitative indication of the probable thermal behavior of the construction. Based on this method it was developed a computer simulation tool to allow the designer, still in the conception phase, to simulate and to compare the several design alternatives and to evaluate the corresponding thermal performance of the building in study.

Key-words: thermal performance, admittance procedure, computer simulation tool.

1. Introdução

O estudo e a preocupação em garantir as condições de conforto térmico em edificações existiram ao longo da história, inicialmente de maneira empírica, posteriormente, com o desenvolvimento da ciência, aplicando-se o estudo científico da transmissão de energia térmica e a análise das propriedades dos materiais de construção. Dessa forma, técnicas do vernáculo e construções padrão para condições climáticas especiais (como, por exemplo, os iglus entre os esquimós) começaram a ser estudadas. Assim, a construção de residências orientadas corretamente, o uso de “brises” e muitas outras técnicas passaram a ter uma justificativa real, científica.

Com o avanço da tecnologia, o aumento desenfreado do espaço urbano e a necessidade de se construir ambientes cada vez mais voltados à economia e à padronização, o emprego destas técnicas foi relegado a um segundo plano, trazendo o conceito de projetos bioclimáticos como uma falsa idéia de dificuldade de concepção, formando um mercado muito restrito neste setor. O que deveria ser um conhecimento amplamente divulgado dentro da construção civil tornou-se extremamente específico.

Como consequência dessa falta de conhecimento especializado em relação ao estudo de desempenho térmico de edificações, o desconforto surge, resultado da má elaboração do projeto e falta de adequação às condições reais de funcionamento da edificação, comprometendo a saúde física e psicológica dos usuários de um determinado ambiente. Esse fato leva ao alto consumo de energia elétrica para condicionamento artificial de ambientes, fator já comprometido frente ao colapso energético, previsto há muito tempo pelos estudiosos da área. Sob esta perspectiva atual de consumo energético do país e tendo em vista a necessidade da elaboração racional do ambiente, é necessário que o homem volte às suas origens e recorra aos métodos de construção que busquem um conforto térmico. Obviamente, não será a opção por uma solução radical a melhor maneira de solucionar o problema, abandonando toda a tecnologia já desenvolvida e desprezando as construções existentes, a fim de se buscar novas alternativas. É o

aproveitamento das ferramentas e do conhecimento já existente que trará soluções a serem aplicadas de forma preventiva, durante a fase de concepção do projeto, e corretiva, no caso de edificações que já foram executadas.

Uma destas grandes ferramentas do mundo moderno que está se tornando cada vez mais parte do cotidiano do ser humano é o uso de computadores. O aumento do uso desta tecnologia tem facilitado o desenvolvimento de ferramentas úteis no auxílio da resolução de problemas envolvendo o desempenho térmico de edificações, principalmente no que diz respeito ao cálculo da temperatura interna do ambiente em condições de regime não permanente, ou seja, com variações significativas de temperatura externa.

Cálculos envolvendo trocas térmicas entre os ambientes interno e externo envolvem muitas variáveis, o que pode tornar a busca do resultado final um processo cansativo e passível de muitos erros. O uso de programas de simulação térmica vem facilitar este processo, daí sua importância e desenvolvimento no mercado.

Os programas de simulação térmica têm por objetivo avaliar o desempenho térmico de um ambiente. Para entender melhor como um programa desta natureza é desenvolvido, é preciso entender o que vem a ser desempenho térmico.

Há basicamente três aspectos que requerem consideração em qualquer discussão do desenho térmico de estruturas. Primeiramente, uma avaliação deve ser feita nas condições internas ambientais mais ideais ao conforto, saúde, segurança e bem-estar geral de seus ocupantes. Em segundo, é necessário descrever condições representativas de clima típico que devem ser tomadas em conta quando se pretende desenvolver o melhor projeto para condições específicas. Por último, deve ser mostrado como procedimentos de desenho e propriedades físicas de diferentes materiais estruturais podem ser efetivamente utilizados para fornecer o melhor controle possível de ambientes de vivência e trabalho.

Segundo AKUTSU, 1998, define-se desempenho térmico como o resultado da interação que se estabelece entre a edificação e o ambiente térmico a que a

mesma está submetida, ao qual pode-se denominar condições de exposição.

Estas são classificadas como:

- Condições climáticas: temperatura de bulbo seco do ar externo, umidade relativa do ar externo, velocidade e direção dos ventos, radiação solar direta e difusa;
- Condições de implantação: latitude e orientação solar;
- Condições de uso da edificação: número de ocupantes e atividades padrão, quantidade de calor e vapor d'água produzidos internamente na edificação, número de renovações de ar proporcionado pelo controle da ventilação do ambiente.

Além destas características, outras influenciam sensivelmente o desempenho térmico da edificação:

- Forma e dimensões geométricas da edificação e dos elementos (sendo elemento aqui definido como um único material construtivo com características próprias e particulares a este material) e componentes (definindo-se componentes como uma soma de elementos construtivos que, juntos, formarão um conjunto de materiais que apresentarão um comportamento térmico único, variando de acordo com as características particulares de cada elemento);
- Transmitância, absorptância e refletância à radiação solar das superfícies dos elementos e componentes;
- Emissividade das superfícies dos elementos e componentes;
- Condutividade térmica, calor específico e densidade dos materiais.

Atualmente existem diversos programas de simulação voltados a desenvolver cálculos de trocas térmicas na construção, cálculos estes que podem ser realizados por diversos métodos.

Não é possível reproduzir fielmente as condições de conforto térmico envolvidas em uma edificação e não se deve esperar que o computador traga uma resposta idêntica às condições reais da construção. Mais complexos ainda são o estabelecimento e a determinação de uma metodologia que reproduza exatamente as condições de regime não permanente. Por isso, o estudo e

desenvolvimento de uma ferramenta de simulação caminham como todo campo de pesquisas, principalmente no que se refere ao estudo do desempenho térmico do ambiente construído: iniciando com modelos simples e incorporando gradualmente níveis de complexidade que busquem aprimorar o grau de precisão do resultado final. Assim, é importante que se tenha conhecimento de quais são os métodos existentes, sua aplicabilidade e conveniência de acordo com o que se espera dos resultados obtidos, bem como a veracidade e aproximação dos mesmos.

O presente trabalho apresenta diversos métodos de avaliação do desempenho térmico de edificações, bem como o estudo aprofundado do método da admitância, tendo por conseqüência o desenvolvimento de uma planilha eletrônica de simulação baseada nesta metodologia.

Pretende-se neste estudo avaliar as fórmulas apresentadas pela bibliografia referentes ao método da admitância e desenvolver etapas ainda não suficientemente elucidadas na mesma. Com isso, apresentam-se parâmetros para desenvolvimento de uma planilha eletrônica de simulação que faça análise de projeto.

O trabalho divide-se em capítulos:

- O capítulo 3 faz uma descrição dos conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho.
- O capítulo 4 descreve os métodos de cálculo estudados e a justificativa para a escolha do método da admitância.
- O capítulo 5 traz uma breve explicação sobre os programas de simulação computacional para o desempenho térmico de edificações existentes e os mais utilizados.
- O capítulo 6 traz um estudo comparativo entre os programas de simulação para o desempenho térmico de edificações e as principais diferenças entre eles.
- O capítulo 7 discute o método da admitância.
- O capítulo 8 mostra como são calculados os valores das admitâncias de componentes.

- O capítulo 9 mostra todos os cálculos que foram necessários para desenvolver o método da admitância.
- O capítulo 10 apresenta a planilha eletrônica e mostra as etapas de entrada dos dados de projeto.
- O capítulo 11 faz um estudo comparativo entre os valores obtidos para um modelo na planilha desenvolvida e os valores obtidos para o software Arqitrop.

2. Objetivo

O trabalho tem como objetivo:

- 1) A análise do método da admitância para avaliação do desempenho térmico de edificações.
- 2) Como aplicação do método, a construção de uma planilha de simulação de um projeto.
- 3) Análise da ferramenta elaborada, comparando com resultados de medições e com o resultado do programa Arqitrop.

3. Conceitos fundamentais

3.1. Trocas de calor em regime permanente

Para esclarecer como funciona o regime permanente de transferência de calor, será feita uma análise da figura 1.

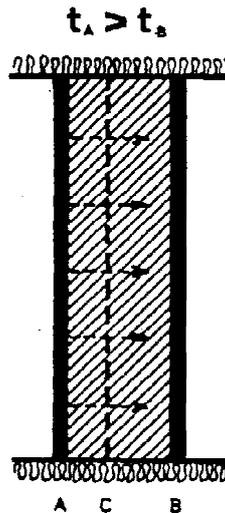


Figura 1: separação entre duas superfícies (RIVERO, 1986. p. 35).

Este processo é composto por três etapas:

- 1) O calor se transmite do meio E à superfície A;
- 2) Em seguida é transmitido de A até B;
- 3) Finalmente, da superfície B ao meio I.

Nos processos 1 e 3 não há transmissão de calor por condução, pois as superfícies do fechamento estão em contato com o ar, existindo apenas convecção e radiação. Além disso, as temperaturas t_e e t_{se} que correspondem, respectivamente, ao ambiente E e à superfície A são diferentes, senão não existiria um processo de transmissão de calor, ocorrendo o mesmo para t_{si} e t_i . Para que seja mantido um fluxo de calor entre os dois meios deve ser cumprida uma das seguintes condições:

$$t_e > t_{se} > t_{si} > t_i \text{ ou } t_i > t_{si} > t_{se} > t_e$$

As temperaturas t_e e t_i são consideradas, para um instante de tempo, invariáveis, pois dependem das condições climáticas de um local, ao passo que as temperaturas t_{se} e t_{si} dependerão das propriedades térmicas do fechamento.

Em um regime permanente, a quantidade de calor que atravessa qualquer plano interno às duas superfícies, paralelamente às faces do fechamento, é igual à quantidade de calor que entra por A e sai por B. O que ocorre, na realidade, é um fluxo de calor contínuo e uniforme, sendo que qualquer seção do percurso é atravessada, durante um intervalo de tempo, pela mesma quantidade de calor.

3.2. Trocas de calor em regime variável

Regime variável é uma outra denominação para regime não permanente e, como já foi dito, é condição essencial que o fluxo de calor seja variável com o tempo, ou seja, sejam produzidas alterações contínuas de pelo menos uma temperatura do conjunto que compõe a construção. Para que a análise fique mais simplificada, supõe-se que o fluxo de calor tenha uma direção perpendicular às superfícies do fechamento.

Exemplos de gráficos onde existe regime variável em condições diversas são apresentados nas figuras 2, 3 e 4, sendo o eixo das abcissas representante do tempo e o das ordenadas da temperatura.

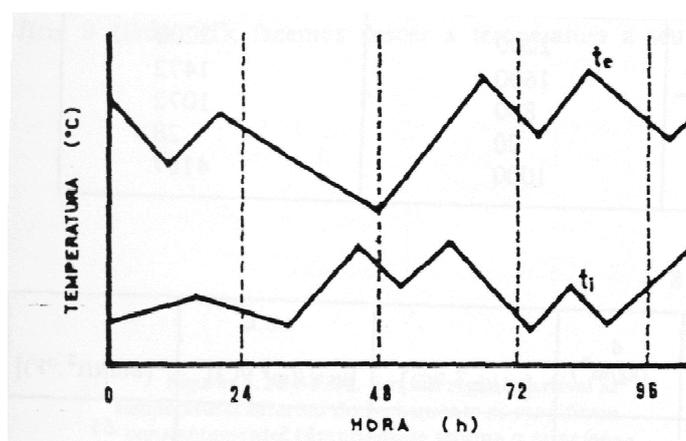


Figura 2: regime variável onde ambas as temperaturas variam com o tempo (RIVERO, 1986. p.41).

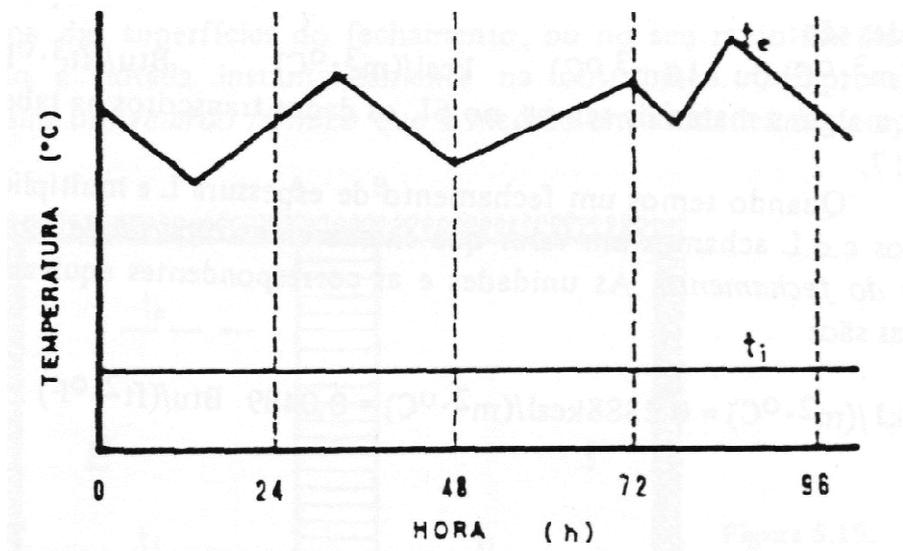


Figura 3: regime variável onde uma das temperaturas permanece constante (RIVERO, 1986. pg. 41).

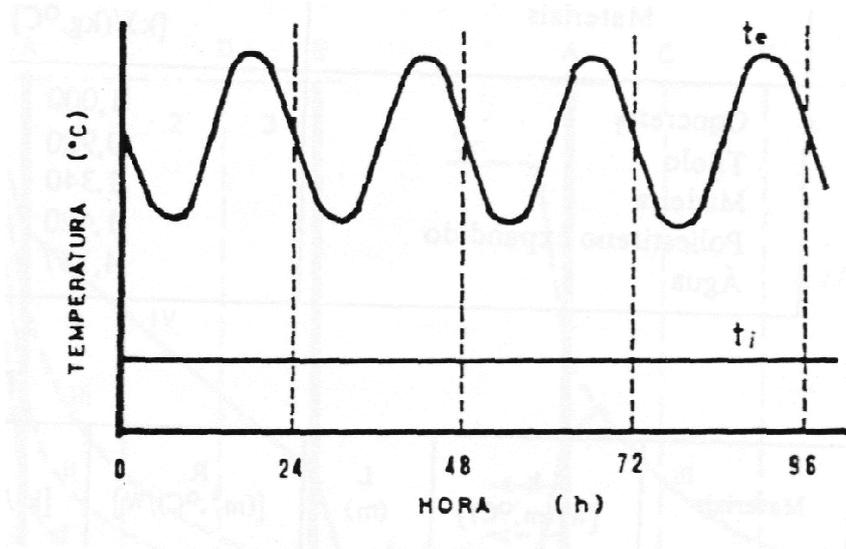


Figura 4: regime variável onde uma das temperaturas varia em regime periódico (RIVERO, 1986. p.41).

O exemplo citado na figura 4 mostra o regime periódico, ou seja, quando uma das temperaturas varia sempre da mesma maneira, dentro de iguais períodos de tempo. Este regime interessa em particular ao estudo de conforto térmico

porque representa de forma aproximada os fenômenos térmicos que ocorrem no meio exterior e também os ocorrentes nas estruturas dos edifícios. No caso da outra temperatura permanecer constante, surge o exemplo de edificações com equipamentos de ar condicionado ou calefação, que são responsáveis por manter uma temperatura uniforme internamente.

3.3. Temperatura sol-ar

Para entender o que vem a ser a temperatura sol-ar, é preciso observar a figura 5, que supõe um elemento opaco sujeito à incidência de radiação solar.

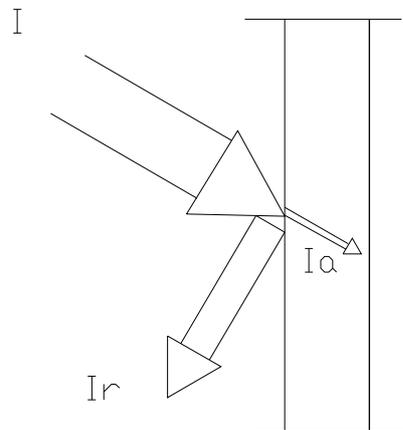


Figura 5: desenho explicativo da incidência de radiação solar.
(Adaptado de CROSET, 1968)

Supondo um elemento opaco de coeficiente de condutância térmica superficial externo h_e , temperatura externa t_e , temperatura superficial externa t_{se} , temperatura superficial interna t_{si} e temperatura interna t_i , a energia de radiação solar de intensidade I divide-se em duas partes: uma que é refletida (I_r) e outra absorvida pelo material (I_a). Em uma situação de não incidência da radiação solar, a temperatura t_e é maior que t_{se} . No entanto, no caso de uma incidência de radiação, a temperatura superficial t_{se} será maior que t_e , já que a superfície ficará

aquecida. A relação entre quantidade de troca de calor, radiação e temperaturas é representada pela equação 1:

$$q = U \left(\frac{\alpha I}{h_e} + t_e - t_i \right) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

q: densidade de fluxo de calor do meio externo para o meio interno, em W/m^2 ;

U: transmitância térmica, em W/m^2C ;

α : absorvância da superfície à radiação solar (função da cor);

h_e : coeficiente de condutância térmica superficial externa, em W/m^2C ;

À soma $(\alpha I/h_e + t_e)$ é dado o nome de temperatura sol-ar, que é a variação de temperatura superficial externa em virtude do aquecimento pela radiação solar.

4. Modelos de previsão das temperaturas internas

Um modelo físico é um esquema que possibilita a representação de um fenômeno ou conjunto de fenômenos físicos e eventualmente a previsão de novos fenômenos ou propriedades, tomando como base um certo número de leis físicas, em geral obtidas ou testadas experimentalmente (Houaiss, 2001). O modelo matemático é a representação matemática desse modelo físico.

Nos últimos anos vários métodos matemáticos foram desenvolvidos para quantificar e otimizar o cálculo do desempenho térmico de edificações. Diversos conceitos são aplicados na elaboração de modelos matemáticos.

4.1. Modelo da constante de tempo térmica

Segundo GIVONI, 1981, a constante de tempo térmica é uma função da difusividade térmica e é definida como a razão:

$$\frac{\text{Calor_Armazenado}}{\text{Calor_Transmitido}} = \frac{Q}{U} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

Q: intensidade do fluxo de calor do elemento externo, por metro quadrado de área de superfície, para uma temperatura interna 1°C maior que a temperatura do ar externa;

U: transmitância térmica total, em W/m²°C.

O significado físico de Q/U é o tempo em horas para que a quantidade de calor armazenado seja transmitido através da parede, supondo uma taxa constante de perda de calor e uma distribuição linear de temperatura dentro do elemento externo ou da parede.

Por comparação com a constante de tempo em um circuito elétrico, a constante de tempo térmica para uma parede de diversas camadas é calculada pela equação 3:

$$CTT = \frac{Q}{U} = \sum_i \left(\frac{Q}{U} \right)_i \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

CTT: constante de tempo térmica;

$$\left(\frac{Q}{U} \right)_i = \left(R_{so} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{L_i}{2\lambda_i} \right) (L_i \rho_i c_i) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

R_{so} : resistência superficial externa, em $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$

L: espessura, em metros

λ : condutividade térmica, em $W/(m \cdot ^\circ C)$

ρ : coeficiente de reflexão (quociente entre energia radiante refletida pela superfície e a energia radiante incidente), sem dimensão.

c: calor específico (quantidade de calor necessária para elevar em uma unidade a temperatura de um corpo de massa igual à unidade), em $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$

Tabelas diversas fornecem valores para a constante de tempo térmica., como indicada na tabela 1.

Tabela 1: Valores para a constante de tempo térmica (GIVONI, 1981).

Material	Constante de Tempo Térmica (W/m²°C)
Parede 1 ½ polegada reboco, 9 parede, 1 ½ reboco	18,2
Parede 1 ½ polegada reboco, 4 ½ parede, 1 ½ reboco	6,7
Parede 1 ½ polegada reboco, 4 ½ parede, 2 de camada de ar, 4 ½ de parede, 1 ½ reboco	25,2
Forro ½ polegada reboco, 6 ½ concreto reforçado, ½ reboco	10,7
Forro ½ cimento, 2 em concreto de vermiculita, 4 ½ concreto reforçado	55,2

4.2. Análise do circuito térmico

Segundo SODHA et al, 1986, problemas relativos à condução de calor podem ser resolvidos por analogia entre a transferência de calor devido a uma diferença de temperatura e o fluxo de corrente elétrica devido a uma diferença de potencial. O primeiro passo para estimar o comportamento térmico de uma edificação é, portanto, construir o diagrama de um circuito térmico usando os correspondentes símbolos elétricos. Em um circuito térmico equivalente, pode ser considerado que:

- Potenciais térmicos são diferenças de temperaturas em °C;
- Correntes térmicas são as densidades de fluxo de calor em W/m²;
- A resistência térmica opõe-se ao fluxo de calor com uma queda de temperatura correspondente;
- Capacitâncias armazenam calor;
- Fontes térmicas geram calor e tanques térmicos armazenam calor.

O circuito representando a transferência de calor tem quatro divisões principais:

- Vias de condução térmica através de elementos estruturais que são representados como malhas de circuitos RC paralelos;

- Trocas por radiação entre superfícies internas de elementos, que são representados como uma malha de resistências;
- Trocas por convecção entre superfícies internas e o ar do ambiente interno, que são representadas por uma malha de resistências aterrada através de um capacitor substituindo a capacidade do ar confinado;
- Entradas térmicas que são representadas por variação temporal de temperatura e fontes de corrente conectadas à malha através de resistências externas adequadas.

As principais suposições e limitações, geralmente implícitas em uma representação de circuitos, são as seguintes:

- A transferência de energia térmica através de elementos construtivos é unidirecional e perpendicular aos mesmos;
- Elementos distintos como paredes, coberturas, pisos, etc. são vias paralelas de transferência de calor para espaços confinados;
- Todas as superfícies são planos isotérmicos e a temperatura em todos os pontos é igual a temperatura real medida no centro geométrico da superfície;
- O transporte de umidade não é considerado;
- A resistência-capacitância distribuída continuamente no sistema físico real ao longo dos circuitos de transferência de calor é substituída por um número finito de elementos discretos R-C no circuito térmico. No limite, o sistema discreto tende para o contínuo;
- O ar em espaços confinados é uniformemente aquecido em qualquer instante à temperatura uniforme em todos os pontos do ambiente;
- A troca líquida de radiação com a massa de ar confinado é desprezada;
- Todas as superfícies irradiam como corpo cinza de maneira difusa e sem inter-reflexões secundárias.

4.3. O modelo de matrizes

Segundo GIVONI, 1981, é um modelo matemático que transforma valores de entrada de fluxo de calor e temperatura em valores de saída, representando as propriedades termofísicas para cada elemento construtivo por coeficientes de uma matriz quadrada.

Os coeficientes destas matrizes de transferência são computados como em teorias de circuitos elétricos (leis de Kirchhoff) considerando conceitos similares de imitância¹ térmica em série e em paralelo.

As duas equações lineares que tratam de valores de entrada e saída, similares a uma rede de circuito elétrico “two-port”, supondo-se que a transmissão de calor seja linear e que não haja perdas, ou essas sejam desprezíveis nos cantos, são:

$$t_{se} = At_{si} + Bq_{si} \quad \text{(Equação 5)}$$

$$q_{se} = Ct_{si} + Dq_{si} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

t_{se} : temperatura superficial externa, em °C;

q_{se} : densidade de fluxo de calor na superfície externa, em W/m²;

t_{si} : temperatura superficial interna, em °C;

q_{si} : densidade de fluxo de calor na superfície interna, em W/m².

O sistema de equações pode ser escrito na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} t_{se} \\ q_{se} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{si} \\ q_{si} \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 7)}$$

t e q são considerados termos complexos de funções harmônicas para uma frequência particular $\omega/2\pi$, com partes reais representando a temperatura e o fluxo de calor como uma função do tempo.

¹ Adaptado do termo original “imittance”.

Os sucessivos coeficientes da matriz de transferência são função das propriedades termofísicas de elementos construtivos, como indicado nas equações de 8 a 13:

$$A_n = \cosh(1+i)\phi_n \quad \text{(Equação 8)}$$

$$B_n = R \frac{\sinh(1+i)\phi_n}{(1+i)\phi_n} \quad \text{(Equação 9)}$$

$$C_n = \frac{(1+i)\phi_n}{R} \sinh(1+i)\phi_n \quad \text{(Equação 10)}$$

$$D_n = A_n \quad \text{(Equação 11)}$$

$$\phi_n = \sqrt{\frac{\omega_n CR}{2}} \quad \text{(Equação 12)}$$

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{24} \quad \text{(Equação 13)}$$

onde:

L: espessura do elemento, em metros;

R=L/λ, resistência térmica do elemento, em (m²°C)/W;

C=Lpc, capacidade térmica por unidade de área, em W/(m²°C);

De acordo com Dreyfus (citado por GIVONI, 1981), a enésima harmônica para a temperatura interna, quando as superfícies das paredes apresentam áreas envidraçadas, pode ser dada como uma função da enésima harmônica do ar externo (t_{se,n}) e do componente da radiação sol-ar (t_{so1,n}) como na equação 14:

$$t_{i,n} = \frac{\sum_s t_{se,n} \frac{S_s}{R_o} + \sum_s \left(t_{so1,n} \frac{A_s}{B_n} \right)_s + \sum_s t_{se,n} \left(\frac{A_s}{B_n} \right)_s + W_n}{\sum_s A_s \left(\frac{A_n}{B_n} \right)_s + \sum_s A_s \left(\frac{C_n}{D_n} \right)_s} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde:

A_n, B_n, C_n, D_n: elementos da matriz, já definidos

R_o: resistência térmica total do vidro, em (m²°C)/W;

s : número da parede;
 S_s : área de vidro na parede “s”, em m^2 ;
 A_s : área da parede “s”, em m^2 ;
 $t_{so1,n}$: contribuição da radiação solar para a temperatura sol-ar, em $^{\circ}C$;
 $t_{se,n}$: enésima harmônica da temperatura externa do ar, em $^{\circ}C$;
 A_s/B_n : correspondentes à via conectada ao exterior da edificação (ambos coeficientes da matriz descrita anteriormente)
 C_n/D_n : correspondentes às partes internas (paredes internas ou divisórias), também coeficientes da matriz.

$W_n = t_{se,n} NVC'$, sendo:

C' : calor específico volumétrico do ar, em $kJ/(kg^{\circ}C)$;

V : volume de ar, em m^3 ;

N : número de trocas de ar por hora;

A radiação solar que ingressa através da janela é considerada como uma variável interna de entrada de calor (o componente W também).

A resistência térmica e a capacidade térmica do vidro comum de janela não são consideradas porque são relativamente pequenas.

O primeiro termo das séries que representam a temperatura interna é:

$$t_i = \frac{\sum_s t_{se} \frac{S_s}{R_o} + \sum_s \left(t_{so1} \frac{A_s}{R_s} \right) + \sum_s t_{se} \left(\frac{A_s}{R_s} \right) + \sum W}{\sum_s \frac{A_s}{R_s}} \quad \text{(Equação 15)}$$

Onde:

R_s : resistência térmica total das paredes, em $(m^2^{\circ}C)/W$;

$\sum W = t_{se} NVC' +$ constante de entrada de calor ou média, em caso de variação da entrada de calor.

4.4. Método da análise harmônica para cálculo de temperatura superficial interna

Segundo MACKEY & WRIGHT, 1943, o problema da transferência de calor através de um sólido foi definido por J. Fourier na forma de uma equação diferencial em três dimensões, como a seguir:

$$\nabla(\lambda \nabla t) = \rho c \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{(Equação 16)}$$

a expressão infinitesimal $\nabla(\lambda \nabla t)$ em uma certa posição representa o calor residual entre o fluxo de entrada e saída nesta posição, como consequência do gradiente de temperatura ∇t . Este gradiente de temperatura representa a diferença de temperatura entre esta posição e pontos em torno, nas três dimensões. Cada direção é caracterizada pela condutividade térmica λ .

Este calor residual produz uma variação de calor no tempo $\rho c \frac{\partial t}{\partial \theta}$ e portanto, uma variação de temperatura $\frac{\partial t}{\partial \theta}$ com o tempo, onde

λ : condutividade térmica do material do sólido, em W/(m°C);

t : temperatura no ponto (x, y, z) no instante de tempo θ em °C;

ρ : densidade do material em kg/m³;

c : calor específico do material, em kj/(kg°C).

Se para um elemento construtivo externo, por exemplo uma parede, considera-se um fluxo de calor linear, o sólido acaba sendo homogêneo em toda a sua largura, podendo a equação ser escrita unidimensionalmente da seguinte maneira:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{(Equação 17)}$$

Onde o termo $\frac{\lambda}{\rho c}$ é a difusividade térmica.

A temperatura solar, t_{sa} pode ser analisada harmonicamente em termos de uma série de Fourier da seguinte maneira:

$$t_{sa} = \bar{t}_{sa} + \sum_{n=1}^{\alpha} t_{san} \cos(\omega_n \theta - \gamma_n) \quad \text{(Equação 18)}$$

onde:

\bar{t}_{sa} : valor principal da temperatura solar em °C;

t_{san} : coeficientes de harmônicas sucessivas;

$\omega_n = \frac{2\pi n}{24}$, n é o número ordinal do harmônico;

γ_n : retardamento do harmônico em relação ao período noturno, em radianos.

Geralmente um pequeno número de harmônicos é suficiente para propósitos práticos.

A temperatura superficial interna da parede é dada por

$$t_{si} = t_{ia} + \frac{U}{h_{is}} (\bar{t}_{sa} - t_{ia}) + \sum_{n=1}^{\alpha} \lambda_n t_{san} \cos(\omega_n \theta - \gamma_n - \phi_n) \quad \text{(Equação 19)}$$

Onde:

$$U = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \left(\frac{L}{\lambda}\right)_j + \frac{1}{h_{se}} + \frac{1}{h_{si}}}: \text{condutância total da parede.}$$

λ_n : decremento em amplitude de onda para o enésimo harmônico, dado pela equação 20 a seguir:

$$\lambda_n = \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{T}} A^2 B\right) \quad \text{(Equação 20)}$$

onde

T: período do n-ésimo harmônico:

$$T = \frac{24}{n} \quad \text{(Equação 21)}$$

O atraso é dado pela fórmula:

$$\phi_n = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{T}{\pi} A^2 B} \right)_n \quad \text{(Equação 22)}$$

onde

$$A = \sum_{j=1}^m R_j \quad \text{(Equação 23)}$$

Sendo:

j: um número ordinal (índice);

m: a camada mais interna;

$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j}$, sendo λ_j neste caso a condutividade térmica do material j

(W/m°C) e e_j a espessura do componente (metros);

B: a “admitividade equivalente”, definida como

$$B = \frac{1,1}{A} \sum_{j=2}^m [R_j (\lambda \rho c)_j] + \frac{(\lambda \rho c)_1}{A} [R_1 - 0,1A] \quad \text{(Equação 24)}$$

4.5. Modelo das diferenças finitas

De acordo com GIVONI, 1981 e assumindo um fluxo linear de calor em camadas sólidas homogêneas, a equação de Fourier:

$$\nabla \lambda \nabla t = \rho c \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{(Equação 25)}$$

pode ser escrita na forma:

$$\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{(Equação 26)}$$

Para duas camadas internas homogêneas consecutivas, a equação 28 pode ser representada da seguinte maneira::

$$\frac{A_{n+1}}{R_{n+1}} (t_{n+1}^m - t_n^m) - \frac{A_n}{R_n} (t_n^m - t_{n-1}^m) = \left(A_n \rho_n c_n \frac{d_n}{2} + A_{n+1} \rho_{n+1} c_{n+1} \frac{d_{n+1}}{2} \right) \frac{t_n^{m+1} - t_n^m}{\Delta \theta}$$

Onde $t_n^m - t_n^{m-1}$ é a variação de temperatura na face n no intervalo de tempo $\Delta\theta$ entre o instante m e o instante m+1, como uma consequência do gradiente de temperatura nas faces n-1, n e n+1, a uma distancia d_n entre elas. R_n é a resistência térmica entre as faces n-1 e n, ρ_n é a densidade do material desta camada e c_n é seu calor específico; A_n é a área na superfície n.

A solução desta equação para t_n^{m+1} na superfície n é:

$$t_n^{m+1} = a_n t_{n+1}^m + b_n t_n^m + c_n t_{n-1}^m \quad \text{(Equação 27)}$$

onde:

$$a_n = \frac{A_{n+1}}{R_{n+1}} \frac{\Delta\theta}{D_n} \quad \text{(Equação 28)}$$

$$c_n = \frac{A_n}{R_n} \frac{\Delta\theta}{D_n} \quad \text{(Equação 29)}$$

$$b_n = 1 - (A_n - C_n) \quad \text{(Equação 30)}$$

$$D_n = A_n \rho_n c_n \frac{d_n}{2} \quad \text{(Equação 31)}$$

R_n é a resistência térmica entre as faces n-1 e n, então $R_n = d_n / \lambda_n$, ou a resistência térmica superficial na superfície n se esta é a superfície em contato com o ar ($m^2 C/W$).

4.6. O modelo da admitância

De acordo com MILBANK & LYNN, 1974, o modelo da admitância permite estimar a transferência de energia e mudanças de temperatura em condições estáveis. Foi desenvolvido para cálculo de temperaturas em construções, particularmente em clima quente.

O trabalho de MILBANK & LYNN, 1974, está relacionado com os fatores usados para avaliar a resposta térmica de superfícies, que são a admitância, o fator decremento e o fator superficial. Mostra que, para variações senoidais de

temperatura os fatores dependem das características térmicas dos materiais, de suas espessuras e da frequência do ciclo de temperatura.

Esse método foi o modelo adotado para desenvolvimento deste trabalho e, portanto, será detalhado no capítulo 7.

5. Programas de simulação do desempenho térmico de edificações

A seguir serão apresentados diversos programas de simulação de desempenho térmico, com a finalidade de mostrar como estes programas são desenvolvidos e as principais diferenças entre eles, quando comparados nas mesmas condições de projeto.

5.1. O programa THEDES

O programa THEDES foi desenvolvido por SATTLER, 1991, e requer a criação de dois arquivos, um com os dados climáticos locais e o outro, com a caracterização minuciosa da edificação em estudo, somando-se então a caracterização minuciosa do local onde a edificação está construída.

O programa oferece a possibilidade de analisar o desempenho térmico da edificação para condições climáticas diversas, desde que existam arquivos de dados correspondentes, com valores horários dos elementos climáticos já referidos. Há também no arquivo de dados valores horários de ventilação ou renovação do ar e os valores de ganhos internos de calor por ocasião de sua utilização.

O algoritmo de cálculo foi elaborado com base no método da admitância, desenvolvido pelo Building Research Establishment.

Dessa forma, o programa Thedes busca otimizar projetos arquitetônicos, principalmente os relacionados a moradias para população de baixa renda, objetivando melhorar sua habitabilidade e tornar sua ocupação mais agradável. Este cuidado pode gerar um custo adicional mínimo e até a redução dos custos se o projeto térmico for racionalizado e a escolha dos materiais for correta.

O programa foi desenvolvido inicialmente para uso em computadores de grande porte, posteriormente adaptado a microcomputadores para facilitar o acesso pelo usuário, além de aumentar a riqueza de recursos gráficos.

O programa apresenta as temperaturas no interior da edificação, resultado da interação clima e edificação e das propriedades térmicas de cada componente. Além deste, apresenta também resultados numéricos e gráficos dos valores horários de:

- Irradiância solar sobre os diversos componentes da edificação;
- Temperatura fictícia sol-ar sobre os componentes;
- Ganhos e perdas de calor: internos, por ventilação, através dos componentes opacos e componentes transparentes;
- Ganhos e perdas de calor através dos componentes verticais opacos, telhado e piso.

Cada resultado pode ser fornecido em ganhos e perdas para um conjunto de componentes da edificação ou individualizado, específico para apenas uma parte do componente.

O programa indica também os valores da temperatura e umidade relativa para cada hora sobre uma carta psicrométrica, mostrando também quais são os limites de conforto ótimo.

A figura 6 apresenta o diagrama de fluxo de dados para o programa Thedes.

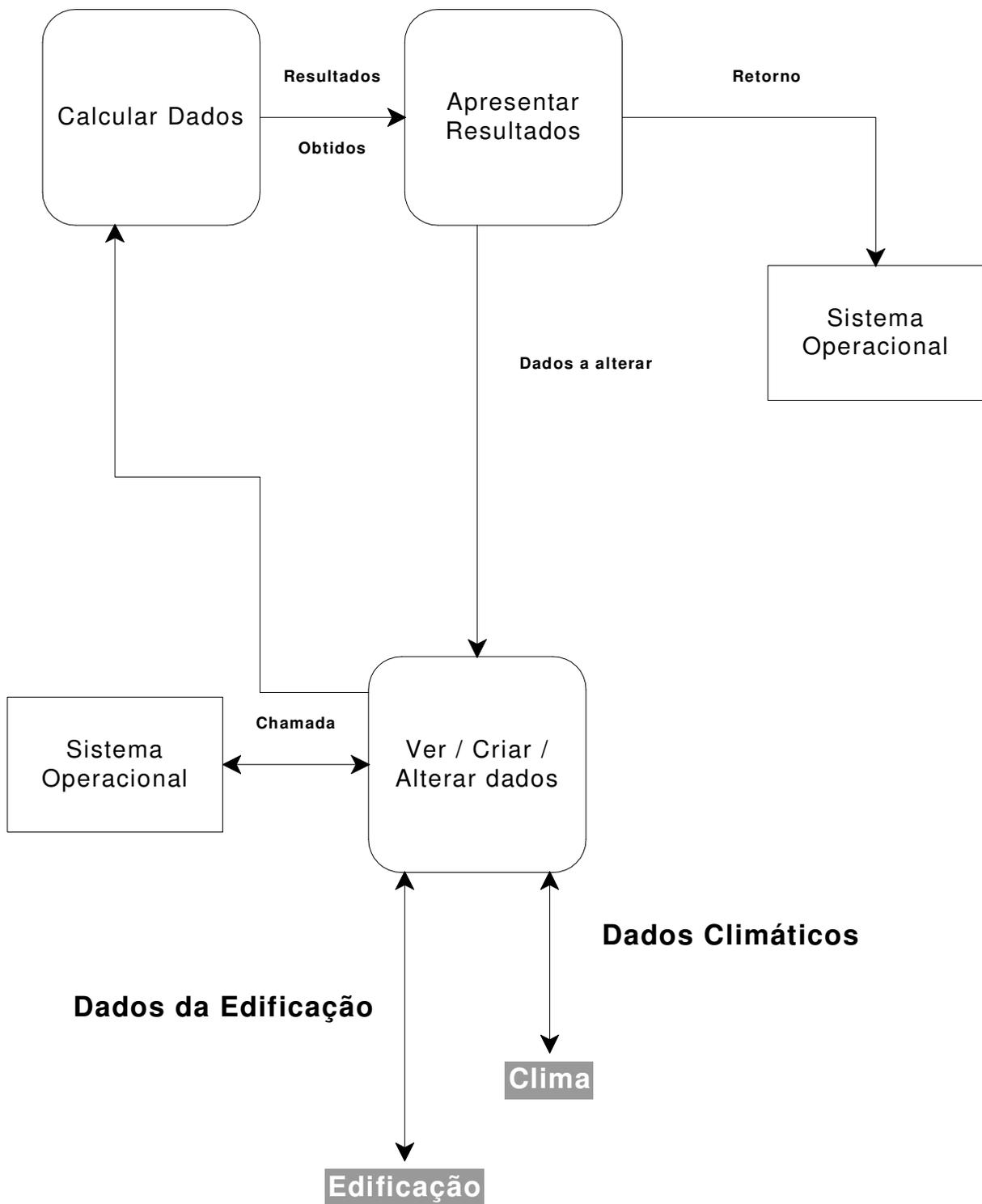


Figura 6 – diagrama de fluxo de dados para o programa Thedes (SATTLE, 1981).

5.2 O programa Arqitrop

Foi desenvolvido por RORIZ & BASSO, SD, e por ser utilizado como base para a elaboração do trabalho, será descrito com maiores detalhes a seguir.

O Arqitrop é similar ao THEDES e com diagramas de fluxo de dados apresentados nas figuras 7, 8 e 9.

5.2.1. Descrição do programa

Tem como tela inicial o menu chamado Módulo 1, que compreende todas as operações realizadas por ele. A partir deste módulo são apresentadas as opções descritas a seguir.

1) BanClim – Dados Climáticos: É o módulo que contém os dados de clima das principais cidades brasileiras, sendo estes dados extraídos de publicações oficiais que são, em sua maioria, médias calculadas após 30 anos de observação. Os mesmos dados podem ainda ser modificados, caso surjam valores atualizados que o usuário queira aplicar. Oferece as opções de consultar e imprimir os dados, bem como incluir e corrigir os dados climáticos.

2) BancMat – Dados de Materiais e Componentes: Fornece as características térmicas dos materiais de construção usualmente empregados na construção civil. Tais valores foram retirados de publicações de laboratórios oficiais, brasileiros e estrangeiros. Assim como o BanClim, o BancMat é uma biblioteca do programa, com dados importantes para cálculos que serão realizados para desenvolver o simulador. Este módulo apresenta as mesmas rotinas do BanClim, tendo as seguintes características:

- **Materiais:** os valores da densidade (em kg/m^3), do calor específico (em $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$) e da condutividade térmica (em $\text{W/m } ^\circ\text{C}$). Acontecerá em muitos casos de surgirem valores diversos para cada material, seguido de mais de uma linha. Isto significa que o programa refere-se a materiais de densidades diferentes, apresentando por isso características térmicas que variam de acordo com sua composição, não sendo especificadas no programa estas variações.

- Componentes: dividem-se em coberturas e paredes, mostrando as seguintes características: Desenho em perspectiva ilustrando a constituição do elemento; Valor do retardamento, em horas, e do amortecimento em porcentagem; Valor do coeficiente de transmissão térmica, em $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, para os casos de fluxo de calor ascendente ou descendente (quando se tratar de coberturas e pisos) e fluxo horizontal (quando se trata de paredes ou painéis); Uma lista com os materiais do componente, iniciando pelo material exterior, fornecendo os valores da densidade, da condutividade térmica e da espessura de cada um dos materiais é apresentada.

3) Croquis – Auxiliar de Desenho: oferece uma ferramenta gráfica para que o usuário possa desenhar os croquis de componentes que ele acrescente na biblioteca. É possível desenhar croquis de componentes construtivos, verificar e alterar croquis já desenhados.

4) Projeto – Avaliação e Recomendações: Na verdade, essa é a ferramenta mais importante do programa Arquitrop, pois neste módulo encontra-se o simulador propriamente dito. É nesta opção que serão utilizadas todas as bibliotecas descritas anteriormente, para análise das condições de conforto. Por ser o objetivo final do programa, será descrito em um item separadamente.

A. Projeto – Avaliação e Recomendações

a) Analisar clima e emitir recomendações

Esta opção oferece recomendações construtivas segundo o método de Mahoney (KOENIGSBERGER et al, 1977) adaptado pelos autores (RORIZ & BASSO, SD).

b) Incluir nova ficha no banco de projetos

Esta opção inclui um registro com informações sobre um projeto detalhado pelo usuário.

Para isso, o programa solicita o código de acesso e depois pede a entrada dos seguintes itens:

- Título do projeto;
- Número de pavimentos da edificação: caso a construção tenha mais de um pavimento, pede também o ambiente a ser analisado, ou seja, se é térreo ou algum dos pavimentos acima do solo. Após a definição do ambiente, o programa vai recolher os dados sobre ele, que consistem em:
 - i. Pé direito, em metros;
 - ii. Número de fachadas, ou seja, quantas paredes deste ambiente estão em contato com o exterior;
 - iii. Área total de ventilação, em m²;
 - iv. Verifica em quantas fachadas existem aberturas de ventilação;
 - v. Pede o período de ventilação da seguinte forma: indicar o horário de abertura e a duração em horas desta abertura;
 - vi. Sobre cada uma das fachadas definidas pelo usuário, o programa solicita os seguintes dados: orientação da normal à fachada (considerando o Leste como 90°), área total envidraçada na fachada, espessura do vidro, em metros, pergunta se existe algum tipo de proteção solar na área envidraçada (cujo tipo de proteção será descrito a seguir), pede para especificar o tipo de parede (com os dados das paredes do BancMat), a cor da face exterior da fachada, cuja classificação será fornecida a seguir, extensão da fachada, extensão da face perpendicular à fachada;
 - vii. Especificação do Estado e cidade onde a edificação está ou será construída;

- viii. Sobre a ocupação de pessoas, o Arqitrop pergunta o número de pessoas ocupando o ambiente e o período principal de ocupação, pedindo para informar a hora de início e a duração da ocupação;
- ix. Sobre o calor de equipamentos, o programa solicita a intensidade total, em W, dos equipamentos utilizados no local e o período de funcionamento dos mesmos, devendo ser informado a hora de início de atividade destes equipamentos e a duração dos mesmos;
- x. Especificação do tipo de laje ou cobertura entre os pavimentos: consultando os componentes de coberturas e pisos do BancMat.

c) Nesta etapa e na seguinte o programa faz uso de todas as bibliotecas existentes no programa, conforme já descrito anteriormente.

c) Avaliar desempenho de projeto existente no banco.

São apresentadas as seguintes opções:

- 1) Buscar projeto arquivado no banco: Quando o usuário escolhe um projeto que consta no banco de dados, o programa calcula a velocidade do vento. Caso não existam dados suficientes para este cálculo, o programa adota a velocidade do vento como 2 m/s. O Arqitrop faz uma estimativa da taxa de ventilação, em volumes por hora, e pede a confirmação deste valor. Caso o usuário não confirme, deverá fornecer outro valor;
- 2) Consultar ou alterar características do projeto: É preciso que o usuário antes retire o projeto do banco de dados existentes, ou o programa detectará erro. Um dado interessante nesta opção é que só nela é possível variar o dia a ser considerado no cálculo do programa. Caso este dia não seja modificado, o programa considera o dia como 15 de janeiro;
- 3) Tabelas indicando variação horária de temperatura e cargas térmicas: O programa verifica se a saída deverá ser no vídeo ou impressora. Os

valores são mostrados em horários definidos pelo programa, e são os descritos a seguir, dividido em duas partes, uma tela relativa a temperatura e fluxo de calor e a outra relativa à distribuição de ganhos e perdas de calor através das superfícies opacas da edificação;

4) Gráficos indicando variação horária de temperaturas e cargas térmicas: o programa recolhe os dados das telas e coloca em forma de gráfico. É possível ver nestes gráficos a porcentagem de carga transmitida através de cada um dos elementos envolvidos no projeto, seja construtivo ou de uso da edificação ou ainda de fatores naturais;

5) Verificação do risco de condensação superficial interna: Os horários com risco de condensação são indicados com um asterisco(*).

B. Módulo 2 – Diversas rotinas opcionais

Oferece as seguintes opções:

1) CartaSol – Determinação dos ângulos de incidência de raios solares: Desenha diagramas das órbitas aparentes do sol, em projeção estereográfica, para qualquer latitude Sul entre 0 e 60 graus. As curvas horizontais indicam os dias de incidência (22/06, 21/05 e 24/07, 16/04 e 28/08., 21/03 e 23/09, 23/02 e 20/10, 21/01 e 22/11, 22/12). As orientações consideram o Norte verdadeiro e não magnético. As curvas verticais indicam as horas solares;

2) Sobrepor carta solar / transferidor auxiliar: Com o auxílio do transferidor podem ser definidos, com precisão, ângulos de incidência de raios solares sobre as superfícies externas da edificação, para qualquer horário de qualquer dia do ano. O programa pede a latitude e o nome da cidade e a orientação da fachada, com origem no e em sentido horário.

3) Desenhar transferidor auxiliar: Desenha apenas o transferidor, para ilustração, sem orientação de fachada ou latitude;

4) Gradient – Temperaturas intermediárias nas camadas dos componentes: É uma opção que calcula o valor da temperatura em cada uma das camadas dos componentes. Para isso, o programa solicita os seguintes dados:

- Pergunta se o componente é horizontal ou vertical;
- Nome da cidade;
- O tipo de componente, ou seja, seu nome;
- O dia e mês;
- A hora;
- O total de camadas, não devendo ter mais de doze;
- As temperaturas superficial externa e interna;
- Pergunta se o componente possui lâmina de ar. Caso tenha, serão pedidos os seguintes itens:
 1. Quantas camadas de ar existem no componente?
 2. Qual a posição da lâmina de ar?
 3. Espessura da lamina de ar, em metros;
 4. A lâmina de ar tem aberturas para ventilação? Qual a área total em abertura/metro de parede?
 5. A lâmina de ar possui superfícies refletoras? Quantas?
- Espessura em metros e condutividade, em W/h°C da camada.
 1. Verifica se existe outra camada com estas mesmas características. Se houver, pergunta qual é.

Como resultado, o programa fornece a temperatura em cada uma das camadas.

4) AvalComp – Avaliação simplificada, em regime permanente, de um componente: Esta rotina estima a variação horária do fluxo térmico através de componentes construtivos opacos. A equação adotada para este caso é a seguinte:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot (t_{se} - t_{si}) \quad \text{(Equação 32)}$$

Onde:

R = resistência térmica total do componente, não incluindo neste caso a resistência térmica superficial (efeito de película);

t_{se} = temperatura superficial externa, ou temperatura “ar-sol” calculada;

t_{si} = temperatura superficial interna, considerada constante;

Q = fluxo térmico (W/m^2 ou $Kcal/m^2$).

Para este cálculo a inércia térmica não é considerada. Caso seja necessária uma análise mais completa, deve-se procurar uma análise em Projeto, no módulo 1.

As avaliações nesta opção resumem-se em coberturas ou pisos e paredes ou painéis.

5) Ajustar escalas gráficas para monitor e impressora: Deve ser ajustada com o movimento do cursor.

Há outras rotinas opcionais, porém não estavam disponíveis na versão utilizada pela autora:

- 1) Radiação – Variação horária da intensidade da radiação solar:
- 2) ConfTerm – Verificação das condições de conforto térmico de projetos:
- 3) CondArtf – Estimativa de cargas de condicionamento artificial de ar:

10) Avaliar coberturas: O programa busca uma cobertura ou piso do BancMat, escolhido pelo usuário, solicitando a seguir a cor da face externa da cobertura, na classificação já mencionada anteriormente. É necessário que o usuário forneça os valores de t_{si} , o estado e cidade e o dia e mês (ou estação do ano). É adotada velocidade do vento como 2 m/s.

Avaliar paredes e painéis: Da mesma forma que para a cobertura, o programa solicita a escolha de uma parede ou painel do BancMat, assim como solicita a orientação da fachada (sendo o norte o zero e o leste 90 graus), a cor da face externa, o valor de t_{si} , o estado e cidade, o dia e mês ou estação do ano.

5.2.2 Fluxograma

Será apresentado a seguir um fluxograma do programa Arqitrop, a título de ilustração, para melhor verificação dos módulos existentes. Não se apresenta aqui nenhuma seqüência que busque a lógica da programação nem os métodos de cálculo, mas apenas uma forma mais fácil de visualizar os elementos do programa.

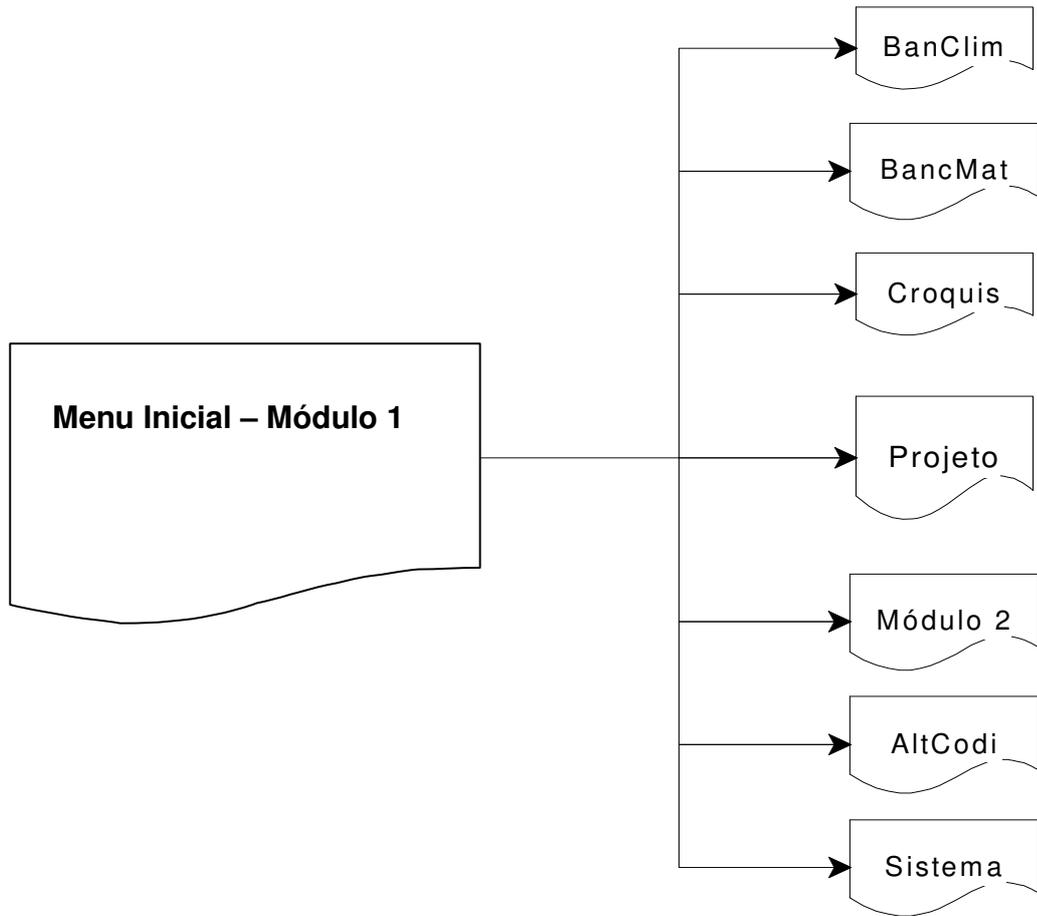


Figura 7 – Fluxograma do Módulo 1

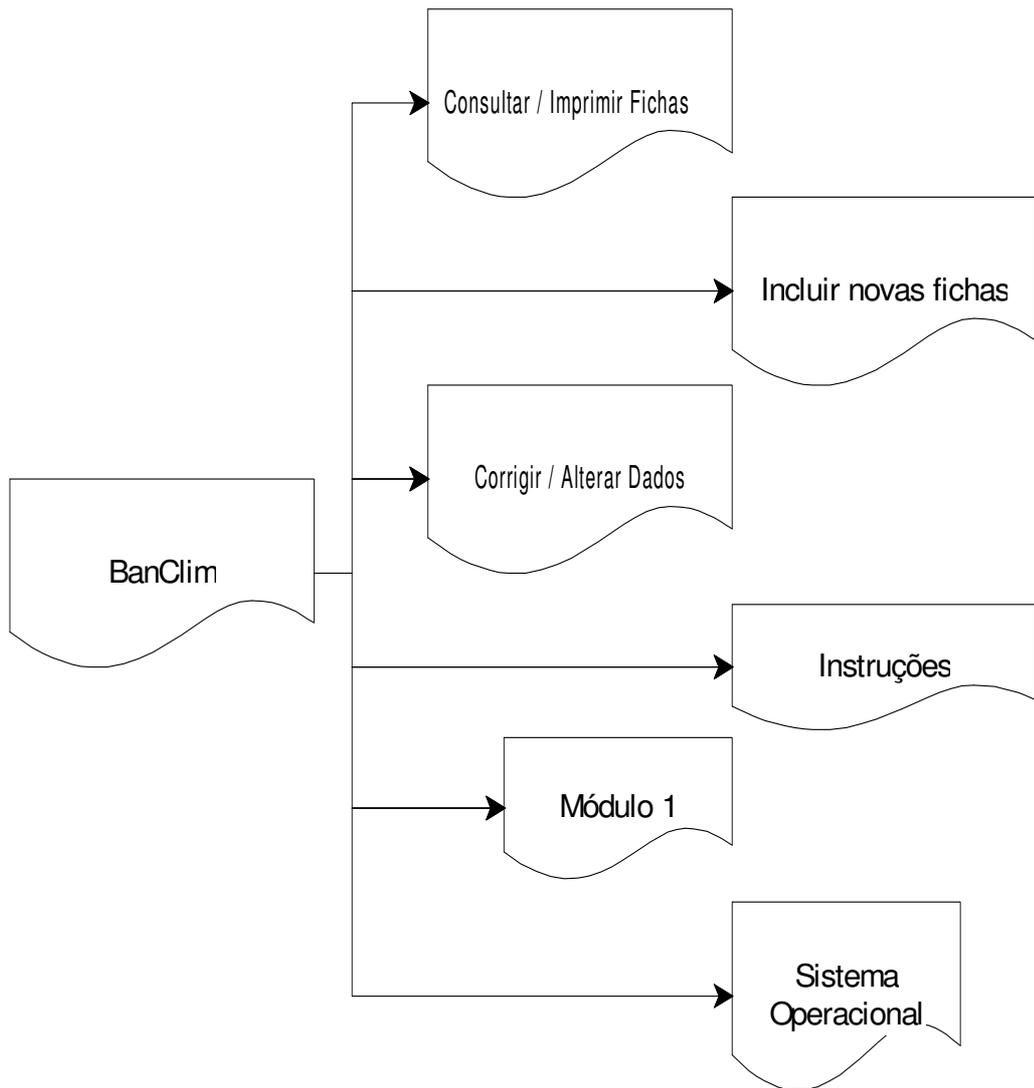


Figura 8 – Fluxograma do BanClim.

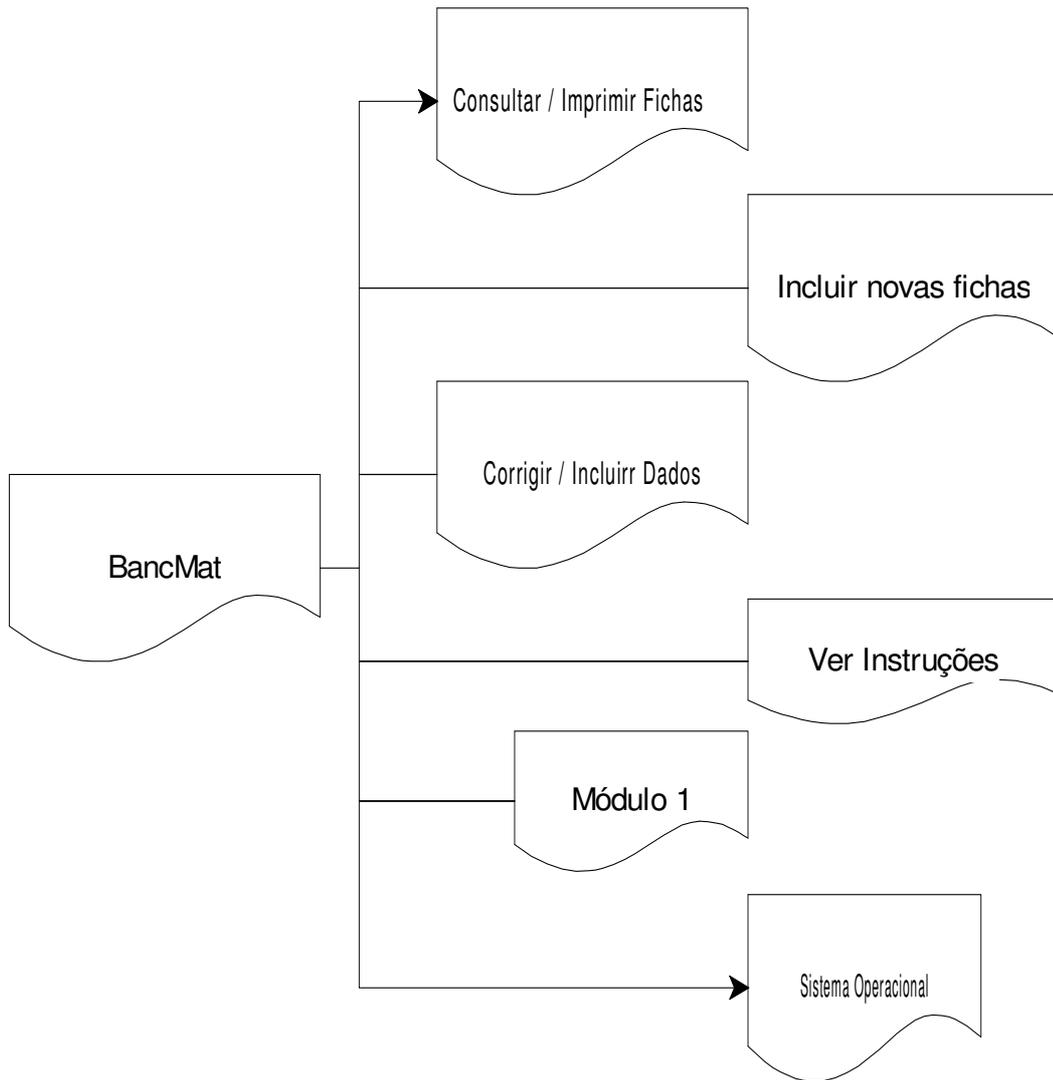


Figura 9 – Fluxograma do BancMat.

5.3. O programa NBSLD

Segundo AKUTSU & LOPES, 1998, o programa NBSLD foi desenvolvido por uma equipe de pesquisadores do NBS - National Bureau of Standards, USA, e passou por algumas modificações no IPT, a fim de adaptá-lo às condições climáticas nacionais.

Utilizando como dados de entrada as grandezas que caracterizam a edificação e como ela está exposta, é possível efetuar simulações das trocas de calor entre os elementos da edificação e entre estes mesmos elementos e o ambiente térmico, resultando em valores como temperatura do ar interior ou cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. Estes dados de saída podem avaliar o desempenho térmico e dimensionar dispositivos de condicionamento artificial de ar.

O programa permite opções de cálculo baseadas nas seguintes condições:

- a) Opção 1: ambiente não condicionado artificialmente, sendo possível calcular tanto os valores das temperaturas do ar interior quanto das superfícies interiores e exteriores de todos os elementos que compõem o ambiente, assim como o fluxo de calor em cada uma destas superfícies;
- b) Opção 2: fixa-se um valor constante da temperatura do ar interior, calculando as cargas térmicas de aquecimento ou resfriamento necessárias para manter o ar interior nesta temperatura;
- c) Opção 3: fixado um limite inferior e um superior para a temperatura do ar interior, determina-se as cargas térmicas de aquecimento ou resfriamento necessárias para manter a temperatura dentro deste intervalo;
- d) Opção 4: fixam-se os limites inferior e superior da temperatura interna e as cargas de aquecimento ou resfriamento do sistema de condicionamento artificial do ambiente, obtendo os mesmos valores da opção 3, sendo que quando as cargas térmicas de aquecimento ou resfriamento ultrapassam os limites prefixados serão determinados os valores das temperaturas internas mantendo-se os limites estabelecidos para as cargas térmicas.

Em nenhum caso o programa considera as trocas de calor entre os demais ambientes, além de estarem implícitas as seguintes hipóteses:

- A temperatura do ar interior é uniforme em todo o recinto;
- Os elementos e componentes formam camadas planas de material homogêneo e o fluxo de calor que os atravessa é unidirecional e perpendicular ao plano do elemento;
- As superfícies dos elementos e componentes são isotérmicas e os “efeitos de borda”, relativos ao fluxo de calor próximo às intersecções das várias superfícies, são desprezíveis;
- Os coeficientes de transmissão de calor por convecção são constantes ao longo de cada superfície isotérmica;
- Os efeitos de absorção da radiação solar na temperatura de vidros são desprezíveis.

5.4. O programa Casamo-clim

De acordo com ASSIS & PINTO, 1995, o programa consiste em um conjunto de programas, composto pelo CASAMO-GB&A e CASAMO-HPE, que servem para calcular as necessidades de aquecimento de uma edificação e o seu consumo de energia, respectivamente.

O Casamo-clim é um programa desenvolvido na École des Mines de Paris, representando uma ferramenta simples, fácil de ser integrada à prática projetual. O programa avalia a temperatura e a umidade em determinado ambiente, e calcula as cargas eventuais de climatização (ÉCOLE DES MINES DE PARIS, 1987).

5.5 O programa Archipack

O Archipak (Architectural Package) foi desenvolvido por Steven Szokolay, 1987, para a simulação de desempenho térmico de edificações e de sistemas

solares passivos. Permite uma análise climática integrada com a geometria solar e representa uma ferramenta simples para análise térmica baseada no método da admitância (SZOKOLAY, 1987).

6. Um estudo comparativo entre os programas de simulação do desempenho térmico de edificações

6.1. Estudos para um projeto padrão

Segundo RAUBER et al, 1993, foram comparados três softwares: ARCHIPACK (versão 1.0), THEDES (versão 3.0), e ARQUITROP (versão 3.0).

Na comparação entre os três programas, foi analisada uma casa popular térrea, em um dia real, com alta radiação solar (17 de janeiro de 1991) em Florianópolis. Os resultados obtidos foram estudados por quatro usuários diferentes.

A seguir são apresentadas as características do modelo estudado:

Cidade: Florianópolis, SC.

Latitude: 27°35'; Longitude: 48°35'

Vento dominante: NE

Data: 17 de janeiro

Ventilação: N=0, 10, 17 (N=número de renovações por hora)

Ocupação: 0 pessoas;

Janelas: abertas e fechadas (Conforme o número de renovações de ar).

Componentes

Cobertura:

- Telha de cimento amianto escurecida: $e=0,006$; $d=1600$; $\lambda=0,4$; $c=1000$; $\alpha=0,8$
- Forro de madeira: $e=0,010$; $d=600$; $\lambda=0,14$; $c=1000$;

Parede:

- Tijolo maciço aparente: $e=0,100$; $d=1650$; $\lambda=0,84$; $c=800$; $\alpha=0,6$

Janela:

- Armação de madeira (20% da área de janela): $\lambda=0,14$; $c=1200$;
- Vidro: $e=0,003$; $\alpha=0,07$; $\tau=0,85$; $\rho=0,08$;

Porta:

- Madeira: $e=0,020$; $d=600$; $\lambda=0,14$; $c =1200$; $\alpha=0,6$

Piso:

- Concreto: $e=0,050$; $d=2000$; $\lambda=1,13$; $c =1000$; $\alpha=0,5$
 - Solo argiloso: $d=1500$; $\lambda=1,1$; $c =1000$; Albedo=0,2

Onde:

α : absorptividade;

ρ : refletividade;

τ : transmissividade;

c : calor específico (J/kg.K);

e : espessura (m);

d : densidade (kg/m³)

λ : condutividade (W/m.K).

Para que as edificações apresentassem condições similares, embora com características diferenciadas, foram feitas as seguintes considerações:

- No programa Arqitrop estabeleceu-se uma área de ventilação de 4,9 m² para que houvesse um número de 10 trocas de ar por hora;
- Como não é possível a entrada de dados de radiação solar, considerou-se no programa Arqitrop nebulosidade zero;
- O programa Thedes não prevê que componentes internos não existem, supôs-se um componente interno fictício de área 0 m² e resistência superficial interna 0,0123 W/m²K e 0 camadas;
- Em relação à camada de ar da cobertura, entrou-se com espessura e condutividade fictícias para se obter a resistência apropriada para o programa Thedes.

Os resultados das simulações, dadas determinadas condições, serão apresentados a seguir.

6.1.1. Quanto à temperatura:

No caso de uma ventilação nula, os picos de temperatura dos programas ARCHIPACK e THEDES se aproximam, mas ocorrendo em horários diferentes, com uma diferença de duas horas entre si. No programa Arqitrop as temperaturas são mais baixas durante todo dia, com horário de pico coincidindo com o programa ARCHIPACK.

No caso de 10 trocas de ar por hora, as características também se verificam, porém as temperaturas tornam-se mais próximas.

6.1.2. Quanto ao fluxo de calor

a) Através das paredes

O programa Thedes apresentou ganhos maiores de calor, tendo seu máximo às 20 horas, enquanto que no Archipack o pico ocorre às 17 e no Arqitrop às 18 horas.

b) Através das janelas

No programa Arqitrop os vidros da fachada sul apresentam perda de calor no período diurno com ganhos no período noturno, enquanto que o programa Thedes ocorre ganho de calor pelas janelas durante o período noturno, demonstrando um retardo maior na transmissão de calor que nos outros programas.

c) Através da cobertura

O comportamento dos fluxos de calor apresenta similaridades para os programas, com máximo ganho às 12 horas para os programas Arqitrop e Archipack e às 13 horas para o Thedes.

d) Através do piso

No programa Thedes os ganhos são praticamente nulos e as perdas são constantes no Arqitrop e no Archipack, sendo as perdas maiores para os casos de ventilação nula que com ventilação 10 trocas por hora.

e) Por ventilação

Os programas Arqitrop e Archipack apresentam perdas durante todo o dia, sendo maiores nos horários de maior temperatura interna. O programa Thedes apresenta ganhos durante o dia e perdas à noite. Durante o dia a temperatura interna é maior que a externa; sendo assim, espera-se mesmo que a ventilação signifique perda de calor.

f) Fluxos totais (paredes + janelas + pisos + cobertura + ventilação)

No resultado total os fluxos são bastante parecidos, com ganhos maiores no programa Thedes. Nos programas Arqitrop e Archipack há um balanço entre ganhos e perdas, enquanto que no Thedes os ganhos são maiores que as perdas.

6.1.3. Interface programa – usuário

a) Programa Archipack

Três usuários mostraram boa concordância entre os resultados, diferenciando do usuário 2 devido à escolha do componente telhado, com uma transmitância $2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e admitância $2,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ com a inclinação correta, enquanto que os demais escolheram transmitância $2,58$ e admitância $2,67$ e inclinação falsa, ocasionando temperaturas mais altas para o usuário 2.

b) Programa Arqitrop

Houve boa concordância entre os resultados deste programa, diferenciando apenas pela cor da parede – todos os usuários optaram pela opção 2, enquanto que o usuário 3 escolheu a opção 4. esta escolha resultou numa maior absorvidade da parede, com uma maior temperatura interna.

c) Programa Thedes

Há uma boa concordância entre os usuários 1 e 3, com temperaturas mais baixas para o usuário 4, pois este escolheu uma janela de menor área. O usuário 2 também apresenta temperaturas mais baixas devido à especificação do componente telhado – escolheu a disposição de camadas do ambiente externo para o interno, enquanto que os demais escolheram o inverso.

6.1.4. Análise do estudo comparativo

Embora o método de cálculo utilizado seja o mesmo (admitância), os resultados apresentam algumas discordâncias.

Cada elemento influencia no ganho de calor de forma diversa, mas a cobertura da edificação tem maior influência para todos os programas.

Os resultados obtidos nas simulações não são suficientes para conclusões a respeito dos programas por não existir um padrão real de comparação.

Em todos os programas há um aumento da temperatura interna proporcional ao aumento de ganho de calor total, sendo que esta temperatura começa a cair com a diminuição do fluxo total, mesmo sendo consideráveis os ganhos totais de calor.

Além do estudo para um projeto padrão e da interface programa-usuário, foi elaborado também um estudo de sensibilidade para os mesmos programas, segundo o mesmo projeto. Isto quer dizer que foram estudados os resultados obtidos com a variação de parâmetros específicos dentro deste projeto padrão, fazendo um levantamento do comportamento dos programas e sua sensibilidade para estas variações, bem como comparando os resultados obtidos para os diferentes programas.

Além dos referidos softwares já comparados, foi incluído o programa Casamo-clim.

6.1.5 Análise de sensibilidade

Segundo VAN BELLEN, 1993, para cada simulação dentro do mesmo projeto padrão foi selecionado um parâmetro, mantendo fixas as demais características, sendo a ventilação considerada nula em todos os casos, a não ser no caso específico da variação da ventilação.

a) Espessura da parede

A espessura da parede foi considerada para os casos de 3, 8, 15 e 20 cm. Em todos os programas a temperatura máxima ocorre para o projeto com menor espessura de parede. No programa Thedes, porém, a temperatura máxima ocorre para a casa de espessura de parede 8 cm, embora esta temperatura esteja bem próxima da temperatura máxima para a parede de 3 cm. Em todos os programas a temperatura mínima não ocorre para as paredes de menor espessura, sendo a variação de temperatura máxima entre os programas de 5 °C, com o maior valor para o programa Thedes e o menor para o Casamo-clim. O horário de ocorrência varia de 13 às 17 horas. Para a temperatura mínima, a variação entre os programas é de 4°C, com ocorrência variando das 4 às 6 horas.

Com o aumento da espessura da parede a amplitude de variação da temperatura decresce, sendo isto mais visível nos programas Arqitrop e Casamo-clim.

Quanto ao fluxo de calor, há uma grande diferença entre os programas, embora o comportamento das curvas seja semelhante em todos os programas. O programa Thedes apresenta o maior fluxo de calor (3000 W), ficando o Arqitrop com 1000 W e Archipack com 750 W, sendo que o Casamo-clim não fornece estes resultados.

b) Absortividade da parede

Verifica a sensibilidade de acordo com a cor da parede, especificando para a absortividade, os valores 0,3, 0,6 e 0,9.

No caso do programa Arqitrop a entrada para a absortividade das fachadas encontra-se em uma escala de números de 1 a 5, que correspondem a

valores fixos da absorvidade, sendo que neste programa os valores da absorvidade são de 0,36, 0,54 e 0,90.

Para todos os programas, as máximas temperaturas ocorrem para as paredes com maior absorvidade, ocorrendo o contrário para as temperaturas mínimas. As maiores diferenças de temperatura para o período diurno ocorrem no programa Thedes. Nos demais programas o comportamento é muito semelhante, com a única diferença que o programa Casamo-clim apresenta o ponto de máxima temperatura um pouco mais tarde.

Paredes com maior absorvidade apresentaram maior ganho, assim como também apresentaram maior perda para estes mesmos casos, em todos os programas, mas mesmo assim esta perda não é capaz de reduzir a temperatura abaixo da dos outros projetos. Observou-se grande sensibilidade dos programas com as paredes orientadas para Oeste, fato este devido aos valores do fluxo de calor verificados após o horário das 12 horas.

c) Ventilação do ambiente

Foi variado o número de trocas de ar por hora para as simulações. No programa Arquitrop o valor máximo de trocas de ar por hora é de 30, sendo por isto este valor o máximo estipulado.

A variação de temperatura máxima entre os programas fica em torno de 6°C, sendo a máxima temperatura obtida com o programa Thedes e a mínima com o programa Casamo-clim. As máximas temperaturas ocorrem com ventilação nula para todos os programas. Para as temperaturas mínimas a variação de um programa para o outro é de 2 °C. O ponto de mínimo para as temperaturas varia entre os programas nos horários entre 4 e 8 horas e o ponto de máximo entre 13 e 18 horas.

Em todos os programas foi observado que o aumento da taxa de ventilação resulta em redução de temperatura a taxas cada vez menores. Para os programas Arquitrop e Casamo-clim a redução é pequena após atingir a taxa de 10 trocas de ar por hora.

Existem diferenças nos fluxos de calor para os três programas e no programa Thedes há um período em que a ventilação fornece calor ao ambiente.

d) Área envidraçada nas fachadas

Foram considerados os seguintes parâmetros: projeto sem janela, janela normal, 50% de janela, 100% de janela.

Nesta simulação foram obtidos alguns pontos discordantes entre os programas, diferenciando principalmente o fluxo de calor que atravessa as janelas. Quanto ao comportamento das curvas de fluxo qualitativamente há uma boa semelhança entre os programas Archipack e o Arqitrop, e nestes dois e no Thedes há uma queda de fluxo de calor pelas janelas das 12 às 14 horas. O pico de fluxo de calor ocorre para o Thedes entre 21 e 23 horas. No caso da área envidraçada 100% o programa Casamo-clim fornece uma temperatura mínima inferior à temperatura mínima externa, enquanto que para o programa Thedes a temperatura máxima atingida é muito superior à fornecida pelos outros programas, embora o ganho de calor através das janelas neste programa seja muito inferior ao ganho de calor fornecido pelo programa Archipack.

Nos programas Arqitrop e Archipack há uma leve queda de temperatura entre 11 e 13 horas, explicada talvez pela influência da cobertura na radiação que atravessa as janelas.

e) Tipo de piso

Todos oferecem a opção de piso em contato com o solo ou não, sendo simuladas as hipóteses do piso estar em contato com o solo ou não.

Os resultados desta simulação mostram as características diferenciadas para cada programa. Em cada variação as temperaturas ambientais não se alteram substancialmente, tendo os programas Archipack e o Thedes apresentado a maior variação. O programa Archipack apresenta variação de temperatura da ordem de 2 °C, enquanto que o programa Thedes apresenta uma diferença de 1 °C.

Os programas Archipack e o Arqitrop adotam para piso em contato com o solo perda de calor constante. O programa Thedes tem variação do fluxo de calor pelo solo durante o período. No caso de piso suspenso o programa Arqitrop tem perda de calor constante e os demais apresentam curvas senoidais. Todos os programas, à exceção do programa Thedes, apresentam perda de calor pelo piso durante todo o período. O programa Thedes apresenta ganho de calor para os dois casos, sendo os ganhos de calor ocorrendo em períodos das 0 às 11 horas e das 22 às 24 horas em piso em contato com o solo. Para piso sem contato com o solo o ganho de calor fica entre 11 e 22 horas.

f) Inclinação do telhado

Foram selecionadas inclinações de 0, 15, 30 e 45 graus. O programa Arqitrop não permite variação desta característica, por isso não foi possível compará-lo.

Os programas Archipack e o Casamo-clim apresentaram pouca variação em relação a esta simulação, enquanto que o programa Thedes tem grande sensibilidade a esta variável.

As diferenças de temperaturas entre os quatro programas são consideráveis.

6.1.6. Análise do estudo comparativo

Não é possível determinar a precisão dos programas, mas podem ser obtidas algumas conclusões:

- Quanto à espessura da parede, todos possuem um comportamento semelhante.
- A sensibilidade para a absorvidade é maior no programa Thedes.
- Os mais sensíveis quanto à ventilação são os programas Archipack e o Thedes, possuindo igual sensibilidade para a área envidraçada.
- Todos os programas têm pouca sensibilidade em relação ao piso.

- Apenas o programa Thedes tem variação de resultados com a modificação da inclinação do telhado.

6.2. Estudo para uma habitação popular padrão

Segundo ASSIS, 1993, foram comparados os softwares CASAMO-CLIM, versão Maio/88, e o ARQUITROP, versão 3.0. O projeto considerado foi o Conjunto Habitacional Jardim Cinelândia, projetado pela COHAB-MG, a ser implantado no município de Bonfinópolis de Minas. A habitação padrão é constituída por dois quartos, sala, banheiro e cozinha, com uma área de 35,57 m².

Os materiais utilizados são os seguintes: parede de tijolo cerâmico de seis furos, espessura de 13 cm; cobertura de telha de barro estruturada em madeira e sem forro; piso cimentado liso; esquadrias em perfis de ferro com vidro liso simples de 4 mm.

Foram analisadas duas unidades diferentes:

- a) O caso denominado 1, para o mês de setembro, com a janela do quarto voltada para noroeste (azimute 304° a partir do Norte);
- b) O caso denominado 2, para o mesmo mês, tendo sua janela voltada para o Sul (108° a partir do Norte).

Para que os dois programas apresentassem as condições mais semelhantes possíveis, foram estipulados os seguintes parâmetros:

- A entrada de dados climáticos no CASAMO-CLIM foi transportada dos dados calculados pelo programa ARQUITROP, bem como os dados de umidade relativa máxima e mínima;
- Os dados de comportamento térmico dos materiais de construção foram retirados do ARQUITROP, sendo ajustados no CASAMO-CLIM a fim de que os coeficientes globais de Transmissão Térmica (K) fossem iguais nos dois programas;
- Dados sobre a ocupação do ambiente (fontes internas de calor) foram considerados a partir do CASAMO-CLIM, sendo depois ajustadas estas informações ao ARQUITROP;

- A taxa de renovação de ar no ambiente foi calculada pelo ARQUITROP, sendo este valor transportado para o CASAMO-CLIM.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2, para os dois casos estudados, onde:

t_{ext} : temperatura externa do ar, em °C;

$U_{r_{ext}}$: umidade relativa do ar, em %;

t_{int} : temperatura interna do ar, em °C;

Clim: resultados obtidos do CASAMO-CLIM;

Arq: resultados obtidos do ARQUITROP.

Tabela 2: Resultados da simulação obtidos para os programas, nos dois casos.

c	Caso 1						Caso 2					
	t_{ext}		$U_{r_{ext}}$		t_{int}		t_{ext}		$U_{r_{ext}}$		t_{int}	
	Clim	Arq	Clim	Arq	Clim	Arq	Clim	Arq	Clim	Arq	Clim	Arq
3	16,3	16,6	94	91	19,8	22,9	12,5	12,9	94	91	16,4	19,0
6	16,1	16,0	95	95	18,5	22,8	12,3	12,2	95	95	15,1	18,9
7	17,5	16,9	90	89	19,7	20,6	13,7	13,1	90	89	15,2	16,8
8	19,6	18,7	82	80	22,0	23,2	16,0	15,0	81	79	16,2	19,3
9	22,3	21,5	72	67	24,5	26,4	18,7	17,9	71	66	17,7	22,4
10	25,0	24,8	61	54	27,1	29,8	21,5	21,3	60	53	19,8	25,8
11	27,7	28,1	51	44	29,6	32,8	24,2	24,7	50	43	22,0	28,8
12	29,8	30,1	43	39	31,6	34,6	26,5	26,8	41	38	23,9	30,8
13	31,2	31,3	38	-	33,2	35,4	27,9	28,0	36	-	25,6	31,7
14	31,7	31,7	36	36	34,0	35,2	28,4	28,4	34	34	26,9	31,6
15	31,5	31,4	37	-	34,0	34,4	28,2	28,1	35	-	27,7	30,8
16	31,0	30,7	39	38	33,3	33,5	27,7	27,4	37	36	27,8	29,2
17	30,2	29,8	42	-	31,9	32,2	26,8	26,4	40	-	27,2	27,3
18	29,0	28,7	46	43	30,2	31,0	25,7	25,3	44	41	26,0	25,6
21	24,5	24,8	63	-	26,3	25,7	21,0	21,3	62	-	22,6	22,0
24	19,6	20,4	82	71	23,1	25,8	16,0	16,8	81	71	19,5	20,5

Fonte: ASSIS, E., PINTO, J. p. 133 (modificado).

As figuras de 10 a 13 a seguir apresentam o comportamento dos estudos na forma gráfica.

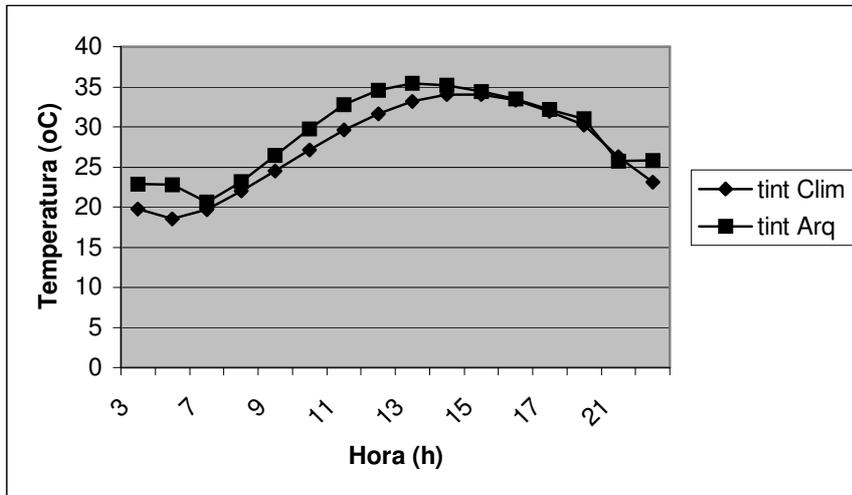


Figura 10: Comparação entre valores obtidos para t_{ext} – Caso 1.

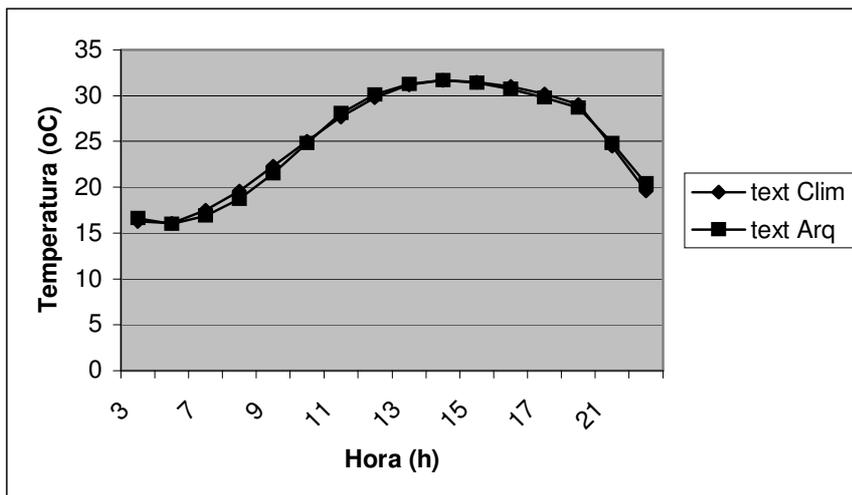


Figura 11: Comparação entre valores obtidos para t_{int} – Caso 2.

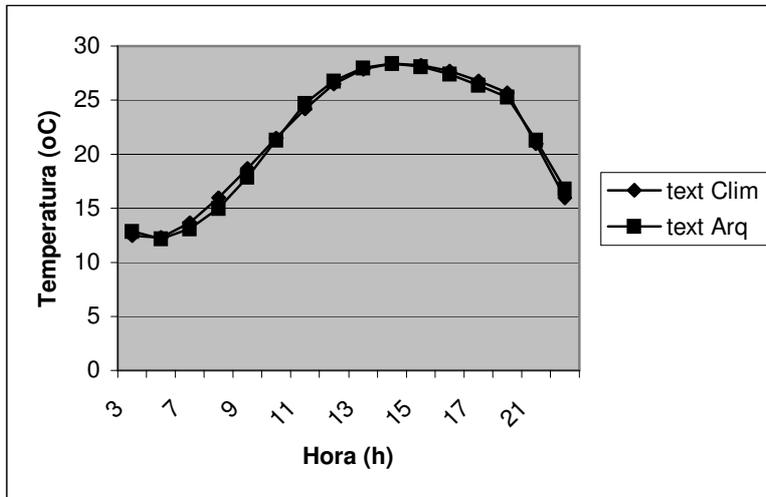


Figura 12: Comparação dos dados obtidos para t_{ext} – Caso 2.

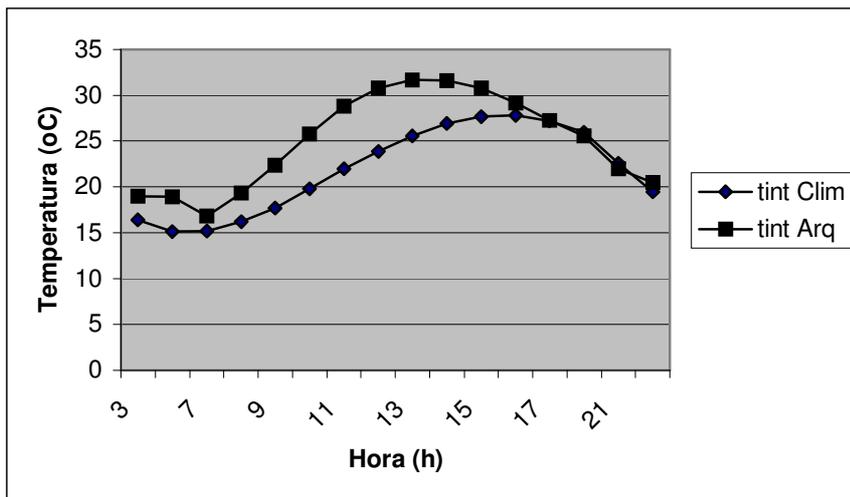


Figura 13: Comparação dos dados obtidos para t_{int} – Caso 2.

A partir destes resultados, concluiu-se que os programas apresentam algumas discrepâncias, as quais, porém, não são contraditórias. Os autores observam também que não é possível concluir sobre a precisão dos modelos empregados nos programas de simulação, pois não foram realizadas medições para validar os mesmos. É também mencionado que a informação gerada pelos programas é de grande utilidade para uma revisão do projeto quanto aos problemas encontrados.

7. O modelo da admitância

7.1. Considerações teóricas

De acordo com MILBANK & LYNN, 1974, a transferência de energia através de uma edificação pode ser considerada em dois estágios: primeiramente, as trocas por radiação e convecção nas superfícies de um espaço fechado e após, a transferência de energia, principalmente por condução, através dos elementos limitantes do espaço.

O uso de um índice de temperatura, a temperatura ambiental, para tratar os intercâmbios por radiação e convecção, foi proposto por DANTER, 1973 (citado em MILBANK & LYNN, 1974), para o estado estacionário. O mesmo raciocínio pode ser usado para mostrar que é um índice adequado também para regime variável. Nessa mesma proposta, os autores adotam esta aproximação, com a implicação de que há um ponto ambiental pelo qual a energia ingressa no espaço. É apenas necessário, portanto, considerar as transferências de energia no envelope do edifício.

A distribuição unidirecional de temperatura imposta à condução através de um elemento construtivo, normal ao plano do elemento, é definida pela equação de Fourier:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad \text{(Equação 33)}$$

Onde:

θ : tempo;

x : distância;

t : temperatura;

$$\alpha: \text{difusividade térmica do material} \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad \text{(Equação 34)}$$

λ : condutividade térmica do material;

ρ : densidade do material;

c: calor específico do material.

Soluções para a equação de Fourier geralmente caem em um dos dois tipos: aqueles nos quais as variações de temperatura e energia com o tempo são estáveis ciclicamente, isto é, repetem-se num certo número de dias, e aqueles onde a temperatura e energia variam de maneira imprevisível dia após dia.

Soluções para o primeiro tipo têm a forma mais simples, da qual vem o método da admitância.

Soluções para o segundo tipo são mais complexas e são a base da maior parte das técnicas análogas tanto quanto os fatores de resposta desenvolvidos por STEPHENSON e MITALAS, 1967 e adotado pela ASHRAE, 1972.

Quando se adota a solução cíclica estável, é mais fácil considerar variações senoidais simples. Com esta aproximação, o problema pode ser analisado em dois estágios. Primeiramente há a transferência média de calor para o ambiente, como se fosse uma transferência no estado estacionário convencional; em segundo há a troca cíclica em torno da condição média. As trocas cíclicas podem ser mais bem visualizadas considerando a figura 14, que mostra uma camada homogênea entre dois espaços.

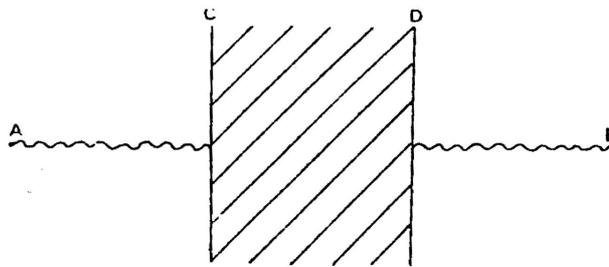


Figura 14: energia pode penetrar no sistema pelos pontos A e B e pelas superfícies C e D (MILBANK & LYNN, 1974).

A energia pode ser fornecida pelos pontos de temperatura ambiental A ou B e pelas superfícies exteriores C ou D. A figura 15 ilustra os ciclos de temperatura induzidos por uma variação senoidal de temperatura em A, enquanto se mantém a temperatura em B constante.

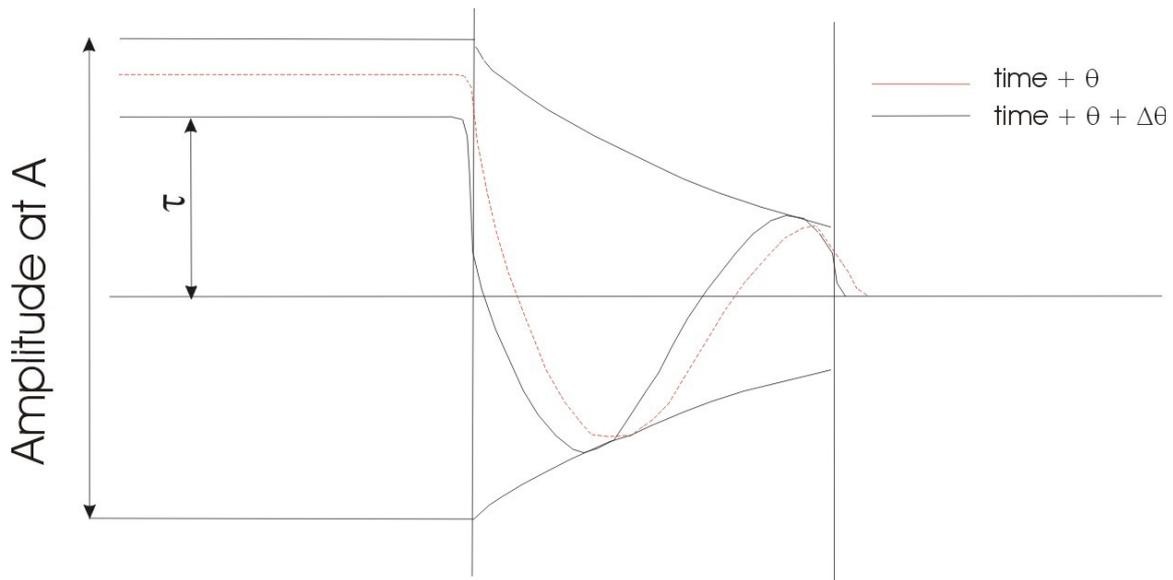


Figura 15: Variação cíclica da temperatura em A induz um ciclo cuja amplitude se reduz com a distância através do material (adaptado de MILBANK & LYNN, 1974).

As flutuações em A dão origem a ciclos de temperatura de menor amplitude, os quais decaem exponencialmente através do material. Mudanças de fase ocorrem em cada interface superfície/ar e também entre as superfícies do material. Duas relações entre temperatura e energia são de interesse nesse caso:

- a energia cíclica em A, que causa o ciclo de temperatura de A,
- a transferência cíclica através do material até B, que resulta do balanço de temperatura de A.

Diagramas similares podem ser construídos para ganhos de energia em uma superfície.

Obviamente, no mundo real, haverá usualmente os ganhos de energia nas duas superfícies, tanto quanto nos dois pontos ambientais. Felizmente, o efeito total dessas transferências pode ser obtido somando o efeito separado de cada relação entre temperatura e energia, fazendo-se a consideração usual de que as características térmicas são constantes num intervalo relevante de temperatura.

A solução para estas equações de condução cíclica é dada em livros-texto e será apresentada mais adiante. Três fatores podem ser desenvolvidos, cada um

dependendo da espessura e das propriedades térmicas dos materiais, bem como da frequência da excitação senoidal. Os fatores são expressos como números complexos, o que em termos práticos significa que cada valor é associado a uma mudança de fase, que pode ser temporal ou espacial.

Técnicas comparáveis, baseadas no comportamento cíclico, foram desenvolvidas por MUNCEY et al (1971), RAO & CHANDRA (1971) e TAVERNIER (1972), entre outros.

7.2. Admitância

A admitância, Y , fator que dá o nome ao procedimento, é definida como a quantidade de energia (q_i) que ingressa pela superfície, por balanço unitário de temperatura (t_i) no ponto ambiental. A admitância é definida como a recíproca da resistência térmica, ou impedância, de um elemento para o fluxo cíclico de calor no ponto ambiental e tem as mesmas unidades de U ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$). A admitância é expressa pela equação .

$$Y = \frac{q_i}{t_i} \quad \text{(Equação 35)}$$

Para camadas homogêneas, a figura 16 mostra como a admitância e o ciclo de tempo variam com a densidade e espessura, quando o período é de 24 horas. Para camadas menores que 75 mm de espessura o valor da admitância aproxima-se do valor U da estrutura, enquanto que para espessuras da ordem de 200 mm, a admitância tende a um valor constante. Em comparação com materiais leves, construções densas têm admitâncias maiores, isto é, eles absorvem mais energia para um determinado balanço de temperatura, e é esta característica que determina a descrição da resposta térmica em termos como “material leve” ou “material pesado”. Para componentes de camadas múltiplas, a admitância é determinada primeiramente pela camada superficial de até 300 mm. Uma camada com 25 mm de isolante na superfície responderia mais como um material leve que um pesado.

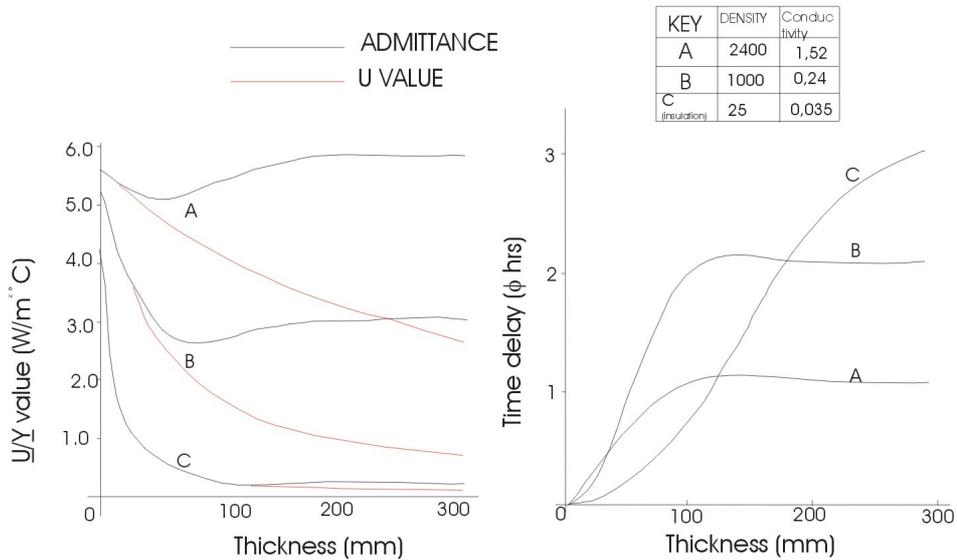


Figura 16: Admitância e retardamento x espessura e densidade para ciclos de 24 horas em superfícies externas (adaptado de MILBANK & LYNN, 1974).

Freqüências mais altas têm o efeito de aumentar a admitância e reduzir o atraso, como mostrado na figura 17, sendo que os materiais A, B e C seguem as mesmas características da figura anterior.

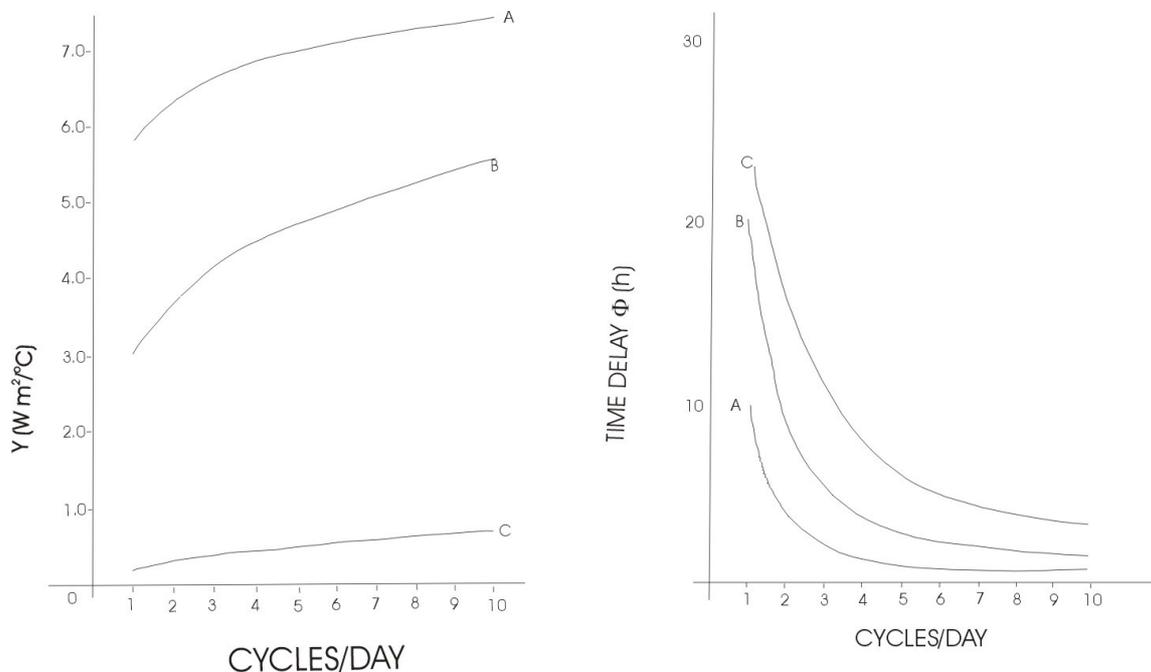


Figura 17: o efeito da freqüência na admitância e atrasos de tempo para superfícies externas (adaptado de MILBANK & LYNN, 1974).

7.3. Fator Decremento

O fator decremento f é a razão da transmitância cíclica e o valor de U em regime estacionário, e é dados por:

$$f = \frac{q_o}{t_i \cdot U} \quad \text{(Equação 36)}$$

Este fator foi introduzido por DANTER, 1960, e tem sido bastante utilizado para cálculo da transferência por condução, associada com variações diárias de temperatura sol-ar.

7.4. Fator de superfície

O fator de superfície, F , fornece a energia cíclica equivalente no ponto ambiental devido à entrada cíclica de energia numa superfície. É a proporção do ganho de calor na superfície que é readmitido para o ponto ambiental quando as temperaturas são mantidas constantes. É dado por:

$$F = \frac{q_i}{q} \quad \text{(Equação 37)}$$

Fatores de superfície para camadas homogêneas sujeitas a ciclos de 24 horas são mostrados na figura 18, valendo também nestes gráficos as características de A, B e C das figuras anteriores.

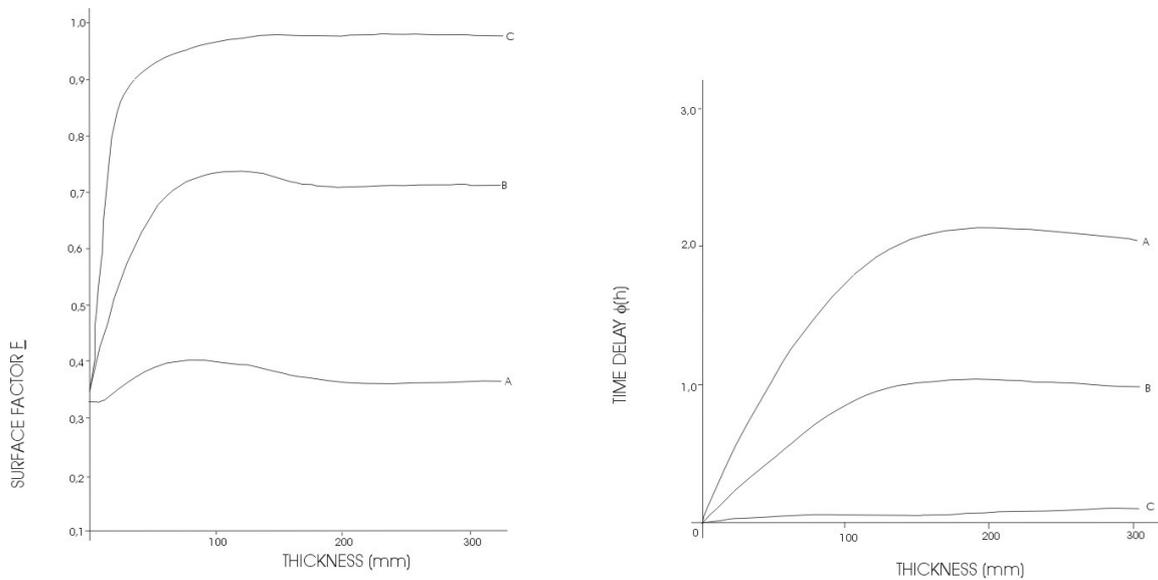


Figura 18: fator de superfície x espessura e densidade para ciclos de 24 horas em superfícies externas (adaptado de MILBANK & LYNN, 1974).

Quando elementos não são simétricos em relação a seu centro, dois valores de admitância e fator de superfície são necessários para cada elemento, desde que um ciclo de energia em uma face produzirá uma resposta para o mesmo ciclo na face oposta. O fator de decremento é, de qualquer maneira, o mesmo em ambas as direções.

7.5. O caso especial de divisões internas

O cálculo de transferências de energias entre divisões internas pode ser simplificado quando elas separam diferentes espaços com condições térmicas idênticas. Isto é feito modificando seus valores de admitância e fator de superfície, incluindo o efeito da transmissão cíclica através da divisão. Considere-se a figura 19a, que mostra uma parede de admitância Y , sujeita a um ciclo de temperatura t para cada ponto ambiental.

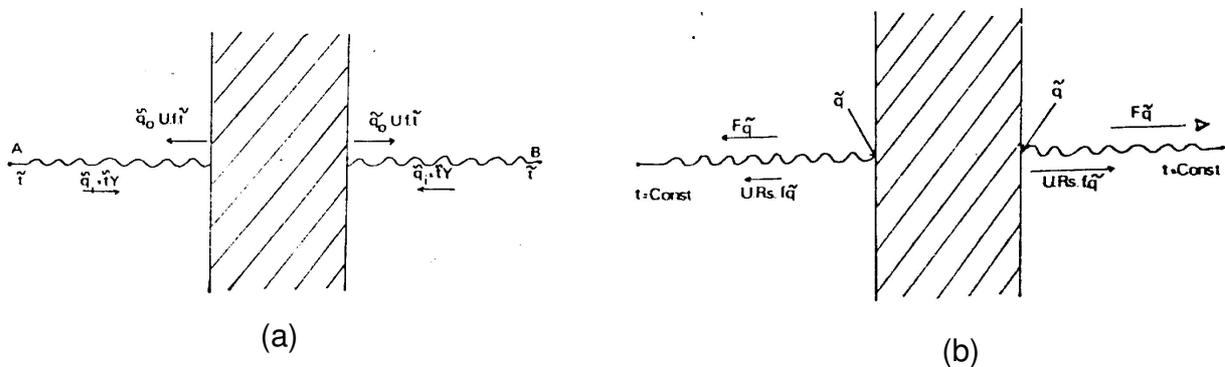


Figura 19: para divisões internas: (a) ciclos de energia como um resultado da diferença de duas temperaturas ambientais; (b) ciclos de energia como um resultado das entradas de energia (MILBANK & LYNN, 1974).

Este ciclo induz um fluxo em cada superfície, de magnitude tY , e passa através da parede com magnitude Uf . O fluxo líquido, q , em cada ponto ambiental é então

$$\begin{aligned}
 q &= tY - Uf\bar{i} \\
 &= (Y - Uf)t
 \end{aligned}
 \tag{Equação 38}$$

Assim, através de uma admitância modificada $(Y-Uf)$, não há necessidade de realizar cálculos separados para admitância e fator decremento. O efeito dessa mudança é a redução da admitância das divisões internas a zero (figura 20). Com o aumento da espessura, o efeito da correção torna-se menos importante.

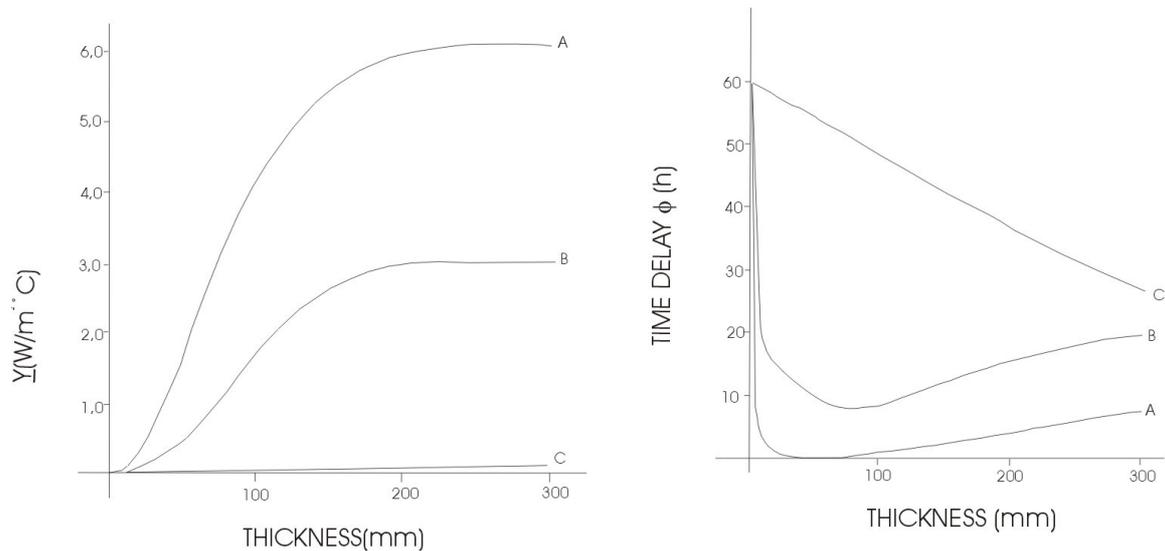


Figura 20: admitância x espessura e densidade para superfícies internas (ciclo de 24 horas) (adaptado de MILBANK & LYNN, 1974).

Similarmente a figura 19(b) mostra as transferências de energia para o ponto ambiental que resulta dos ganhos de energia, q , nas duas superfícies do elemento (nesse caso as temperaturas ambientais são mantidas constantes).

A transferência líquida de energia para cada ponto ambiental é

$$Fq + UfR_s q = (F + UfR_s)q \quad \text{(Equação 39)}$$

onde o fator $(F+UfR_s)$ combina o efeito do fator superfície e o fator decremento. Para estas divisões o fator de superfície modificado tende à unidade; com o acréscimo de espessura ele aproxima-se de um valor constante.

Um vetor aritmético pode ser usado para representar estas admitâncias modificadas e os fatores de superfície, de modo a se avaliar os diferentes atrasos associados a cada fator.

7.6. Aplicação do modelo da admitância

7.6.1. O uso dos fatores para freqüência fundamental

A resposta térmica tem sido freqüentemente considerada para o caso de ingresso senoidal de energia. Na prática, uma onda senoidal pura para o ciclo de temperatura supõe que os ciclos de energia e de temperatura se repetem dia após dia. O ciclo real pode então ser dividido em uma série de termos senoidais, com acréscimo de freqüência e amplitude reduzida, em geral. Estes termos são chamados de fundamentais e harmônicos do ciclo de entrada. Quando cada termo senoidal é combinado com as admitâncias, fatores de superfície e fatores de decaimento apropriados para sua freqüência, a previsão da temperatura final é obtida somando os resultados de cada harmônico.

Para tornar os cálculos mais fáceis, Danter, 1973, propôs que os fatores para freqüência fundamental de 24 horas sejam aplicados para o ciclo real de energia. Esta idéia é a base para o método da admitância. Trata-se de uma aproximação, pois os fatores dependem da freqüência de excitação. De qualquer maneira, para muitos problemas, particularmente aqueles relacionados a ganhos solares, ventilação e transferências por condução, a aproximação é aceitável.

A extensão da aproximação dependerá, em proporções relativas, das freqüências no ciclo de entrada tanto quanto dos parâmetros térmicos do ambiente. Como exemplo, a figura 21 analisa uma comparação dos primeiros seis harmônicos com o método da admitância. O cálculo é para o balanço de temperatura resultante da radiação solar incidindo no piso de um cômodo voltado para sudoeste, em agosto.

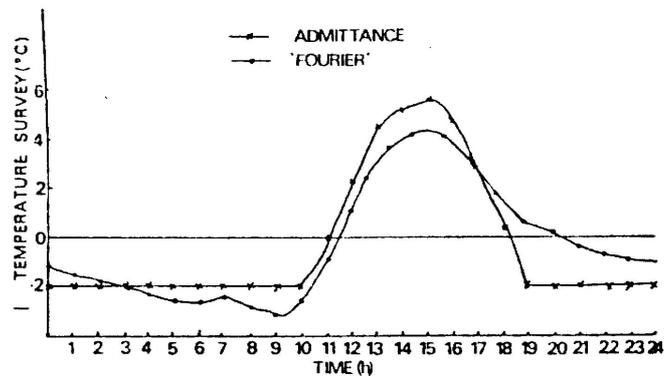


Figura 21: comparação do método da admitância e da análise de Fourier para radiação solar incidindo em uma estrutura pesada (MILBANK & LYNN, 1974).

Para temperaturas de pico, as quais são usualmente as de maior interesse, a diferença entre as duas soluções é da ordem de 10% da diferença de temperatura. Como as diferenças de temperatura em construções projetadas raramente passam de 10° C, o erro ao usar a aproximação é da ordem de 1° C. Quando os cálculos são feitos para todas as cargas, isto é, lâmpadas, ocupação, ventilação e condução, a precisão do modelo simples tende a aumentar, visto que a carga total estará mais perto da senoidal.

7.6.2. Condições de ocupação

Os usuários também têm influência sobre as condições internas, uma vez que na maioria das construções eles controlam o uso de luzes, dispositivos de sombra e a quantidade de ar entrando pelas janelas. Independente do método de cálculo, considerações devem ser feitas sobre estas atividades. No método da admitância, supõe-se que os mesmos eventos ocorrerão sempre no mesmo horário, todos os dias.

7.7. Uso do modelo

7.7.1. Variações na temperatura interna do ambiente

O valor principal da variação de temperatura ambiental interna é calculado pela equação 40:

$$t_{ei} = \frac{Q_x}{\sum AY + C_v} \quad \text{(Equação 40)}$$

onde:

t_{ei} : diferença de temperatura entre ambientes interno e externo.

$\sum AY$: somatória do produto das áreas (A) pelas admitâncias (Y, obtidas segundo o tipo de material de construção, como mostrado na tabela , em anexo) de cada componente empregado no estudo.

Q_x = ganho de calor cíclico no ponto ambiental, em W;

C_v = termo de condutância por ventilação em W/°C, obtido pela equação 41.

$$\frac{1}{C_v} = \frac{3}{NV} + \frac{1}{4,8 \sum A} \quad \text{(Equação 41)}$$

Onde:

N: número de renovações de ar por hora no ambiente;

V: volume do ambiente, em m³;

$\sum A$: somatória das áreas de aberturas existentes.

7.7.2. Ganhos cíclicos no ponto ambiental

A. Através de superfícies externas opacas

O ganho cíclico Q_f através da estrutura opaca é dado por:

$$\begin{aligned} Q_f &= \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) t_{eo} \\ &= \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) t_{ao} + \sum_{i=1}^a (f_i A_i U_i) (R_s \alpha I_\tau) \end{aligned} \quad \text{(Equação 42)}$$

Onde:

f: fator decremento, obtido da tabela A.1 do anexo 1.

A: área da superfície considerada;

U: transmitância térmica para a superfície considerada, em $W/m^2\text{°C}$;

αI_τ : radiação solar cíclica total absorvida pela superfície, em W/m^2 ;

R_s : resistência superficial externa em $m^2\text{°C}/W$;

t_{eo} = temperatura sol-ar em °C ;

t_{ao} : temperatura cíclica externa em °C .

A temperatura cíclica externa pode ser calculada conforme o método Deplanches, dado pela fórmula

$$T(h) : MAX - B(h)(MAX - MIN) \quad \text{(Equação 43)}$$

Onde:

T(h): temperatura no momento "h" (variação horária);

MAX: temperatura média das máximas do mês considerado;

MIN: temperatura média das mínimas do mês considerado;

B(h): fator multiplicador para o momento "h", fornecido pela tabela 3.

Tabela 3: valores horários para o fator multiplicador B(h).

Hora	B(h)	Hora	B(h)
1	0,800	13	0,025
2	0,875	14	0,00
3	0,936	15	0,020
4	0,980	16	0,060
5	1,00	17	0,120
6	0,975	18	0,185
7	0,920	19	0,255
8	0,805	20	0,340
9	0,635	21	0,428
10	0,427	22	0,510
11	0,225	23	0,600
12	0,097	24	0,700

Fonte: RORIZ, M., 1991.

Os valores de t_{e0} , t_{a0} e $\alpha_l \tau$ são cíclicos, com período de 24 horas; por isso são apresentados com variação horária.

B. A condução cíclica através do vidro

As trocas cíclicas Q_v através do vidro, sem considerar a radiação solar, são dadas por:

$$Q_v = AUt_{a0} \quad \text{(Equação 44)}$$

Onde:

Q_v : ganho de calor solar através do vidro, em W;

A: área ocupada pelo vidro, em m²;

t_{a0} : temperatura externa do ar obtida no item anterior, em °C.

Considera-se o fator decremento como unitário, devido à pequena inércia térmica. O efeito da radiação solar no vidro é tratado separadamente.

C. Ganhos solares através do vidro

Segundo ASSIS, 1998, “a transmissão através dos vidros depende principalmente de fatores como o ângulo de incidência da radiação, a espessura, a composição química e a característica superficial do vidro”.

Com relação ao ângulo de incidência da energia solar, a transmissão diminui à medida que o ângulo se torna superior à 45°. Acima de um ângulo de 60°, a radiação incidente transmitida diretamente através do vidro diminui muito, aumentando muito seu coeficiente de reflexão.

Com relação à espessura do vidro, quanto maior a mesma, menor será a transmissão, devido à absorção que ocorre no material, sendo que em vidros coloridos o aumento da espessura implica em redução na luz visível.

A absorção de radiação solar é seletiva em relação a determinados comprimentos de onda e, dependendo da composição, pode ser reduzida à transmissão total do vidro.

A textura do vidro pode reduzir a transmissão direta caso seja rugosa, difundindo a radiação incidente.

O fator de ganho solar S é usado para calcular o ganho principal de energia através da janela e veneziana combinada. Ele não é afetado pelo tipo de construção da parede. Segundo LOUDON, 1970, o ganho de calor pelos vidro, devido à radiação solar, é dado por:

$$Q_{VR} = S \cdot I_T \quad \text{(Equação 45)}$$

Onde:

Q_{VR} : ganho de calor devido à radiação solar no vidro, em W;

I_T : radiação total incidente na superfície vertical, em W/m^2 ;

S : fator solar para o vidro, definido, segundo CROISSET, 1968, como:

$$S = \frac{\alpha U}{h_e} + \tau \quad \text{(Equação 46)}$$

Sendo τ a transmitância total do vidro devido à radiação solar, α a absorptância, U a transmitância térmica total e h_e a condutância superficial externa.

D. Ganhos casuais

O tratamento de ganhos casuais gerados internamente, isto é, ocupação, luzes, etc, supõe que estes ganhos são imediatamente realizados como carga do ambiente.

- Ganhos de calor devidos à presença humana: quantificados de acordo com a atividade exercida pelo organismo humano no ambiente, A tabela 4 apresenta valores de calor metabólico para algumas atividades de acordo com a norma ISO 7730, 1994. Para se obter o valor por pessoa, é necessário multiplicar pela área superficial média do corpo humano, que é de $1,8 \text{ m}^2$ para o homem e $1,6 \text{ m}^2$ para a mulher (Ruas, 1999).

Tabela 4: Produção de calor, em relação à área superficial do corpo humano (W/m^2) para alguns tipos de atividades

Atividade	Metabolismo	
	W/m^2	met ²
Reclinado	46	0,8
sentado, relaxado	58	1,0
atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
em pé, atividade leve (compras, indústria leve, laboratório)	93	1,6
em pé, atividade média (trabalho com máquina, doméstico)	116	2,0
andando em superfície nivelada a 2 km/h	110	1,9
andando em superfície nivelada a 3 km/h	140	2,4

Fonte: ISO 7730/1994

- Ganhos de calor devidos ao sistema de iluminação artificial: a energia elétrica convertida em luz gera calor sensível, que é dissipado, por radiação, às superfícies circundantes, por condução através dos materiais existentes e por convecção para o ar. Assim, lâmpadas incandescentes, que convertem 10% de sua potência elétrica em luz, apresentam os outros 90% convertidos em calor; lâmpadas fluorescentes apresentam 25% de sua potência elétrica convertida em luz, restando 75% convertidos em calor mais 25% da potência nominal da lâmpada sob forma de calor ao ambiente devido ao reator.
- Ganhos de calor devidos a motores e equipamentos: adota-se comumente 60% da potência nominal dos aparelhos elétricos como calor cedido ao ambiente. A tabela 5 apresenta alguns valores de potências médias para aparelhos elétricos.

² O met foi definido como unidade de taxa de metabolismo e corresponde à taxa de produção de energia por unidade superficial do corpo de uma pessoa descansando na posição sentada: 1 met = 58,2 W/m^2

Tabela 5: :potências aproximadas de aparelhos eletrodomésticos.

Aparelhos	Potência (W)
Aquecedor elétrico (residencial)	1000 a 1500
Aquecedor elétrico (comercial)	2000 a 6000
Ar condicionado portátil (1 HP)	1200
Ar condicionado portátil (2HP)	2400
Aspirador de pó	250 a 800
Barbeador	8 a 12
Cafeteira	500 a 2000
Chuveiro elétrico	1500 a 4000
Exaustor	300 a 500
Ferro elétrico	400 a 850
Ferro elétrico a vapor	660 a 1200
Fogão elétrico	4000 a 6000
Geladeiras comerciais (½ a 1 HP)	450 a 1000
Geladeiras domésticas	150 a 300
Irradiador de calor	500 a 1000
Lavadora de pratos	600 a 1000
Lavadora de roupas	600 a 800
Liquidificador	120 a 250
Máquina de costura	60 a 90
Rádio	40 a 150
Secador de cabelos	350 a 1200
Secadora de roupas	4000 a 5000
Televisão	200 a 400
Torradeira	500 a 1200
Ventilador portátil	50 a 200

Fonte: FROTA & SCHIFFER, 1995.

7.8. Vantagens do método

A principal vantagem do método da admitância é que a determinação de temperatura e energia aceitáveis é dada por um procedimento simples de resolver. Além disso, os três parâmetros, admitância, fator decremento e fator de superfície dão aos projetistas uma indicação qualitativa do provável comportamento das construções. De qualquer maneira, todas as técnicas de cálculo partem de suposições incertas, com aproximações e restrições, e o método da admitância deve ser visto como uma técnica de cálculo que fornece respostas realistas para o problema de temperaturas cíclicas aceitáveis em construções.

8. Cálculo dos valores de admitância

Embora consultando MILBANK & LYNN, 1974, fosse possível ter acesso a alguns valores de admitância, para o desenvolvimento do trabalho os mesmos não eram suficientes, por tratar de componentes que não atendem às condições construtivas do nosso país. Por isso, foi necessário estudar o modelo de cálculo proposto pelos autores.

De forma breve, serão descritos a seguir os cálculos dos valores procurados.

Para camadas finitas, a temperatura e os ciclos de energia podem ser relacionados através de uma matriz algébrica, pela equação:

$$\begin{bmatrix} t_e \\ q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ D & A \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} t_i \\ q_i \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 47)}$$

Onde

$$t_e = At_i + Bq_i \quad \text{(Equação 48) e}$$

$$q_e = Dt_i + Aq_i \quad \text{(Equação 49)}$$

Para um ingresso senoidal:

t_e : temperatura na superfície e (externa)

q_e : fluxo de calor na superfície e

t_i : temperatura na superfície i (interna)

q_i : fluxo de calor na superfície i

$$A = \cosh[(1+i)\phi] \quad \text{(Equação 50)}$$

$$B = R \sinh[(1+i)\phi] (1+i) \phi \quad \text{(Equação 51)}$$

$$D = \frac{(1+i) \sinh[(1+i)\phi]}{R} \quad \text{(Equação 52)}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega e^2}{2\alpha}} \quad \text{(Equação 53)}$$

R: resistência térmica da camada

$$(R=e/\lambda) \quad \text{(Equação 54)}$$

ω : 2π x frequência de entrada de calor

λ : condutividade do material da camada

α : difusividade térmica do material da camada

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad \text{(Equação 55)}$$

ρ : densidade do material;

c : calor específico do material;

e : espessura do componente.

Para um componente constituído de várias camadas de material homogêneo, a matriz transforma-se em:

$$\begin{bmatrix} t_e \\ q_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_i \\ q_i \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 56)}$$

onde

R_{se} : resistência superficial externa;

R_{si} : resistência superficial interna.

$$\begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ D_1 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ D_2 & A_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ D_n & A_n \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 57)}$$

Onde $A_1, B_1, D_1, \dots, A_n, B_n, D_n$ são os coeficientes para cada camada da estrutura, aplicando-se a regra de multiplicação de matrizes.

8.1. A admitância Y

A admitância Y de t_0 a t_i é dada por

$$Y_{ei} = \frac{1}{Z_{ei}} \quad \text{(Equação 58)}$$

onde Z_{ei} é a impedância da camada da superfície transmissora, com temperatura t_e , para a receptora, com temperatura t_i , dada por

$$Z_{ei} = R_{se} + \frac{ER_{si} + F}{GR_{si} + H} \quad \text{(Equação 59)}$$

8.2. Fator Decremento f

O fator decremento f de t_0 a t_i é dado por

$$f = \frac{1}{U(ER_{si} + R_{si}R_{se}G + R_{s0}H + F)} \quad \text{(Equação 60)}$$

Onde

$$U = \frac{1}{R_{se} + R + R_{si}} \quad \text{(Equação 61)}$$

8.3. Exemplo de cálculo

Para a derivação do modelo da admitância, conforme já ilustrado anteriormente, verifica-se que suas equações apresentam números reais e complexos. Isso exige um maior desenvolvimento do cálculo, que será explicado no Anexo 3.

9. Cálculos realizados segundo o método da admitância

Os cálculos a seguir fornecem uma ilustração dos cálculos adotados para se obter os valores do fluxo de calor e da temperatura ambiental interna.

9.1 Cálculos para o fluxo de calor total

9.1.1 Cálculo para a temperatura interna

O cálculo da temperatura interna segue a equação apresentada por Danter, 1983, adotada por Sattler, 1986, e Szokolay, (1987, 1990) e citada em RORIZ (1996),:

$$t_h = \bar{t}_e + \frac{Q_{gh}}{Y_h} + \frac{(Y_h - U_h) \sum_{h=1}^{24} \left(\frac{Q_{gh}}{Y_h} \right)}{Y_h \sum_{h=1}^{24} \left(\frac{U_h}{Y_h} \right)} \quad \text{(Equação 62)}$$

Onde:

t_h : Temperatura interna no momento “h” (°C);

\bar{t}_e : média da temperatura externa no período de 24 horas (°C);

Q_{gh} : total dos ganhos térmicos efetivos no momento “h” (equação 65);

U_h : transmitância cíclica no momento “h” (equação 63);

Y_h : admitância cíclica no momento “h” (equação 64);

$$U_h = F_{vh} \cdot q_{vh} + F_u \Sigma AU \quad \text{(Equação 63)}$$

$$Y_h = F_{vh} \cdot q_{vh} + F_y \Sigma AY \quad \text{(Equação 64)}$$

F_{vh} : fator de correção da carga convectiva no momento “h” (equação 66);

F_u : fator de correção da transmitância (equação 67);

F_y : fator de correção da admitância (equação 68);

q_{vh} : taxa instantânea do fluxo térmico por ventilação (equação 74);

ΣAU : soma dos produtos entra as áreas (em m^2) e suas respectivas transmitâncias (em $W/m^{20}C$) de todas as vedações do ambiente considerado ($W/^{\circ}C$);

ΣAY : soma dos produtos entra as áreas (em m^2) e suas respectivas admitâncias (em $W/m^{20}C$) de todas as vedações do ambiente considerado ($W/^{\circ}C$).

9.1.2 Cálculo dos ganhos térmicos instantâneos

O cálculo total dos ganhos térmicos segue o procedimento adotado por RORIZ (1996), através da seguinte equação:

$$Q_{gh}=F_y Q_{th} + F_u \Sigma q_s + F_{vh} Q_{ih} + F_{vh} q_{vh} (t_{eh}-t_e) \quad \text{(Equação 65)}$$

Onde:

Q_{th} : desvio no fluxo térmico total (W) através de todas as vedações em torno de sua própria média, no momento "h" (equação 69);

Σq_s : soma das taxas médias de ganhos solares (W) de todas as vedações que envolvem o ambiente (ver item 9.1.6);

Q_{ih} : ganhos devidos à ocupação no momento "h"; (W)

q_{vh} : Taxa instantânea do fluxo térmico devido à ventilação (ver item 9.1.5);

t_{eh} : temperatura externa no momento "h" ($^{\circ}C$);

t_e : média da temperatura externa no período de 24 horas ($^{\circ}C$).

9.1.3 Cálculo dos fatores de correção

Para calcular os valores de F_{vh} , F_u e F_y , serão consideradas as seguintes expressões, ainda de acordo com RORIZ (1996):

$$F_{vh} = \frac{2h_a \sum A}{2h_a \sum A + 3q_{vh}(1-\omega)} \quad \text{(Equação 66)}$$

$$F_u = \frac{2h_a \sum A}{2h_a \sum A + (3\omega - 1) \sum AU} \quad \text{(Equação 67)}$$

$$F_y = \frac{2h_a \sum A}{2h_a \sum A + (3\omega - 1) \sum AY} \quad \text{(Equação 68)}$$

Onde:

h_a : coeficiente de trocas térmicas entre o ar e o ponto ambiental considerado ($h_a=4,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$) (Roriz, 1996);

ω : fator de ponderação, variável segundo a natureza das temperaturas internas que se deseja obter, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6: fator de ponderação ω

Fator ω	Temperatura
1	Temperatura interna do ar
1/2	Temperatura resultante seca
1/3	Temperatura ambiental interna

Fonte: RORIZ, 1996

Dessa forma, substituindo o valor de ω nas equações 66, 67 e 68, teremos as seguintes fórmulas:

Tabela 7: fator ω para as fórmulas.

Temperaturas	Fator ω	Fvh	Fu	Fy
Temperatura interna do ar	1	1	$\frac{4,5 \sum A}{4,5 \sum A + \sum AU}$	$\frac{4,5 \sum A}{4,5 \sum A + \sum AY}$
Temperatura resultante seca	1/2	$\frac{6 \sum A}{q_{vh} + 6 \sum A}$	$\frac{18 \sum A}{18 \sum A + \sum AU}$	$\frac{18 \sum A}{18 \sum A + \sum AY}$
Temperatura ambiental	1/3	$\frac{4,5 \sum A}{q_{vh} + 4,5 \sum A}$	1	1

Fonte: Roriz, 1996.

9.1.4 Flutuação instantânea do fluxo térmico através das vedações

$$Q_{th} = Q_{ih} + Q_{oh} + Q_{ph} \quad \text{(Equação 69)}$$

Onde:

Q_{th} : total da flutuação do fluxo térmico (W) através de todas as vedações em torno de sua própria média, no momento “h”;

Q_{ih} : flutuação no fluxo através das superfícies envidraçadas (W);

Q_{oh} : flutuação no fluxo através das superfícies opacas (W);

Q_{ph} : flutuação no fluxo através de piso, no caso de pavimento térreo (W).

O desvio no fluxo total através do vidro (Q_{ih}) é dado pela soma de duas parcelas: a primeira referente ao fluxo por condução entre as duas faces do vidro e a segunda as trocas por radiação solar:

$$Q_{ih} = AU(t_{eh} - t_e) + AFS'(I_{h-\phi} - I) \quad \text{(Equação 70)}$$

Onde:

AU: produto entre a área (A, em m²) e a respectiva transmitância térmica (U, em W/m²°C) da vedação (W/°C);

t_{eh}: temperatura externa no momento “h” (°C);

t_e: temperatura média do ar exterior (°C);

A: área envidraçada (m²);

FS´: fator de ganho solar corrigido (ver tabela 9);

I_{h-φ}: radiação solar sobre a superfície no momento “h-φ” (W/m²);

φ: retardamento correspondente ao fator de decremento (h);

I: média da radiação solar sobre a superfície externa da vedação durante o período de 24 horas (W/m² – ver item 9.2).

Para obter o fator de ganho solar corrigido, é necessário levar em consideração o tipo de construção e vidro. Assim, utiliza-se o fator de resposta (FR) e o fator de ganho solar (FS), descritos a seguir.

a) Cálculo do fator de resposta (FR)

O fator de resposta (FR) é um parâmetro adotado por Szokolay (1987) e classifica a capacidade térmica das edificações, dependendo da taxa do fluxo térmico devido à admitância e definido pela seguinte equação:

$$FR = \frac{(0,33.Rnv.V) + \sum AY}{(0,33.Rnv.V) + \sum AU} \quad \text{(Equação 71)}$$

Onde

Rnv: número de trocas de ar (renovações) por hora;

V: volume do ambiente (m³);

qa = ΣAY: taxa do fluxo térmico da admitância total de um ambiente, igual à soma dos produtos entre a área de cada superfície e sua respectiva admitância (W/°C);

$q_c = \Sigma AU$: taxa do fluxo térmico devido à diferença de temperatura, igual à soma dos produtos entre a área de cada superfície e sua respectiva transmitância ($W/^\circ C$).

Tabela 8: classificação da construção segundo o fator de resposta.

Fator de resposta	Classificação
$FR \leq 3$	Construção leve
$3 < FR \leq 5$	Construção média
$FR > 5$	Construção pesada

Fonte: RORIZ, 1996.

b) Valores para o fator de ganho solar (FS)

Os fatores de ganho solar são indicados conforme a tabela constante no anexo 4.

Tabela 9: Cálculo de FS' através do fator de resposta.

Tipo de construção	Fator de resposta	FS'
Leve	$FR < 3$	$-0,05 + 1,23FS - 0,428FS^2$
Média	$3 < FR < 5$	$-0,05 + 1,2FS - 0,543FS^2$
Pesada	$FR > 3$	$-0,055 + 1,18FS - 0,658FS^2$

Fonte: RORIZ, 1996.

O valor de Q_{oh} , ou a flutuação do fluxo térmico através de vedações opacas, é dado por:

$$Q_{oh} = AU \cdot Dcr(t_{eh-\varphi} - t_e) + Rse \cdot \alpha \cdot (I_{h-\varphi} - I) \quad \text{(Equação 72)}$$

Onde:

Dcr: fator de decremento da vedação;

Rse: resistência superficial externa (m^2C/W);

α : absorvância da superfície externa da vedação (função da cor).

A flutuação no fluxo através de piso é considerada nula para solos construídos diretamente sobre o solo e para pisos elevados leva em consideração as trocas térmicas por condução:

$$Q_{ph} = AU.Dcr(t_{he-\varphi} - te) \quad \text{(Equação 73)}$$

9.1.5 Cálculo da flutuação do fluxo devido à ventilação

$$q_{vh} = 0,33Rnv.V \quad \text{(Equação 74)}$$

9.1.6 Taxas médias dos ganhos solares através das vedações:

A. Para superfícies opacas:

$$q_s = AU.Rse.\alpha.l \quad \text{(Equação 75)}$$

B. Para superfícies transparentes:

$$q_s = A.FS.l \quad \text{(Equação 76)}$$

Onde:

Rnv: número de trocas de ar (renovações) por hora;

q_s : taxa média de ganho solar correspondente à cada superfície (W);

AU: produto entre a área de cada superfície da vedação e sua respectiva transmitância (W/°C);

Rse: resistência superficial externa (m²°C/W);

α: absorvância da superfície externa da vedação (função da cor);

FS: fator de ganho solar do conjunto vidraça + proteção (ver anexo 4);

I: média da radiação solar sobre a superfície externa da vedação durante o período de 24 horas (W/m²).

9.2. Cálculo da intensidade de radiação nas superfícies horizontais (cobertura)

Os cálculos da radiação em superfícies horizontais serão realizados conforme as equações que se seguem, de acordo com LABAKI, 1995

A radiação incidente num plano horizontal no topo da atmosfera, em W/m², é dada pela equação abaixo.

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365,24} \right) \right] \cos \theta_z \quad \text{(Equação 77)}$$

Onde:

G_{sc}: constante solar, 1353 W/m²;

n = número de ordem do dia do ano (1° de janeiro, n=1)

θ_z: ângulo de incidência do sol no zênite.

Relacionando θ_z com a declinação δ e a latitude φ (com valores negativos no hemisfério sul), tem-se a seguinte equação:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad \text{(Equação 78)}$$

Para os valores horários, ω representa o ângulo horário, em graus, obtido pela equação a seguir:

$$\omega = \frac{360}{24} (t - 12) \quad \text{(Equação 79)}$$

A radiação solar global durante todo o período de insolação é dada por:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365,24} \right) \right] (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \varphi \sin \delta) \quad \text{(Equação 80)}$$

onde ω_s é o ângulo horário do anoitecer, em radianos, dado pela equação 114:

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \quad \text{(Equação 81)}$$

A declinação δ é dada pela equação 115:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(\frac{360(284 + n)}{365,24} \right) \quad \text{(Equação 82)}$$

A média mensal da radiação solar total diária incidindo em um plano horizontal ao nível do solo é dada pela equação:

$$K_t = a + b \frac{s}{N} = \frac{H}{H_0} \quad \text{(Equação 83)}$$

onde a e b são valores empíricos da região de interesse, obtidos, por regressão, através de dados de postos meteorológicos, s é a média do número de horas de insolação no período considerado e N o número médio total de horas de insolação teoricamente possíveis, função do ângulo do anoitecer e dado pela equação abaixo:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} + 0,1 \quad \text{(Equação 84)}$$

A tabela 10 a seguir mostra valores de a e b para algumas cidades do estado de São Paulo.

Tabela 10: Valores das constantes a e b referentes a algumas estações meteorológicas do estado de São Paulo.

Cidade	Latitude	A	b
Cananéia	-	0,21	0,85
São Paulo	23 ^o 29'	0,32	0,39
Pindamonhangaba	22 ^o 58'	0,26	0,55
Estação São Paulo	-	0,24	0,58
Ataliba Leonel	23 ^o 10'	0,02	0,72
Monte Alegre do Sul	22 ^o 40'	0,27	0,53
Campinas	22 ^o 53'	0,25	0,56
Mococa	21 ^o 28'	0,17	0,68
Piracicaba	22 ^o 48'	0,27	0,52
Ribeirão Preto	21 ^o 11'	0,31	0,46
Botucatu	22 ^o 56'	0,24	0,47
Presidente Prudente	22 ^o 07'	0,19	0,39
Pindorama	21 ^o 10'	0,16	0,60

FONTE: AKUTSU et al, 1987.

São definidas ainda as seguintes relações:

- Relação entre a média mensal da radiação difusa diária, representada por K_0 :
- Relação entre a radiação total horária e a radiação total diária, r_t ;
- Relação entre a radiação difusa horária r_t e entre a radiação difusa diária r_d ;
- Relação entre os coeficientes K_d e K_t .

Essas relações são obtidas pelas equações 85 e seguintes:

$$K_d = 0,2038345 - 0,3259358K_t + 1,148309K_t^2 - 1,137844K_t^3 \quad \text{(Equação 85)}$$

$$D = K_D H_0 \quad \text{(Equação 86)}$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{2\pi\omega_s}{360} \cos \omega_s} \quad \text{(Equação 87)}$$

$$r_t = (a + b \cos \omega) r_d \quad \text{(Equação 88)}$$

onde:

$$a = 0,409 + 0,516 \sin(\omega_s - 60) \quad \text{(Equação 89)}$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad \text{(Equação 90)}$$

onde t representa a hora solar do dia.

A intensidade da radiação total difusa sobre a superfície horizontal é dada por:

$$I_d = r_d D \quad \text{(Equação 91)}$$

A intensidade da radiação total diária sobre a superfície horizontal será, portanto:

$$I_t = r_t H \quad \text{(Equação 92)}$$

A radiação direta é dada pela diferença entre as médias das radiações total e difusa.

9.3. Cálculo da intensidade de radiação para superfícies verticais

De acordo com AKUTSU et al, 1987, devem ser consideradas as seguintes equações:

9.3.1 Média horária da radiação solar direta incidente numa superfície vertical:

$$I_{bv} = \frac{I_b}{\cos \theta_z} \cos \theta_v \quad \text{(Equação 93)}$$

onde I_b é a radiação direta sobre o plano horizontal e θ_v é o ângulo entre o raio solar direto e a superfície vertical, obtido pela fórmula:

$$\cos \theta_v = \cos \alpha \cos \gamma \quad \text{(Equação 94)}$$

onde α é a altura solar, representada pela equação:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad \text{(Equação 95)}$$

e γ é o azimute, dado por:

$$\cos \gamma = \frac{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos \omega}{\cos \alpha} \quad \text{(Equação 96)}$$

9.3.2 Média horária da radiação solar difusa incidente em uma superfície vertical:

$$I_{dv} = \frac{I_d}{2} \quad \text{(Equação 97)}$$

onde I_d é a radiação difusa sobre o plano horizontal.

9.3.3 Média horária da radiação solar refletida pelo solo e incidente sobre uma superfície vertical:

$$I_{gv} = \frac{\rho_g I_t}{2} \quad \text{(Equação 98)}$$

onde I_t é a radiação total sobre plano horizontal e ρ_g é o albedo do solo.

9.3.4 Radiação solar global (média diária) em uma superfície vertical:

$$I_{rv} = I_{bv} + I_{dv} + I_{gv} \quad \text{(Equação 99)}$$

isto é, é a soma das radiações direta, e refletida do solo.

10. Elaboração do simulador de cálculos

O simulador foi desenvolvido com o intuito de agilizar os cálculos propostos segundo o método da admitância. Foi elaborada uma planilha eletrônica em Excel que, com o auxílio de macros³ permite torná-la interativa com o usuário e fornecer o maior número de instruções possíveis, para que não faltem dados para efetuar os cálculos.

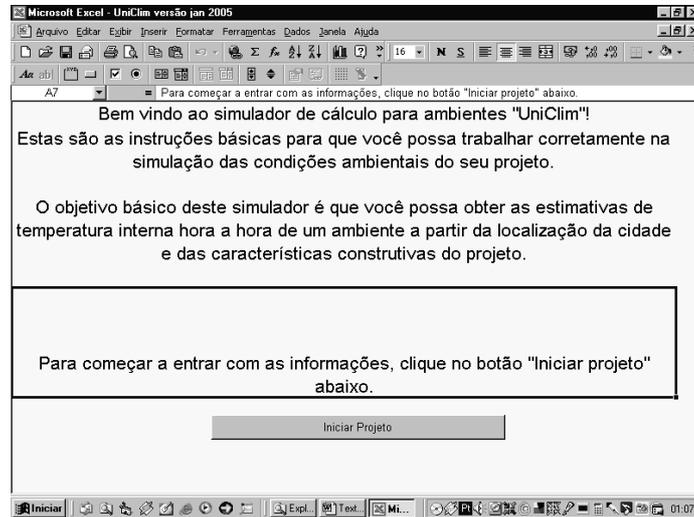
Basicamente, a planilha está dividida na seguinte estrutura:

10.1. Instruções

Apresenta uma introdução sobre o objetivo da planilha e seus resultados, com um botão intitulado “Iniciar Projeto”, para começar a entrada das informações. Foram retiradas todas as barras de rolagem, guias de planilha e referência de células para aumentar o espaço de tela e para evitar que o usuário fique transitando entre as demais planilhas, podendo comprometer a entrada dos dados. A tela de instruções é indicada na figura 22.

³ De acordo com o arquivo de ajuda da Microsoft Windows, macro é definida como uma seqüência de comandos e funções armazenados em um módulo do Visual Basic e que pode ser executada sempre que for necessário executar determinada tarefa, como solicitar informações ao usuário, mandar preencher valores em uma determinada célula da planilha, entre outras.

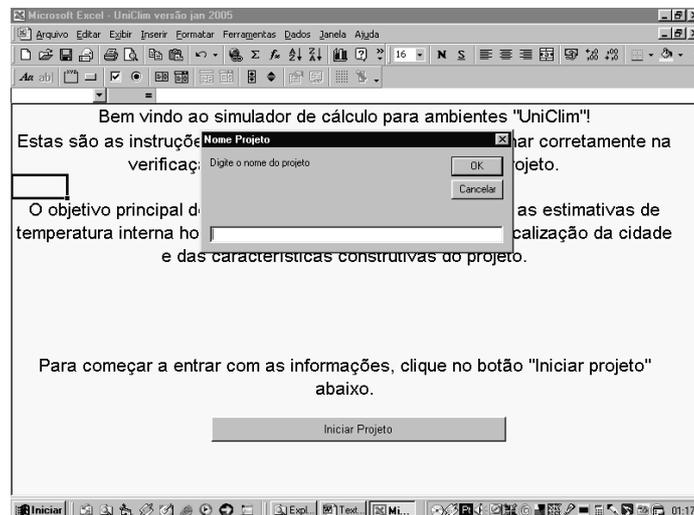
Figura 22: Planilha "Instruções".



10.2. Dados de Projeto

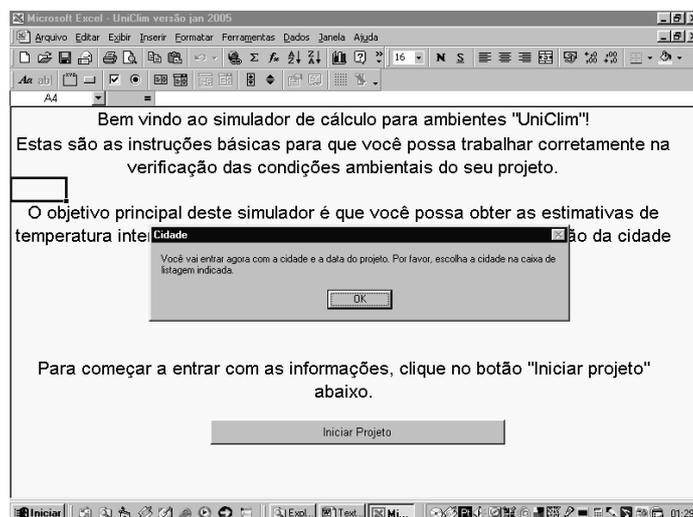
O usuário deve então digitar o nome do projeto (figura 23).

Figura 23: nome do projeto.



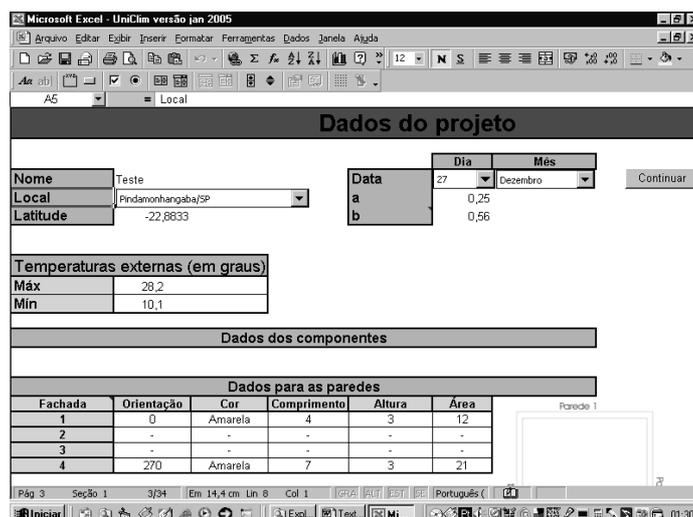
Após entrar com o nome do projeto, uma mensagem instrui o usuário a entrar com a próxima informação: a cidade do projeto (figura 24). Depois desta mensagem, a próxima planilha a ser exibida é a de informações do projeto.

Figura 24: cidade do projeto.



Na planilha seguinte, a célula indicativa da cidade já está em destaque (figura 25) e o nome do projeto já está também disponível na tela.

Figura 25: dados do projeto.



Com a escolha da cidade, uma mensagem aparece na tela solicitando que seja determinada a data de projeto. Para que não sejam digitadas informações erradas, é solicitado que seja clicado o botão "Continuar" (figuras 26 e 27).

Figura 26: mensagem de informação da data de projeto.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'Dados do projeto'. The main form contains the following fields:

- Nome:** Teste
- Local:** Presidente Prudente/SP
- Latitude:** -22,8833
- Data:** A table with columns 'Dia' and 'Mês'. The 'Dia' column has values 'a' and 'b', and the 'Mês' column has values '0,25' and '0,56'. The 'Mês' dropdown is set to 'Dezembro'.

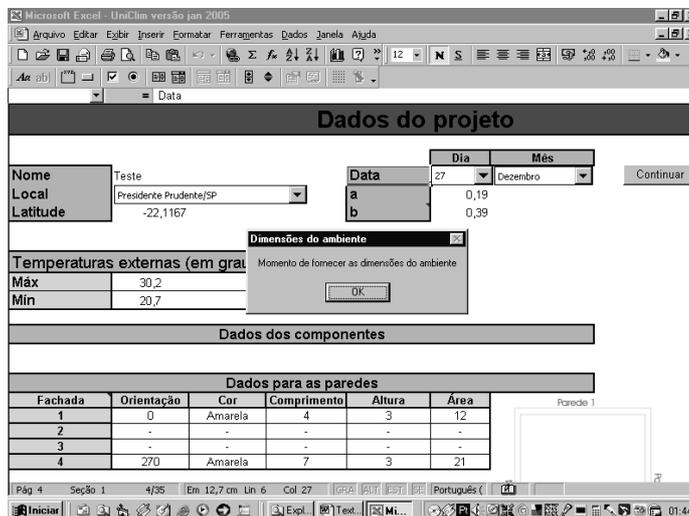
A dialog box titled 'Data de Projeto' is open, displaying the message: 'Forneça agora as informações referentes à data do projeto (dia e mês) nas caixas de listagem indicadas e, após esta informação, clique no botão "Continuar"'. Below the message is an 'OK' button.

Below the dialog box, there are sections for 'Dados dos componentes' and 'Dados para as paredes'. The 'Dados para as paredes' section contains a table with the following data:

Fachada	Orientação	Cor	Comprimento	Altura	Área
1	0	Amarela	4	3	12
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	270	Amarela	7	3	21

Ao clicar o botão “Continuar”, a planilha já fica com as informações de latitude e dos coeficientes meteorológicos a e b atualizadas, de acordo com a cidade escolhida (figura 27). Nessa etapa, surge uma mensagem para entrada das dimensões do ambiente.

Figura 27: mensagem para entrada das dimensões do ambiente.



Outra caixa aparece solicitando comprimento (figura 28), largura (figura 29) e pé direito (figura 30) do ambiente. Para que o usuário saiba a numeração e a parede correspondente, foi inserida uma figura ao lado das informações (figura 31)

Figura 28: comprimento da parede.

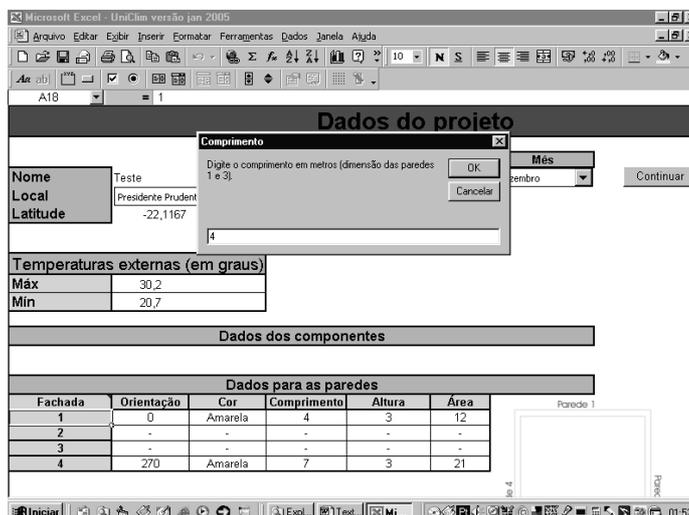


Figura 29: largura da parede.

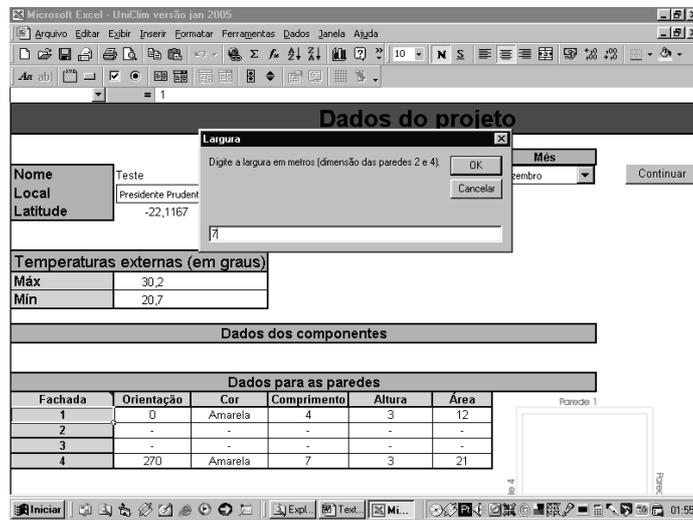
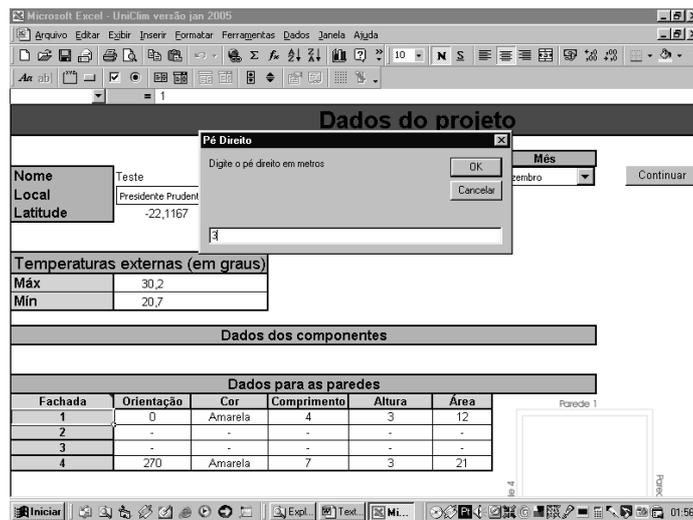


Figura 30: pé direito.



Após as dimensões, deve ser fornecida a orientação das fachadas. A planilha verifica quais paredes o usuário determina como fachadas e, a partir da orientação da parede 1, calcula as demais, pois já é estabelecido que as paredes formam ângulos retos entre si (figuras 31 a 34).

Figura 31: mensagem para informar a orientação das fachadas.

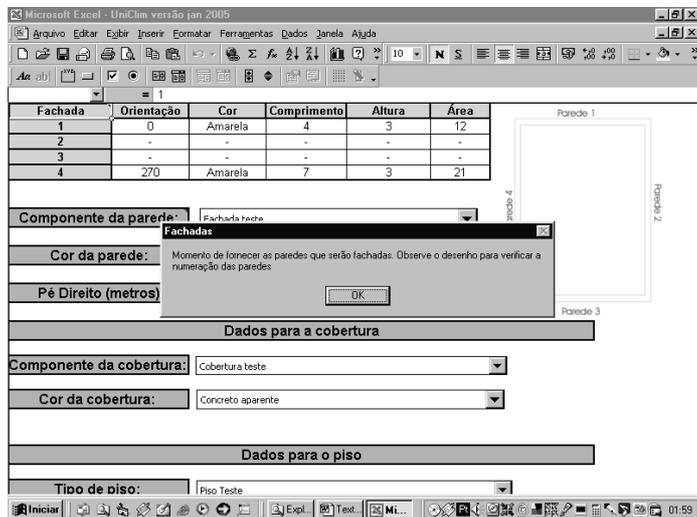


Figura 32: definição para fachada 1.

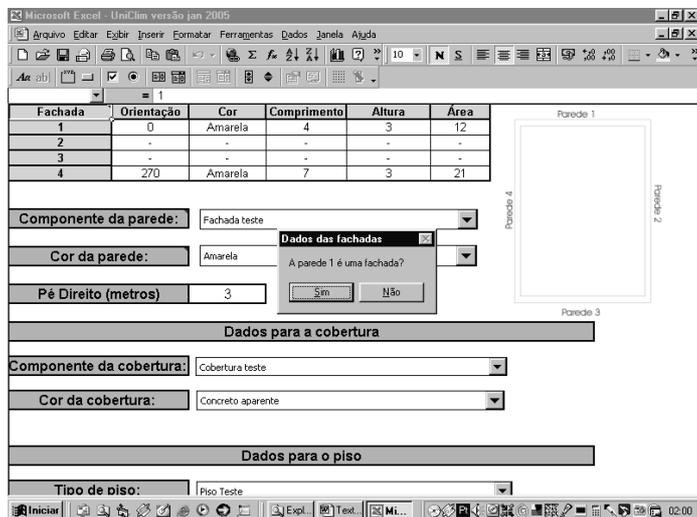


Figura 33: orientação da fachada 1.

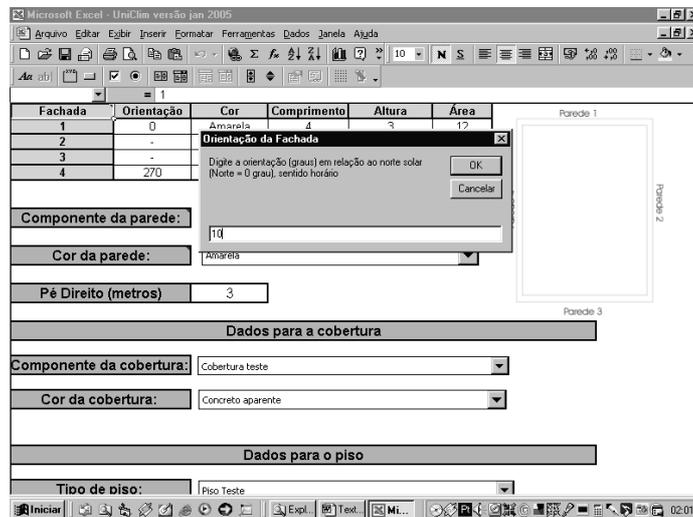
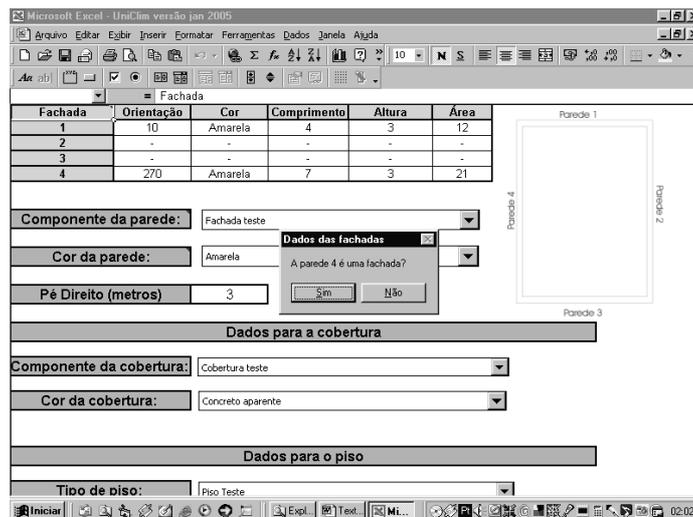


Figura 34: definição de fachadas.



Depois de verificadas todas as paredes que são fachadas, o usuário é orientado para informar o material e a cor da cobertura e das paredes (figuras 35 a 38).

Figura 35: solicitação de material das fachadas.

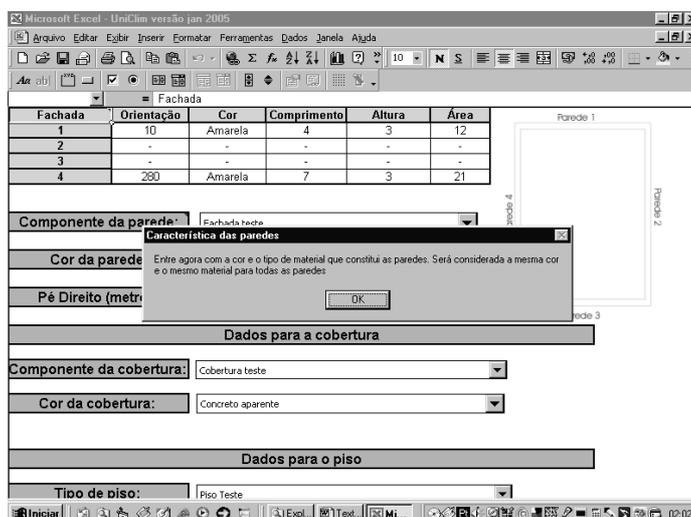
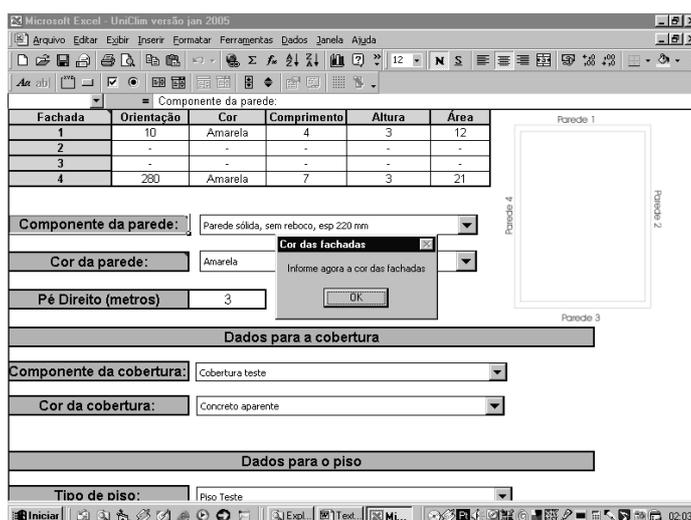


Figura 36: solicitação de cor das fachadas.



Após digitar o componente da parede, uma mensagem aparece para que o usuário informe a cor da fachada (figura 38). Depois de escolhida a cor, surge a mensagem para as opções de componente da cobertura (figura 37) e, a seguir, a sua cor (figura 38).

Figura 37: solicitação do material da cobertura.

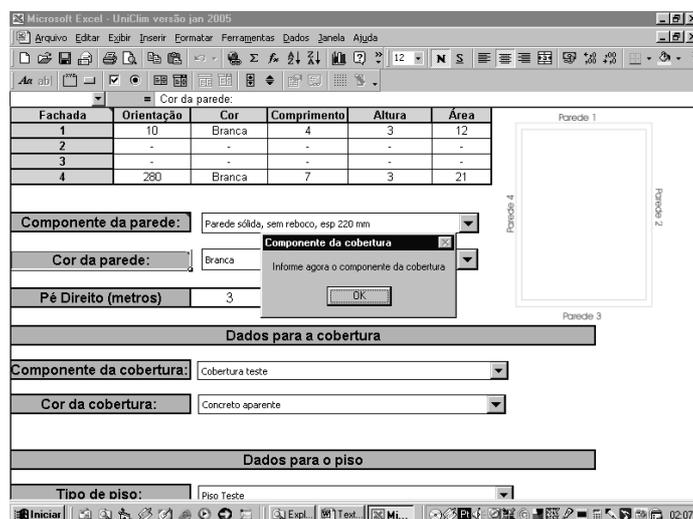
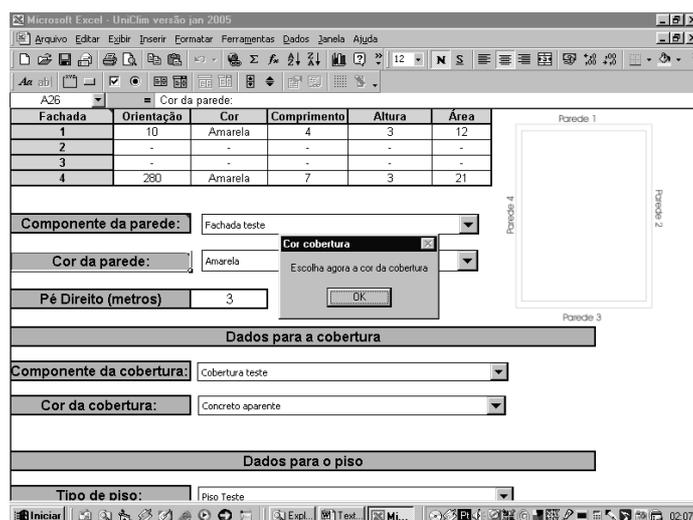


Figura 38: solicitação da cor da cobertura.



Depois de definidas paredes e cobertura, o usuário deverá escolher o tipo de piso (figura 39). A célula desta opção fica em destaque (figura 40).

Figura 39: mensagem para o tipo de piso.

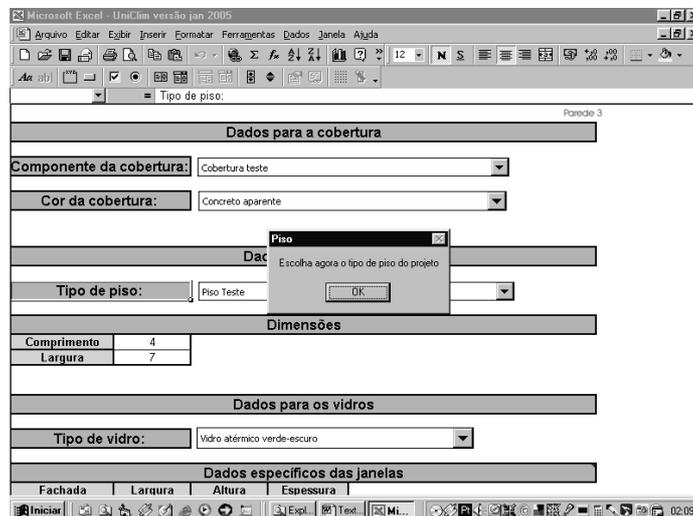
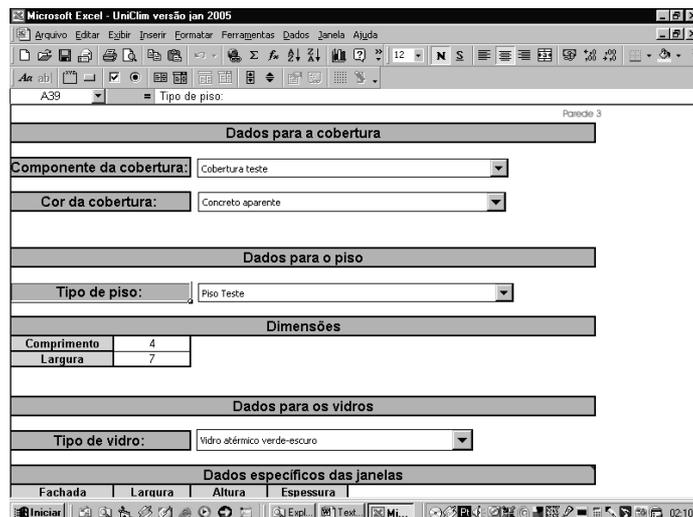
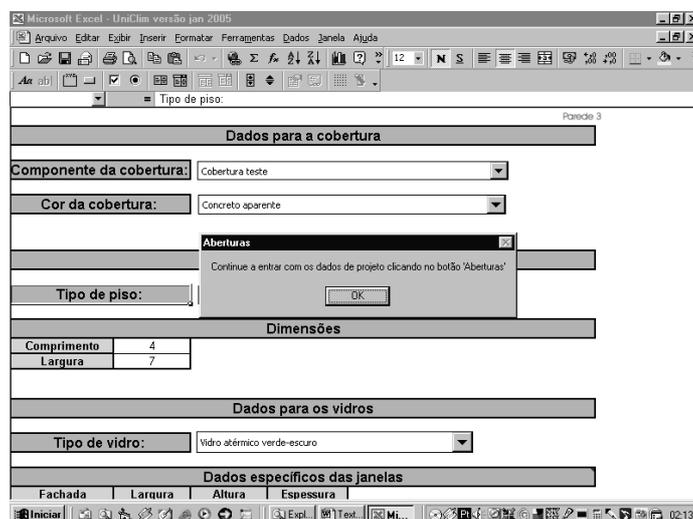


Figura 40: escolha do piso.



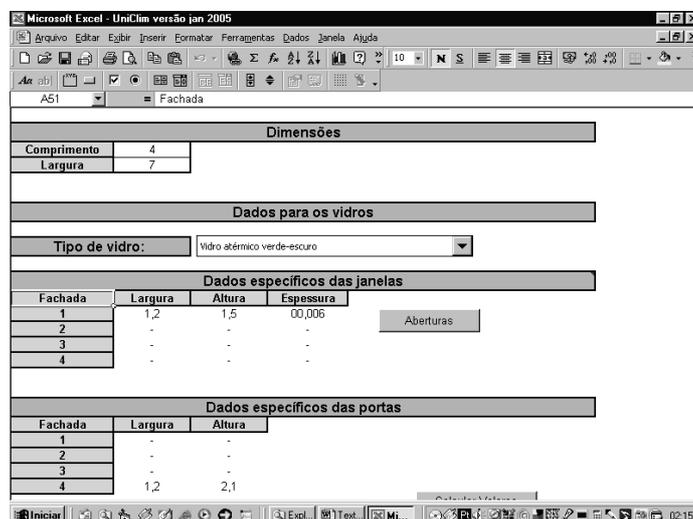
A etapa a seguir é a entrada das informações de aberturas do projeto, que o usuário deve fazer clicando no botão de comando “Aberturas” (figura 41).

Figura 41: solicitação para entrada dos dados de aberturas.



Ao terminar de ler esta mensagem, a tela já passa a ter a visualização deste botão, para facilitar sua localização (figura 42).

Figura 42: localização de tela.



Para obter estas informações, aparece a pergunta se há janelas no projeto (figura 43). Caso exista, o usuário deve fornecer em seguida a espessura do vidro (figura 44). Será considerado o mesmo vidro para todas as fachadas.

Figura 43: verificação da existência de janelas.

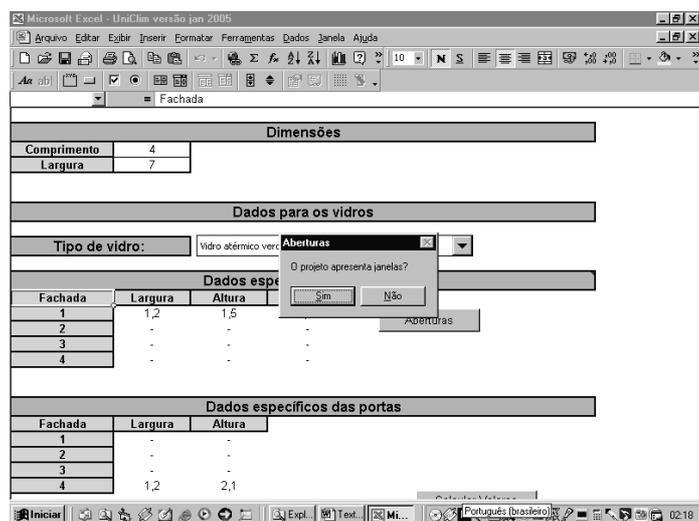
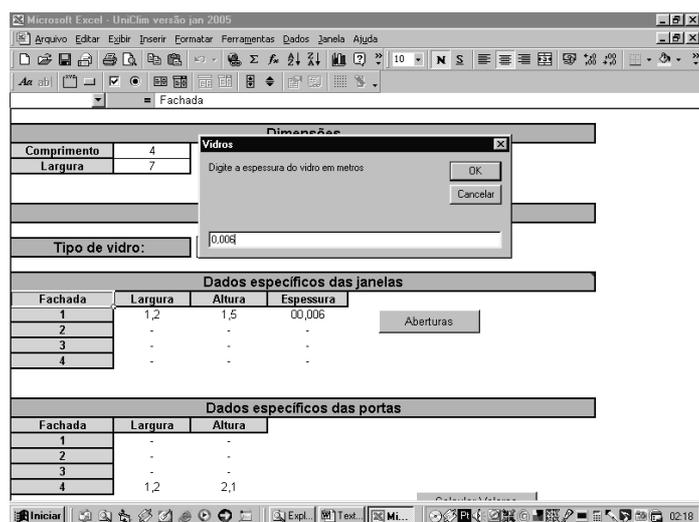


Figura 44: entrada da espessura do vidro.



Após digitar a espessura do vidro, a rotina já verifica as paredes que foram definidas como fachadas (para este exemplo foram definidas as paredes 1 e 4) e pergunta se elas apresentam janelas e portas. Em caso afirmativo, solicita suas respectivas dimensões (figuras 45 a 52).

Figura 45: verificação da existência de janelas na fachada 1.

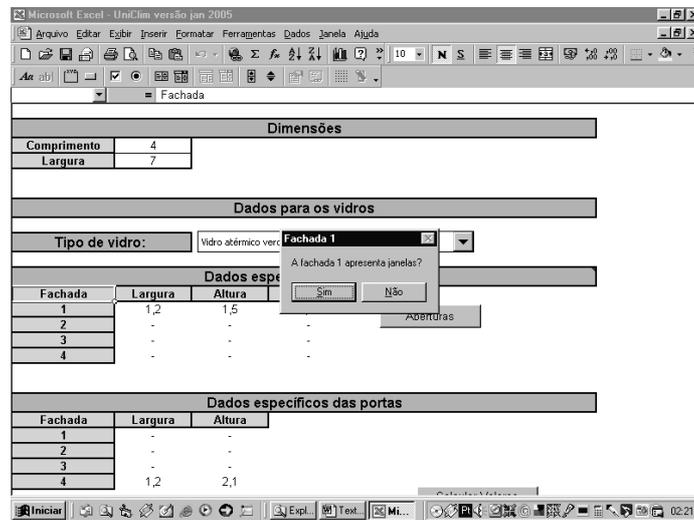


Figura 46: comprimento da janela.

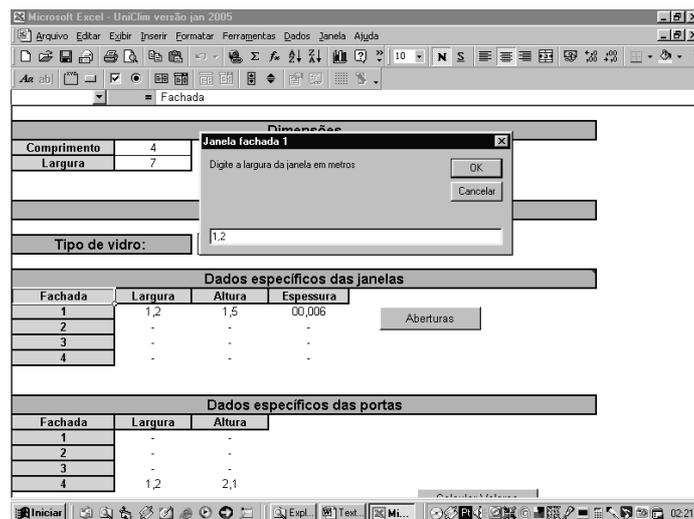


Figura 47: altura da janela.

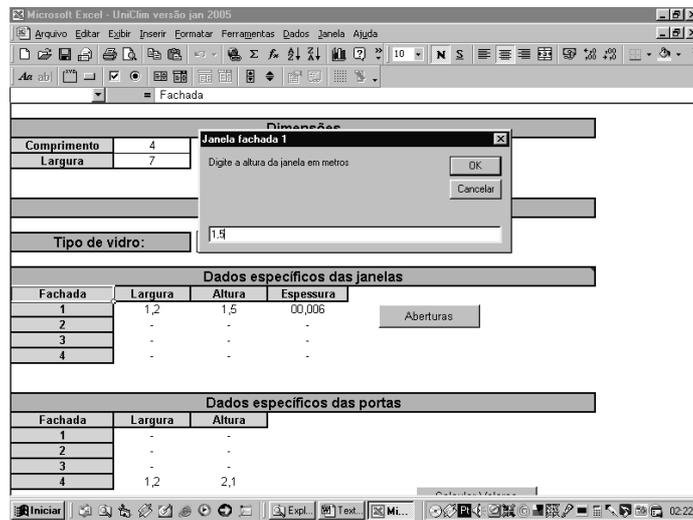


Figura 48: verificação da existência de portas na fachada 1.

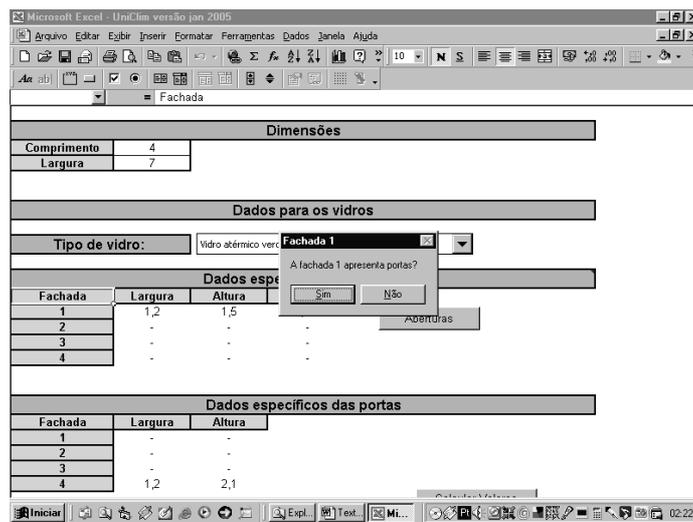


Figura 49: verificação da existência de janelas na fachada 4.

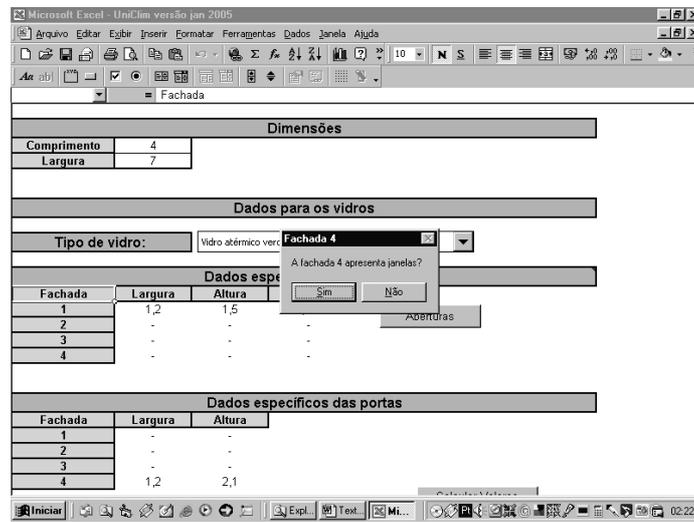


Figura 50: verificação da existência de portas na fachada 4.

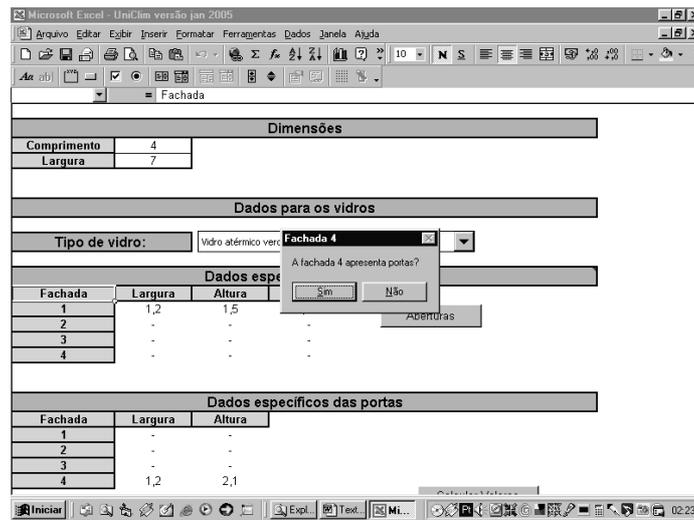


Figura 51: largura da porta.

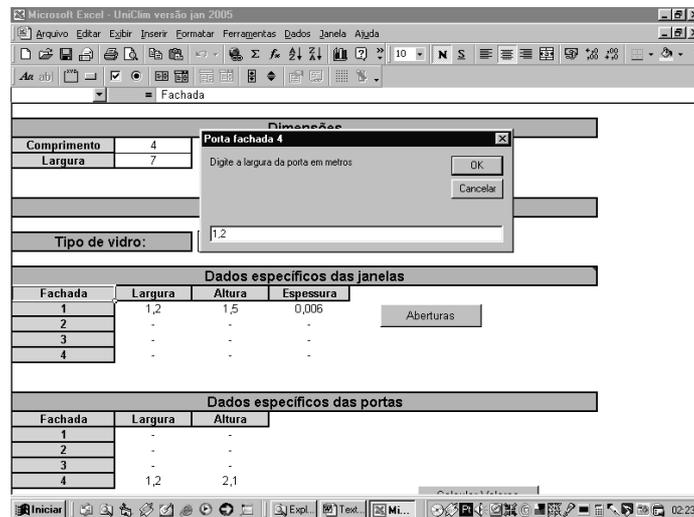
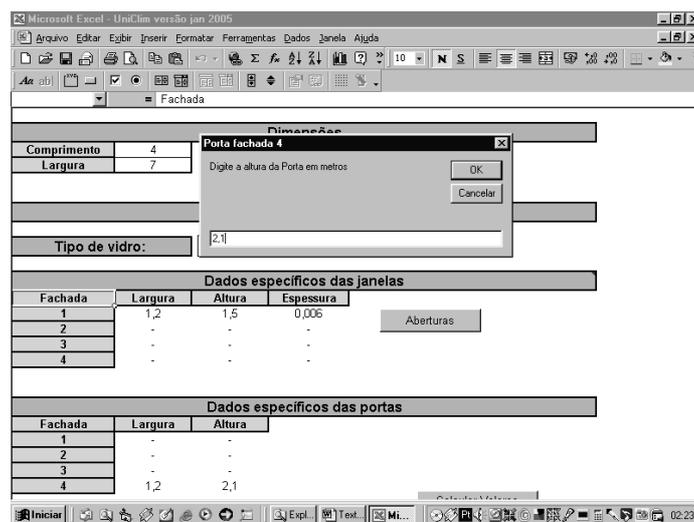


Figura 52: altura da porta.



Depois de fornecer as dimensões de janelas e portas, o usuário deve informar os horários de início e fim das aberturas, ou seja, a partir de que horas janelas e portas são abertas (considerando que ambas são abertas ao mesmo tempo) e quando elas são fechadas (figuras 53 e 54).

Figura 53: início do horário de funcionamento das aberturas.

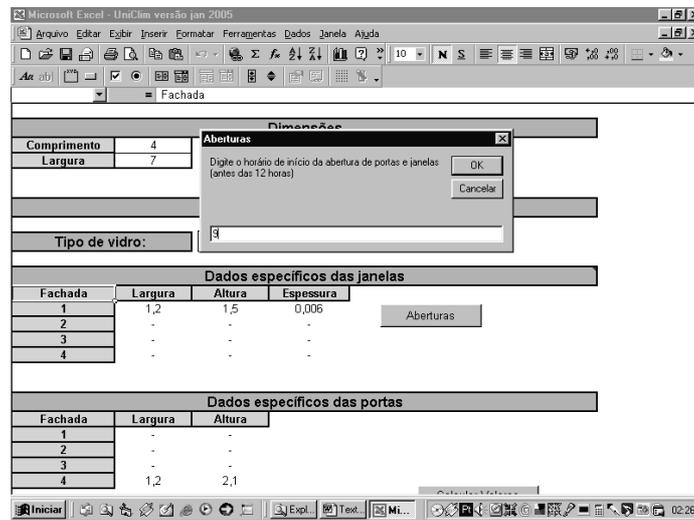
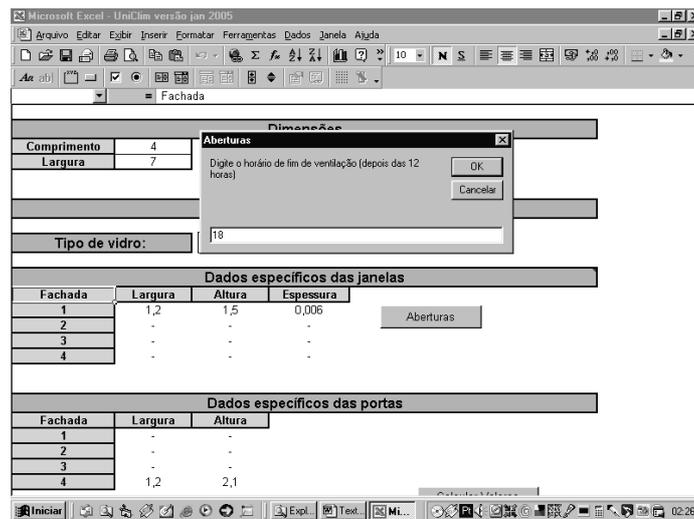
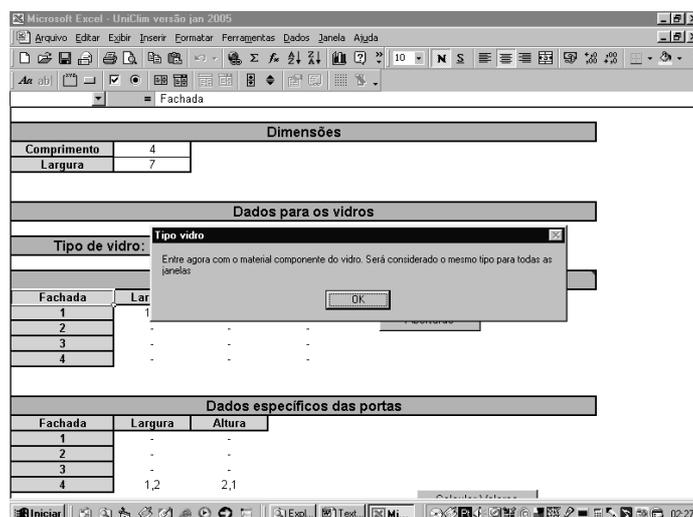


Figura 54: fim do horário de funcionamento das aberturas.



O usuário deve entrar agora com o material do vidro (figura 55).

Figura 55: material do vidro.



A escolha do tipo de vidro foi a última etapa para fornecer os dados de projeto. Agora os valores finais serão obtidos através do botão “Calcular Valores” (figura 56). A tela facilita a visualização deste botão (figura 57). Caso queira, o usuário pode ver os dados do conjunto, abaixo do botão mencionado.

Figura 56: informação para cálculo dos valores.

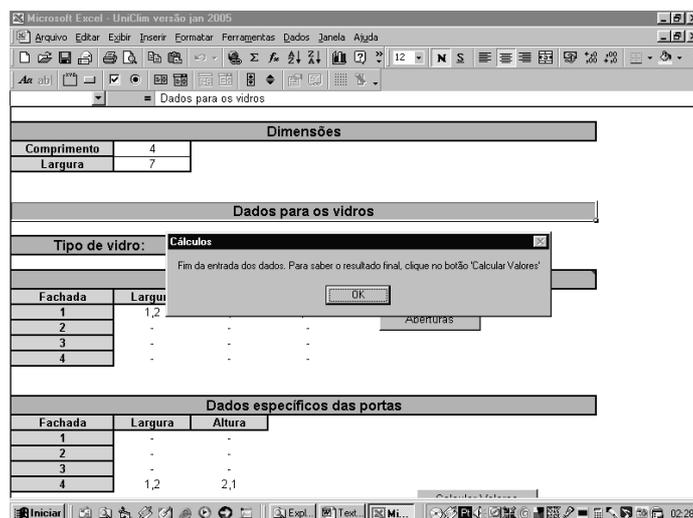
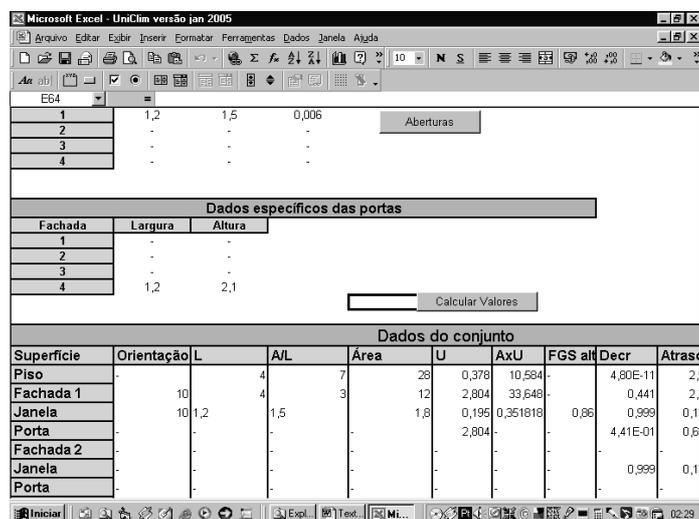


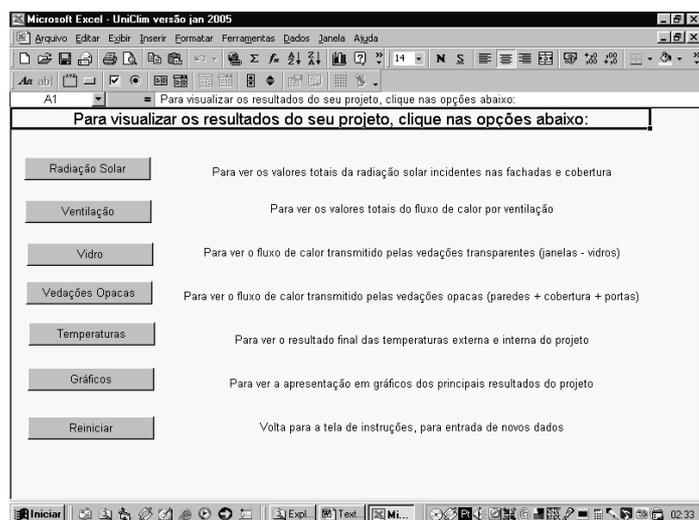
Figura 57: localização do botão "Calcular Valores".



10.3. Resultados finais

Os valores serão calculados através das rotinas determinadas e, a seguir, aparece uma planilha que permite ver os resultados obtidos (figura 58)

Figura 58: menu de opções para os resultados finais.



Os resultados que podem ser vistos são:

- a) Radiação solar: incidência da radiação solar na cobertura e nas superfícies definidas como fachadas (figura 59). Não apenas esta como em todas as opções de resultados, há um botão denominado “Voltar” para que o usuário possa retornar no menu indicado na figura 58.

Figura 59: resultados da incidência de radiação solar.

Hora	Cobertura	Fachada 1	Fachada 2	Fachada 3	Fachada 4
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	82,96894767	144,1866921	-	-	30,7565068
7	231,1790025	252,711073	-	-	72,16405874
8	396,8795456	348,5043163	-	-	107,5440738
9	560,4121405	429,2929009	-	-	139,4121619
10	699,2038451	503,8681606	-	-	171,6500765
11	792,3677674	553,7647647	-	-	205,8906057
12	825,1887223	585,2873176	-	-	238,6809084
13	792,3677674	603,7954312	-	-	423,1830721
14	699,2038451	596,8570057	-	-	557,8105572
15	560,4121405	557,9500174	-	-	613,7059142
16	396,8795456	483,5901297	-	-	582,78523
17	231,1790025	375,8277967	-	-	479,2983248
18	82,96894767	243,0669814	-	-	333,3920996
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0

Média	
Cobert.	264,6338
Fac.1	236,6134
Fac.2	0
Fac.3	0
Fac.4	164,8431

Voltar

- b) Ventilação: fluxo de calor obtido através da ventilação (figura 60). Nos horários definidos como aberturas fechadas, considerou-se 10% do total com portas e janelas abertas, supondo que existe passagem de ar entre as frestas.

Figura 60: resultado do fluxo de calor por ventilação.

Hora	Aberto?	Fl. Vent.
1	n	83,16
2	n	83,16
3	n	83,16
4	n	83,16
5	n	83,16
6	n	83,16
7	n	83,16
8	n	83,16
9	s	831,6
10	s	831,6
11	s	831,6
12	s	831,6
13	s	831,6
14	s	831,6
15	s	831,6
16	s	831,6
17	s	831,6
18	s	831,6
19	n	83,16
20	n	83,16
21	n	83,16
22	n	83,16
23	n	83,16
24	n	83,16

- c) Vidros: mostra os valores horários do fluxo de calor transmitido pelas superfícies envidraçadas, ou seja, apenas as janelas (figura 61)

Figura 61: resultados do fluxo de calor transmitido pelas superfícies envidraçadas.

Hora	Fachada 1	Fachada 2	Fachada 3	Fachada 4
1	-273,008801	0	0	0
2	-273,259471	0	0	0
3	-84,7470049	0	0	0
4	16,53896659	0	0	0
5	100,8305391	0	0	0
6	163,6554799	0	0	0
7	202,3137647	0	0	0
8	215,6418479	0	0	0
9	203,2663124	0	0	0
10	185,4870453	0	0	0
11	103,4208004	0	0	0
12	19,49019341	0	0	0
13	-81,7021945	0	0	0
14	-193,451916	0	0	0
15	-270,401828	0	0	0
16	-270,536519	0	0	0
17	-270,736055	0	0	0
18	-270,963303	0	0	0
19	-271,187262	0	0	0
20	-271,471365	0	0	0
21	-271,765475	0	0	0
22	-272,039542	0	0	0
23	-272,340346	0	0	0
24	-272,674573	0	0	0

- d) Vedações opacas: fluxo de calor transmitido pelas fachadas e a cobertura (figura 62).

Figura 62: resultados do fluxo de calor transmitido por vedações opacas.

Hora	Cobertura	Fachada 1	Fachada 2	Fachada 3	Fachada 4
1	-11,0543042	-1,89132464	0	0	-5,12481812
2	-85,2074009	-14,5784713	0	0	-27,3273247
3	-167,59973	-28,6753009	0	0	-51,9967765
4	-311,786307	-53,3447527	0	0	-95,1683172
5	-362,045628	-61,9438187	0	0	-110,216683
6	-398,296253	-68,1464238	0	0	-121,071242
7	-414,776719	-70,9657897	0	0	-126,005132
8	-394,178637	-66,7046776	0	0	-119,499447
9	-348,862856	-57,8795278	0	0	-105,475766
10	-254,111677	-40,695964	0	0	-78,7167161
11	-114,044716	-15,9227997	0	0	-34,4200991
12	57,33132935	13,98996607	0	0	17,23897772
13	223,7638351	42,84432977	0	0	67,44747618
14	329,226017	61,01233394	0	0	99,38550781
15	388,5484943	71,03798897	0	0	119,1770369
16	409,1465767	74,19342846	0	0	126,8253022
17	392,6681108	70,77270234	0	0	122,5062608
18	359,711179	64,32541652	0	0	112,2983525
19	310,2757812	54,89510896	0	0	96,35832548
20	256,720767	44,8802762	0	0	78,71821333
21	199,0461363	34,85559084	0	0	57,78228397
22	129,0122561	22,87328968	0	0	36,81324994
23	56,80740805	9,688075634	0	0	15,10413236
24	-11,0543042	-1,89132464	0	0	-5,12481812

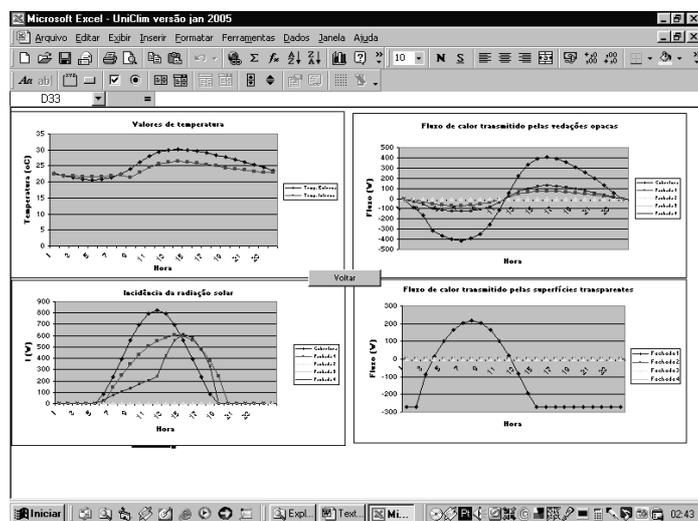
e) Temperaturas: mostra os valores das temperaturas externas e internas (figura 63).

Figura 63: temperaturas finais.

Hora	Temp. Externa	Temp. Interna
1	22,8	22,32769171
2	21,8875	21,99722113
3	21,308	21,95322575
4	20,89	21,68099698
5	20,7	21,65166304
6	20,9375	21,72330603
7	21,46	21,87080432
8	22,5625	22,20179753
9	24,1675	21,4613656
10	26,1435	23,01159454
11	28,0625	24,53894308
12	29,2785	25,54543064
13	29,9625	26,13561054
14	30,2	26,33743714
15	30,01	26,19826242
16	29,63	25,92630833
17	29,06	25,48172352
18	28,4425	24,98856824
19	27,7775	24,31549193
20	26,97	23,99516014
21	26,134	23,85699689
22	25,365	23,30688043
23	24,5	22,93796961
24	23,55	22,88766514

f) Gráficos: apresenta os valores apresentados nos itens anteriores na forma gráfica (figura 64), com exceção do fluxo por ventilação.

Figura 64: gráficos com resultados finais.



g) Reiniciar: volta para a tela de instruções (figura 23), caso o usuário deseje entrar com novos dados de projeto.

11. Estudo comparativo

Para verificar se os dados calculados pela planilha estão coerentes, foi estipulado um modelo de projeto, para comparação com o programa Arqitrop (Roriz, SD). Para isso, foram feitas as seguintes considerações:

- Os valores mensais das médias das temperaturas máxima e mínima da planilha são os mesmos valores fornecidos pelo Arqitrop.
- Valores das características dos materiais de construção considerados para os cálculos, quando possível, foram os mesmos fornecidos pelo Arqitrop.

11.1 Modelo para realização dos cálculos

11.1.1 Modelo Analisado

O primeiro modelo considerado toma como referência um quarto com as seguintes características:

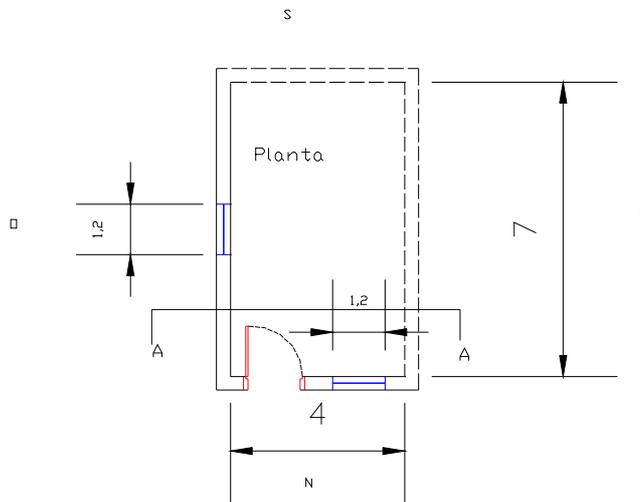
Cidade: Campinas (latitude 22°53')

Data: 24 de dezembro

Foi considerado um quarto com dimensões de 7 x 4 m e pé-direito de 3 m, com uma janela de 1,2 x 1,5 m, localizada no centro da parede de maior dimensão (fachada 4) e uma porta de 1,0 x 2,1 m e uma janela de 1,2 x 1,5 m na fachada de menor dimensão (fachada 3). A cor determinada para as fachadas é amarela e para a cobertura é concreto aparente.

As aberturas começam a ser utilizadas às 9 horas e só se fecham às 18 horas.

Figura 65: planta do modelo estudado.



As linhas tracejadas representam as paredes não expostas, enquanto que as letras N, S, L, O representam a orientação das fachadas.

Para as paredes, foram estabelecidas as seguintes características:

Tabela 11: características dos materiais das paredes.

Componente	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Tijolo cerâmico maciço revestimento duplo 13,5			
Descrição material	Argamassa	Tijolo maciço	Argamassa
Espessura (m)	0,025	0,1	0,025
Densidade (kg/m ³)	1800	1650	1800
Condutividade Térmica (W/m°C)	0,840	0,840	0,840
Calor específico (kJ/kg°C)	670	921	670

Foram calculados os seguintes valores:

Tabela 12: valores obtidos.

Fatores	Valores Calculados	Valores Arquitrop
Transmitância Térmica (U) – W/m ² °C	2,78	2,64
Admitância (Y) – W/m ² °C	1,542	Não fornecido
Fator Decremento	0,266	Não fornecido
Atraso (horas)	5,67	4,28

Para a cobertura, foram determinadas as características descritas na tabela 13 e os respectivos valores obtidos indicados na tabela 14.

Tabela 13: características dos materiais da cobertura.

Componente	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Cobertura de telha cerâmica, camada de ar e forro de concreto comum			
Descrição do material	Telha cerâmica	Lã de vidro	Concreto comum
Espessura (m)	0,03	0,20	0,20
Densidade (kg/m ³)	1800	20	1200
Condutividade Térmica (W/m°°C)	0,698	0,054	0,420
Calor específico (kJ/kg°°C)	921	126	879

Tabela 14: valores obtidos para a cobertura.

Fatores	Valores calculados	Valores Arquitrop
Transmitância Térmica (U) – W/m ² °C	0,469	0,228
Admitância (Y) – W/m ² °C	5,914	Não fornecido
Fator Decremento	8,408	Não fornecido
Atraso (horas)	19,98	22,83

Com relação às superfícies envidraçadas, foram feitas as seguintes considerações:

Tabela 15: características das superfícies envidraçadas.

Material	Vidro comum, sem proteção, caixilho simples
Espessura (m)	0,006
Fator de ganho solar (FGS)	0,86
Atraso (horas)	1

Não foi considerada ocupação de pessoas nem equipamentos no ambiente. A taxa de renovação do ar no ambiente considerada foi de 30 volumes/hora.

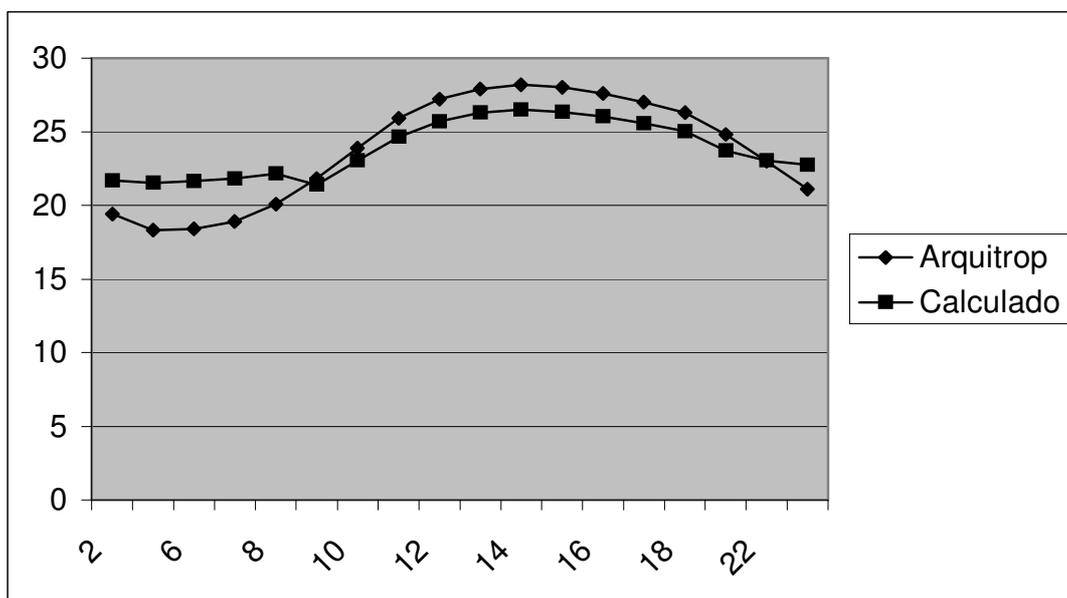
Os valores finais das temperaturas internas e externas obtidas foram:

Tabela 16: valores finais de temperaturas internas para os dois simuladores.

Hora	Temperatura Interna	
	Calculado	Arquitrop
2	19,4	21,7
4	18,3	21,5
6	18,4	21,6
7	18,9	21,8
8	20,1	22,1
9	21,8	21,4
10	23,9	23,0
11	25,9	24,6
12	27,2	25,7
13	27,9	26,3
14	28,2	26,5
15	28	26,3
16	27,6	26,0
17	27	25,5
18	26,3	25,0
20	24,8	23,7
22	23	23,0
24	21,1	22,7

Estão representados pelo gráfico da figura 66.

Figura 66: gráfico comparativo de temperaturas internas.



Observa-se uma diferença de valores para as temperaturas internas, sendo a maior nas horas 4 e 6. Tal diferença é esperada, uma vez que não há como conhecer todos os procedimentos de cálculo desenvolvidos pelo programa Architrop. No entanto, o resultado torna-se satisfatório, uma vez que o comportamento térmico obtido pelo resultado dos dois simuladores é semelhante.

12 Referências Bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. PROJETO DE NORMA 02: 135.07-001. *Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades*, junho 1998.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. PROJETO DE NORMA 02: 135.07-002. *Desempenho Térmico De Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações*, junho 1998.
- AKUTSU, M., LOPES, D. *Simulação do desempenho térmico de edificações*, In: *Tecnologia de Edificações*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, ed. Pini, 1998, p. 473-476.
- AKUTSU, M., SATO, N. M. N., PEDROSO, N. G.. *Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares – Manual de procedimentos para avaliação*, ed. do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., Divisão de Edificações, São Paulo, 1987. 74 p.
- ARZTEGUI, J. M. *Método Simplificado para Previsión de Temperaturas Internas em Condiciones Cíclicas Estacionarias*. Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay, 1991, *apud* RORIZ, 1996.
- ASHRAE, *Handbook of fundamentals*, 1972, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- ASSIS, E. S., PINTO, J. A. R. *Análise de Desempenho Térmico de Habitação Popular Padrão Cohab em Bonfinópolis, MG: Comparação entre Dois Modelos Computacionais*. In: Encontro Nacional de Modelos de Simulação de Ambientes, 1995, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de

- Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. P. 123-136.
- ASSIS, R. M. C. *Caracterização Ótica de Materiais Transparentes e sua Relação com o Conforto Ambiental em Edificações*. Tese de Doutorado, Unicamp, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 1998, p 43-46.
- BERTHIER, J. & ANQUEZ, J. C., *Temperatures maximales atteintes au soleil par des parois de construction*. Cahiers du CSTB, n. 66, Paris, Fev. de 1964, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- CROISSET, M., *L'Hygothermique dans le bâtiment*, Ed. Eyrolles, Paris, 1968.
- DANTER, E., *Periodic heat flow characteristics of simple walls and roofs*, IJHVE, 1960, pp. 136-46, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- DANTER, E, *Heat exchanges in a room and the definition of room temperatures*, IHVE Symposium, junho de 1973, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- DREYFUS, J., *Transmission de la chaleur em regime périodique á travers lês murs de habitations*, Rev. Gen. De Therm, *apud* GIVONI, 1981.
- ECOLE DE MINES DE PARIS, *Casamo-Clim, Manuel d'utilisation*, Paris, 1987.
- FROTA, A. B. & SCHIFFER, S. R., *Manual de Conforto Térmico*, Ed. Studio Nobel, 1995.
- HOUAISS, Antonio, *Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa*, Ed. Objetiva, Rio de Janeiro, 2002.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 7730; *Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specifications of the conditions for thermal comfort*, Geneva, 1994

- KOENIGSBERGER, O. H., INGERSOLL, T. G., MAYHEW, A., SZOKOLAY, S. A.,
Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales, Ed. Paraninfo, Madrid,
1977.
- JONES, W. P. *Engenharia de ar condicionado*. Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1983.
497 p.
- LABAKI, L. C. *Tratamento de Dados Climáticos de Campinas, SP, para Análise de Desempenho Térmico de Edificações*. In: Encontro Nacional de Modelos de Simulação de Ambientes, 1995, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 123-136.
- LOUDON, A. G. *Summertime Temperatures in Buildings without Air-Conditioning*. In: the journal of the Institution of Heating and ventilating engineers (ihve), environmental temperature symposium: fourth paper. The Building Services Engineer, março de 1970. p. 280-291.
- MACKEY, C. O. & WRIGHT, L. T., *Transactions*, In: American Society of Heating and Ventilating Engineers, vol. 49, New York, junho 1943.
- MILBANK, N. O., LYNN, J. H. *Thermal response and the admittance procedure*. In: The Building Services Engineer. The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers, Volume 42, Maio de 1974, p 38-54.
- MUNCEY et al, *Method for thermal calculations using total building response factors*. Conf. "Use of computers for environmental engineering related to buildings", NBS Building Science Series, 39, 1971, p. 111-116, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- RAUBER, D. L, VAN BELLEN, H. M., SCHUCH, L. M. S., NARCISO FILHO, P. A. L., LAMBERTS, R. *Comparação de Softwares de Análise Térmica de Edificações: Resultados para um Projeto Padrão e Interface Programa-*

- Usuário*. Anais do 2o Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / Florianópolis – Santa Catarina. ed. Antac/Sobrac/Abergo. Março de 1993.
- RAO, K. R. & CHANDRA, P. *A computer program for the calculation of individual room air temperatures of multi-room buildings*, *ibid.*, p. 327-334, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- RIVERO, R. *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. 2. ed. Porto Alegre: DC Luzzato/UFRGS, 1986. 239 p.
- RORIZ, M. *Conforto Térmico e Economia de Energia em Edificações: um Modelo Simplificado de Avaliação*. Novembro de 1991.
- RORIZ, M., BASSO, A. *Arquitrop – Conforto Térmico e Economia de Energia nas Edificações; Sistema integrado de rotinas e bancos de dados para apoio às atividades de projeto em Arquitetura e Engenharia Civil (manual de utilização)*. s/ data.
- RORIZ, M. *Conforto Térmico em Edificações: um modelo matemático e uma aplicação*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 1996.
- RUAS. A. C., *Conforto térmico nos ambientes de trabalho*, Fundacentro, São Paulo, 1999
- SATTLER, M. A. *A avaliação de desempenho térmico de edificações pela CIENTEC*. In: I ENCONTRO NACIONAL SOBRE NORMALIZAÇÃO LIGADA AO USO RACIONAL DE ENERGIA E AO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES. Florianópolis, 1991. 4 p.
- SATTLER, M. A., *A Computer Program for The Thermal Design of Unconditioned Buildings*. Department of Buildings Science. Faculty of Architectural Studies. University of Sheffield. September, 1986, *apud* RORIZ, 1996.

- SATTLER, M. A. *THEDES – Um programa de computador para a simulação do desempenho térmico de edificações*. In: I ENCONTRO NACIONAL SOBRE NORMALIZAÇÃO LIGADA AO USO RACIONAL DE ENERGIA E AO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES. Florianópolis, 1991. 4 p.
- STEPHENSON, D. G. & MITALAS, G. P., *Cooling load calculations by thermal factors*, ASHRAE 73, N. 1028, 1967, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- SZOKOLAY, S.V., *Archipak Version 1.1, Computer Software Manual*, University of Queensland Dept. of Architecture, 1987.
- SZOKOLAY, S. V. *Thermal Design of Buildings*, Raia Education Division. Canberra, Austrália, 1987, *apud* RORIZ, 1996.
- SZOKOLAY, S. V. *Archipack – Version 3.2 – A suite of programs for the thermal design of buildings and solar systems*. Architectural Science Unit, University of Queensland, St. Lucia, Apr. 1990, *apud* RORIZ, 1996.
- SODHA, M. S., BANSAL, N. K., KUMAR, A., BANSAL, P. K., MALIK, M. A. S. *Solar Passive Building: Science and Design*, Pergamon Press, 1986. p.187, 192-223.
- TAVERNIER, E., *Characteristics for the thermal behaviour of rooms in Summer*, Tradução de HVRA n. 229, “Chaleur et Climats”, Maio de 1972, 71, 437, p. 35-66, *apud* MILBANK & LYNN, 1974.
- TUBELIS, A., NASCIMENTO, F. J. L., *Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras*, Ed. Nobel, 1992.
- UNIVERSAL UNABRIDGED DICTIONARY, FULLY REVISED AND UPDATED, 1996, Barnes & Noble Books, autoria não mencionada.
- VAN BELLEN, H. M., RAUBER, D. L., SCHUCH, L. M. S., NARCISO FILHO, P. A. L., LAMBERTS, R. *Comparação de Softwares de Análise Térmica de Edificações: Análise de Sensitividade*. In: ANAIS DO II ENCONTRO

NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Florianópolis, 1993. Ed. Antac/Abergo/Sobrac. P 115-123.

WATERS, J. R. ;*Using the Admittance Method to Calculate Energy Consumption During Intermittent Plant Operation*. Building Services Engineering & Technology. Vol 2. No. 4, London, 1981, *apud* RORIZ, 1996.

13. Anexos

Anexo 1: Definições e Propriedades Térmicas dos Materiais de Construção

As propriedades e grandezas térmicas dos materiais e componentes construtivos utilizadas neste trabalho são apresentadas, em texto, adaptado do Comitê Brasileiro de Construção Civil, Comissão de Estudo de Desempenho Térmico de Edificações, parte 1, 1998;

Todas as unidades seguem o Sistema Internacional de Unidades.

Fluxo de calor ou taxa de transmissão de calor:

Quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração deste intervalo.

Símbolo: q

Unidade: W

Densidade de fluxo de calor

Quociente do fluxo de calor que atravessa uma superfície pela área da mesma.

Símbolo: Q

Unidade: W/m^2

Condutividade térmica de um material

Quociente do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura.

Símbolo: λ

Unidade: $W/(m.K)$

Observação: Quando existe transferência de calor por condução, convecção e radiação em materiais porosos deve-se usar o termo “condutividade térmica aparente”.

Resistência térmica de elementos e componentes

Quociente da diferença de temperatura verificada entre a superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.

Símbolo: R

Unidade: $(m^2.K)/W$

Observação: A resistência térmica de materiais é considerada para regime estacionário por necessidade de definição. No entanto, é empregada para os dois regimes.

Resistência superficial interna

Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção

Símbolo: R_{si}

Unidade: $(m^2.K)/W$

Coeficiente de condutância superficial interna

O coeficiente de condutância superficial interna é o inverso da resistência superficial interna.

Símbolo: h_i ;

Unidade: $W/ m^2\text{°C}$

Resistência superficial externa

Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção

Símbolo: R_{se}

Unidade: $(m^2.K)/W$

Coeficiente de condutância superficial externa

O coeficiente de condutância superficial externa é o inverso da resistência superficial externa.

Símbolo: h_e ;

Unidade: $W/m^{2}C$

Resistência térmica total

Associação das diversas resistências térmicas do componente em questão com as resistências superficiais interna e externa

Símbolo: R_T

Unidade: $(m^2.K)/W$

Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor

Inverso da resistência térmica total

Símbolo: U

Unidade: $W/(m^2.K)$

Capacidade térmica de um corpo

$C=dQ/dT$, onde dT é o aumento de temperatura em um sistema, como resultado da adição de uma pequena quantidade de calor dQ .

Símbolo: C

Unidade: J/K

Observação: Para que esta grandeza seja completamente definida, é necessário que o tipo de transformação seja especificado.

Calor específico de um material

Quociente da capacidade térmica pela massa

Símbolo: c

Unidade: $J/(kg.K)$

Capacidade térmica de componentes

Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um componente, por unidade de área.

Símbolo: C_T

Unidade: $J/(m^2.K)$

Densidade de um material

Quociente da massa pelo volume aparente de um corpo

Símbolo: ρ

Unidade: kg/m^3

Difusividade térmica de um material

Quociente da condutividade térmica (λ) pela capacidade de armazenar energia térmica (ρc) de um material.

Símbolo: Dif

Unidade: m^2/s

Atraso térmico de um componente

Tempo que transcorre entre os momentos de ocorrência da temperatura máxima do ar no exterior e no interior da edificação quando se verifica um fluxo de calor através de um componente construtivo submetido a uma variação periódica da temperatura do ar no exterior.

Símbolo: φ

Unidade: h

Observação: O atraso térmico depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão expostas.

Fator de calor solar

Quociente da energia solar absorvida por um componente pela energia solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.

Símbolo: FS

Unidade: adimensional

Emissividade

Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.

Símbolo: ϵ

Unidade: adimensional

Absortância à radiação solar

Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

Símbolo: α

Unidade: adimensional

Observação: A radiação solar está concentrada na região do espectro eletromagnético compreendida entre os comprimentos de onda de 0,2 e 3 μm .

Refletância à radiação solar

Quociente da taxa de radiação refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

Símbolo: ρ

Unidade: adimensional

Transmitância à radiação solar

Quociente da taxa de radiação solar que atravessa uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

Símbolo: τ

Unidade: adimensional

Anexo 2: Valores da admitância para alguns componentes.

Tabela A.1: valores de admitâncias.

Material	Densidade (Kg/m ³)	Condutividade (W/m°C)	Calor Específico (J/Kg °C)	Transmitância Térmica (W/m ² °C)	Admitância		Decremento	
					Y (W/m ² °C)	χY (W/°Ch)	f	φf (h)
Paredes								
Parede sólida, sem reboco, esp 105 mm	1700	0,84	800	3,3	4,2	1,2	0,88	2,5
Parede sólida, sem reboco, esp 220 mm	1700	0,84	800	2,3	4,6	1,5	0,54	6,0
Parede sólida, sem reboco, esp 335 mm	1700	0,84	800	1,7	4,7	1,4	0,29	9,4
Parede sólida com reboco pesado								
Parede, esp 105 mm	1700	0,84	800	3,0	6,1	2,3	0,83	3,0
Reboco, esp 16 mm	1300	0,5	1000					
Parede sólida com reboco pesado								
Parede, esp 220 mm	17300	0,84	800	2,1	6,6	2,1	0,50	6,5
Reboco, esp 16 mm	1300	0,5	1000					
Parede sólida com reboco pesado								
Parede, esp 335 mm	1700	0,84	800	1,7	6,5	2,0	0,25	9,9
Reboco, esp 16 mm	1300	0,50	1000					

Parede sólida com reboco leve								
Parede, esp 105 mm	1700	0,84	800	2,5	6,2	2,5	0,81	3,1
Reboco, esp 16 mm	600	0,16	1000					
Parede sólida com reboco leve								
Parede, esp 220 mm	1700	0,84	800	1,9	6,6	2,0	0,44	6,7
Reboco, esp 16 mm	600	0,16	1000					
Parede sólida com reboco leve								
Parede, esp 335 mm	1700	0,84	800	1,5	6,5	2,0	0,23	10,0
Reboco, esp 16 mm	600	0,16	1000					
Parede sólida com acabamento								
Parede, esp 220 mm	1700	0,84	800	1,9	6,6	2,0	0,45	6,7
Acabamento, esp 10 mm	950	0,16	840					
Paredes com furos (sem ventilação)								
Parede furada com 105 mm interna com reboco pesado no interior								
Tijolo, 105 mm	1700	0,84	800	1,5	6,5	2,6	0,43	7,8
Furo, < 20 mm	Resistência 0,18 m ²⁰ C/W							
Tijolo, 105 mm	1700	0,62	800					
Reboco, 16 mm	1300	0,50	1000					
Parede furada com 105 mm interna com reboco leve no interior								
Tijolo, 105 mm	1700	0,84	800	1,3	6,5	2,6	0,40	7,9

Furo, > 20 mm	Resistência 0,18 m ²⁰ C/W							
Tijolo, 105 mm	1700	0,62	800					
Reboco, 16 mm	600	0,16	1000					
Parede furada com 230 mm externo e 105 mm interno com reboco pesado no interior								
Tijolo, 230 mm	1700	0,84	800	1,2	6,6	2,0	0,20	11,7
Furo, > 20 mm	Resistência 0,18 m ²⁰ C/W							
Tijolo, 105 mm	1700	0,62	800					
Reboco, 16 mm	1300	0,50	1000					
Parede furada com 230 mm externo e 105 mm interno com reboco leve no interior								
Tijolo, 230 mm	1700	0,84	800	1,1	6,6	2,0	0,18	11,8
Furo, > 20 mm	Resistência 0,18 m ²⁰ C/W							
Tijolo, 105 mm	1700	0,62	800					
Reboco, 16 mm	600	0,16	1000					
Tijolo furado com cerâmica externa e bloco leve de concreto interno com reboco pesado interno								
Tijolo, 105 mm	1700	0,84	800	0,96	6,8	2,7	0,56	7,2
Furo, > 20 mm	Resistência 0,18 m ²⁰ C/W							
Bloco de concreto, 100 mm	600	0,19	1000					
Reboco, 16 mm	1300	0,50	1000					
Bloco de concreto com 50 mm de camada de madeira interna com reboco pesado no interior								
Concreto, 150 mm	2100	1,40	840	1,2	9,1	2,1	0,51	6,4

Madeira, 50 mm	500	0,10	1000					
Reboco, 16 mm	1300	0,50	1000					
Bloco de concreto com 50 mm de camada de madeira interna com reboco pesado no interior								
Concreto, 200 mm	2100	1,40	840	1,2	8,9	1,8	0,36	7,8
Madeira, 50 mm	500	0,10	1000					
Reboco, 16 mm	1300	0,50	1000					
Sanduíche pré moldado com 75 mm de concreto pesado, 25 mm de poliestireno expandido e 150 mm de concreto leve								
Concreto, 75 mm	2100	1,40	840	0,72	7,5	3,4	0,30	9,4
Poliestireno, 25 mm	25	0,033	1380					
Concreto leve, 150 mm	1200	0,38	1000					
Cobertura								
Asfalto 15 mm em revestimento de concreto leve, 75 mm em laje de concreto pesado, 150 mm								
Asfalto, 15 mm	1700	0,50	1000	1,9	5,0	2,2	0,36	7,4
Piso, 75 mm	1200	0,41	840					
Concreto pesado, 15 mm	2100	1,40	840					
Revestimento leve, 15 mm	1300	0,50	1000					
Asfalto 19 mm em 150 mm de concreto aerado autoclavado com revestimento interno pesado								
Asfalto	1700	0,50	1000	0,86	3,6	3,8	0,78	4,7
Concreto aerado	500	0,16	840					
Revestimento pesado	1300	0,50	1000					

Fonte: MILBANK & LYNN, 1974.

Anexo 3 – Desenvolvimento de cálculo para admitância de componentes

A. Cálculo de A

Sabe-se que

$$A = \cosh(1 + i)\phi \quad \text{(Equação A.100)}$$

Onde:

i: parte imaginária

ϕ : representado pela equação

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega L^2}{2\alpha}} \quad \text{(Equação A.101)}$$

Onde:

$\omega = 2\pi x$ freqüência da entrada de calor

L = espessura

α = difusividade térmica da camada = $\lambda/\rho c$

As relações de seno, cosseno, seno hiperbólico e cosseno hiperbólico são representadas por

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \text{(Equação A.102)}$$

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad \text{(Equação A.103)}$$

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \quad \text{(Equação A.104)}$$

$$\operatorname{sen} x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \quad \text{(Equação A.105)}$$

Da equação (A.3) tem-se que

$$2\operatorname{cos}x = e^{ix} + e^{-ix} \quad \text{(Equação A.106)}$$

e da equação (A.6)

$$2i\operatorname{sen}x = e^{ix} - e^{-ix} \quad \text{(Equação A.107)}$$

Fazendo a soma entre (A.7) e (A.8) chegamos a

$$(A.7) + (A.8) \Rightarrow 2\operatorname{cos}x + 2i\operatorname{sen}x = 2e^{ix} \Rightarrow 2(\operatorname{cos}x + i\operatorname{sen}x) = 2e^{ix} \quad \text{(Equação A.108)}$$

e fazendo-se a subtração entre (A.7) e (A.8) tem-se

$$(7) - (8) \Rightarrow 2\operatorname{cos}x - 2i\operatorname{sen}x = e^{ix} + e^{-ix} - (e^{ix} - e^{-ix}) \Rightarrow 2(\operatorname{cos}x - i\operatorname{sen}x) = 2e^{-ix} \quad \text{(Equação A.109)}$$

Portanto, das equações (A.9) e (A.10), respectivamente tem-se que:

$$e^{ix} = \operatorname{cos}x + i\operatorname{sen}x$$

$$e^{-ix} = \operatorname{cos}x - i\operatorname{sen}x$$

Desenvolvendo o cálculo de A, temos:

$$A = \operatorname{cosh}(1+i)\phi$$

$$\operatorname{cosh}(1+i)\phi = \frac{e^{(1+i)\phi} + e^{-(1+i)\phi}}{2} = \frac{1}{2}(e^\phi e^{i\phi} + e^{-\phi} e^{-i\phi}) = \frac{1}{2}e^\phi (\cos\phi + i\operatorname{sen}\phi) + \frac{1}{2}e^{-\phi} (\cos(-\phi) + i\operatorname{sen}(-\phi))$$

Portanto

$$\operatorname{cosh}(1+i)\phi = \frac{1}{2}(e^\phi \cos\phi + e^{-\phi} \cos(-\phi)) + \frac{i}{2}(e^\phi \operatorname{sen}(\phi) + i\operatorname{sen}(-\phi))$$

separando parte real e imaginária (fatores acompanhados da multiplicação do fator i) de A, temos:

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{\varphi} \cos \varphi + e^{-\varphi} \cos(-\varphi)}{2} = R \cosh[(1+i)\varphi] \quad \text{(Equação A.110)}$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{\varphi} \operatorname{sen} \varphi + e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi)}{2} = I \cosh[(1+i)\varphi] \quad \text{(Equação A.111)}$$

B. Cálculo de B

Sabe-se que

$$B = \frac{R \operatorname{senh}[(1+i)\varphi]}{(1+i)\varphi}$$

utilizando a equação A.4 tem-se:

$$\operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{e^{(1+i)\varphi} - e^{-(1+i)\varphi}}{2} = \frac{1}{2} e^{\varphi} e^{i\varphi} - \frac{1}{2} e^{-\varphi} e^{-i\varphi}$$

Das equações (A.9) e (A.10) temos

$$\operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{1}{2} e^{\varphi} (\cos \varphi + i \operatorname{sen} \varphi) - \frac{1}{2} e^{-\varphi} (\cos(-\varphi) + i \operatorname{sen}(-\varphi))$$

Portanto

$$\operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{1}{2} (e^{\varphi} \cos \varphi - e^{-\varphi} \cos(-\varphi)) + \frac{i}{2} (e^{-\varphi} \operatorname{sen}(\varphi) - e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi))$$

O primeiro termo é a parte real da equação desenvolvida e o segundo a parte imaginária, da seguinte maneira:

$$\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{\varphi} \cos \varphi - e^{-\varphi} \cos(-\varphi))}{2} \quad \text{(Equação A.112)}$$

$$\operatorname{Im} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{-\varphi} \operatorname{sen}(\varphi) - e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi))}{2} \quad \text{(Equação A.113)}$$

Para que seja possível a divisão de toda a equação de B em real e imaginária, é preciso usar a relação de multiplicação entre números complexos. Assim, multiplicando os termos por (1-i) teremos:

$$B = \frac{R \sinh[(1+i)\varphi]}{(1+i)\varphi} \cdot \frac{(1-i)}{(1-i)}$$

Sabendo que $(1+i)(1-i)=1-i^2$ e que i^2 é igual a -1 , teremos que o produto $(1+i)(1-i) = 2$

Assim

$$B = \frac{R(1-i)}{2\varphi} \cdot \sinh[(1+i)\varphi] = \frac{R}{2\varphi} (1-i)(\text{Re} \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi])$$

Onde

Resenh: parte real do seno hiperbólico, ilustrado na equação A.13;

Imsinh: parte imaginária do seno hiperbólico, ilustrado na equação A.14.

Desenvolvendo os cálculos, chegamos a

$$\text{Re } B = \frac{R}{2\varphi} (\text{Re} \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi]) \quad \text{(Equação A.114)}$$

$$\text{Im } B = \frac{R}{2\varphi} (I \sinh[(1+i)\varphi] - \text{Re} \sinh[(1+i)\varphi]) \quad \text{(Equação A.115)}$$

Onde

ReB: parte real de B

ImB parte imaginária de B

C. Cálculo de D:

Sabe-se que

$$D = \frac{(1+i)\varphi \sinh[(1+i)\varphi]}{R}$$

aplicando as equações já descritas anteriormente:

$$D = \frac{(1+i)\varphi(\text{Re} \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi])}{R}$$

efetuando os cálculos e separando os termos real e imaginário, teremos:

$$\text{Re } D = \frac{\varphi}{R} (\text{Re} \sinh[(1+i)\varphi] - I \sinh[(1+i)\varphi]) \quad \text{(Equação A.116)}$$

$$\text{Im } D = \frac{\varphi}{R} (\text{Re} \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi]) \quad \text{(Equação A.117)}$$

Estes cálculos valem para valores de admitâncias de componentes com apenas uma camada. Para componentes com mais de uma camada os cálculos serão descritos posteriormente.

D. Parâmetros para cálculo da admitância

A equação da admitância é representada por:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{G.R_{si} + H}{E.R_{si} + R_{si}.R_{so}.G + H.R_{so} + F}$$

Sendo:

$E=A$, logo $\text{Re}E=\text{Re}A$ e $\text{Im}E=\text{Im}A$;

$F=B$, logo $\text{Re}F=\text{Re}B$ e $\text{Im}F=\text{Im}B$;

$G=D$, logo $\text{Re}G=\text{Re}D$ e $\text{Im}G=\text{Im}D$;

$H=A$, logo $\text{Re}H=\text{Re}A$ e $\text{Im}H=\text{Im}A$.

$$\text{Denominando: } K = E.R_{si} + R_{si}.R_{so}.G + H.R_{so} + F \quad \text{(Equação A.118)}$$

$$M = E + R_{so}.G \quad \text{(Equação A.119)}$$

Fazendo as separações entre partes real e imaginária, tem-se:

$$\text{Re}K = \text{Re}E.R_{si} + R_{si}.R_{so}.\text{Re}G + \text{Re}H.R_{so} + \text{Re}F$$

$$\text{Im}K = \text{Im}E \cdot R_{si} + R_{si} \cdot R_{so} \cdot \text{Im}G + \text{Im}H \cdot R_{so} + \text{Im}F$$

$$\text{Re}M = \text{Re}G \cdot R_{si} + \text{Re}H$$

$$\text{Im}M = \text{Im}G \cdot R_{si} + \text{Im}G$$

Para a divisão de números complexos, sabe-se que:

$$Y = \frac{M}{K} = \frac{\text{Re } M + \text{Im } M \cdot i}{\text{Re } K + \text{Im } K \cdot i}$$

Multiplicando os fatores por $(\text{Re}M - \text{Im}M \cdot i)$, tem-se:

$$Y = \frac{M}{K} = \frac{\text{Re } M + \text{Im } M \cdot i}{\text{Re } K + \text{Im } K \cdot i} \cdot \frac{(\text{Re } K - \text{Im } K \cdot i)}{(\text{Re } K - \text{Im } K \cdot i)} = \frac{(\text{Re } M + \text{Im } M \cdot i)(\text{Re } K - \text{Im } K \cdot i)}{\text{Re } K^2 + \text{Im } K^2}$$

Efetuada os cálculos necessários, chegaremos a:

$$\text{Re } Y = \frac{\text{Re } K \cdot \text{Re } M + \text{Im } K \cdot \text{Im } M}{\text{Re } K^2 + \text{Im } K^2} \quad \text{(Equação A.120)}$$

$$\text{Im } Y = \frac{\text{Re } K \cdot \text{Im } M - \text{Re } M \cdot \text{Im } K}{\text{Re } K^2 + \text{Im } K^2} \quad \text{(Equação A.121)}$$

O valor final da admitância é dado por:

$$Y = \sqrt{\text{Re } Y^2 + \text{Im } Y^2} \quad \text{(Equação A.122)}$$

E. Exemplo prático:

Para o teste de cálculo da admitância foi utilizado o exemplo de MILBANK e LYNN, 1974, para uma parede de tijolo sólido, sem reboco, cujas propriedades são:

Densidade: $\rho=1700 \text{ kg/m}^3$;

Condutividade térmica: $\lambda=0,84 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

Calor específico: $c=800 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$;

Resistência superficial externa: $R_{si} = 0,055 \text{ m}^2\text{C/W}$;

Resistência superficial interna: $R_{se} = 0,123 \text{ m}^2\text{C/W}$.

E.1. Cálculos iniciais:

1. Resistência da camada:

$$R = \frac{L}{\lambda}$$

Para uma parede de espessura 0,22 m, teremos

$$R = \frac{0,22}{0,84}$$

$$R=0,262 \text{ m}^2\text{C/W}$$

2. Difusividade térmica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\alpha = \frac{0,84}{1700 \cdot 800}$$

$$\alpha = 6,176\text{E-}07$$

3. Cálculo de ϕ

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega L^2}{2\alpha}}$$

$$\omega = \pi / (24 \cdot 3600) = 3,636E-05$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{3,636E-05(0,22)^2}{2,6,176E-07}}$$

$$\varphi = 1,688$$

4. Cálculo de A

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{\varphi} \cos \varphi + e^{-\varphi} \cos(-\varphi)}{2} = R \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{1,688} \cos(1,688) + e^{-1,688} \cos(-1,688)}{2} = -0,327$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{\varphi} \operatorname{sen} \varphi + e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi)}{2} = I \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{1,688} \operatorname{sen}(1,688) + e^{-1,688} \operatorname{sen}(-1,688)}{2} = 2,594$$

5. Cálculo de B

Parte real do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{\varphi} \cos \varphi - e^{-\varphi} \cos(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{1,688} \cos(1,688) - e^{-1,688} \cos(-1,688))}{2} = -0,305$$

Parte imaginária do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Im} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{-\varphi} \operatorname{sen}(\varphi) - e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{-1,688} \operatorname{sen}(1,688) - e^{-1,688} \operatorname{sen}(-1,688))}{2} = 2,778$$

$$\operatorname{Re} B = \frac{0,262}{2 \cdot 1,688} (-0,305 + 2,778) = 0,192$$

$$\text{Im } B = \frac{0,262}{2.1,688} (2,788 - (-0,305)) = 0,239$$

6. Cálculo de D:

$$\text{Re } D = \frac{\varphi}{R} (\text{Re } \sinh[(1+i)\varphi] - I \sinh[(1+i)\varphi])$$

$$\text{Re } D = \frac{1,688}{0,262} (-0,305 - 2,778) = -19,870$$

$$\text{Im } D = \frac{\varphi}{R} (\text{Re } \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi])$$

$$\text{Im } D = \frac{1,688}{0,262} (-0,305 + 2,778) = 15,933$$

7. Parâmetros para cálculo da admitância

E=A, logo

ReE=ReA=-0,327;

ImE=ImA=2,594;

F=B, logo

ReF=ReB=0,192;

ImF=ImB=0,239;

G=D, logo

$$\text{ReG}=\text{ReD}=-19,870;$$

$$\text{ImG}=\text{ImD}=15,933;$$

$$H=A, \text{ logo}$$

$$\text{ReH}=\text{ReA}=-0,327.;$$

$$\text{ImH}=\text{ImA}=2,594.$$

8. Cálculo de K:

$$\text{ReK} = \text{ReE} \cdot R_{si} + R_{si} \cdot R_{so} \cdot \text{ReG} + \text{ReH} \cdot R_{so} + \text{ReF} = -0,001$$

$$\text{ImK} = \text{ImE} \cdot R_{si} + R_{si} \cdot R_{so} \cdot \text{ImG} + \text{ImH} \cdot R_{so} + \text{ImF} = 0,809$$

$$\text{ReM} = \text{ReG} \cdot R_{si} + \text{ReH} = -1,42;$$

$$\text{ImM} = \text{ImG} \cdot R_{si} + \text{ImH} = 3,47$$

$$\text{ReY} = \frac{\text{ReK} \cdot \text{ReM} + \text{ImK} \cdot \text{ImM}}{\text{ReK}^2 + \text{ImK}^2} = \frac{-0,001 \cdot (-1,420) + 0,809 \cdot 3,470}{(-0,001)^2 + (0,809)^2} = 4,290$$

$$\text{ImY} = \frac{\text{ReK} \cdot \text{ImM} - \text{ReM} \cdot \text{ImK}}{\text{ReK}^2 + \text{ImK}^2} = \frac{(-0,001) \cdot (3,47) - (-1,42) \cdot (0,809)}{(-0,001)^2 + (0,809)^2} = 1,749$$

O valor final da admitância é dado então por

$$Y = \sqrt{\text{ReY}^2 + \text{ImY}^2} = \sqrt{(4,29)^2 + (1,749)^2} = 4,632 \quad (\text{W/m}^{20}\text{C})$$

De acordo com MILBANK & LYNN, o valor da admitância para este caso é 4,6 W/m²⁰C), mostrando que os cálculos encontram-se de acordo com o valor esperado.

Dentro dos cálculos apresentados, alguns materiais foram testados para verificação dos valores de admitância, apresentados na tabela a seguir.

Tabela A.2: valores comparativos entre componentes.

Material	Admitância (W/m²°C)	
	Calculado	Esperado
Parede sólida, sem reboco, e = 105 mm	4,205	4,2
Parede sólida, sem reboco, e = 220 mm	4,636	4,6
Parede sólida, sem reboco, e = 335 mm	4,664	4,7

Conforme demonstrado acima, todos os valores aproximaram-se do indicado por MILBANK & LYNN.

E.2. Cálculo do valor da admitância para materiais heterogêneos.

Quando se trata de cálculos para materiais heterogêneos, ou seja, com mais de uma camada, os cálculos tornam-se mais complexos e serão descritos a seguir.

1. Cálculo de ϕ

Deverá ser calculado o valor de ϕ para cada uma de todas as camadas do componente, conforme descrito no procedimento para cálculo de material homogêneo.

2. Cálculo de A

Assim como no cálculo de ϕ , deve ser calculado um valor de ReA e ImA para cada uma das camadas.

3. Cálculo de B

Repete-se aqui o mesmo procedimento da camada A.

4. Cálculo de D:

Idem cálculo de ReA, ReB, ImA e ImB.

5. Cálculo de E, F, G e H

Os cálculos para estes parâmetros, no caso de componentes heterogêneos, tornam-se mais complexos, pois envolvem multiplicação de matrizes complexas.

Sabemos que

$$\begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ D & A \end{bmatrix}$$

No caso de elementos heterogêneos, esta relação torna-se:

$$\begin{bmatrix} E & F \\ G & H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ D_1 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ D_2 & A_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ D_n & A_n \end{bmatrix}$$

Vamos fazer o primeiro cálculo supondo um elemento com 2 camadas.

Sabe-se que

$$A = \text{Re}A + \text{Im}A_i$$

$$B = \text{Re}B + \text{Im}B_i$$

$$C = \text{Re}C + \text{Im}C_i$$

$$D = \text{Re}D + \text{Im}D_i$$

Sabemos que:

- A primeira camada apresenta os parâmetros A_1 , cujas partes real e imaginária são $\text{Re}A_1$, $\text{Im}A_1$, valendo o mesmo para B_1 ($\text{Re}B_1$, $\text{Im}B_1$), C_1 ($\text{Re}C_1$, $\text{Im}C_1$), D_1 ($\text{Re}D_1$, $\text{Im}D_1$);
- A segunda camada possui os mesmos parâmetros: A_2 ($\text{Re}A_2$, $\text{Im}A_2$), B_2 ($\text{Re}B_2$, $\text{Im}B_2$), C_2 ($\text{Re}C_2$, $\text{Im}C_2$), D_2 ($\text{Re}D_2$, $\text{Im}D_2$).

Portanto, o produto de matrizes resultará em:

$$E = A_1 A_2 + B_1 D_2;$$

$$F = A_1 B_2 + B_1 C_2;$$

$$G = D_1 A_2 + C_1 D_2;$$

$$H = D_1 B_2 + C_1 C_2.$$

Sabendo que:

$$A_1 = \text{Re}A_1 + \text{Im}A_1 i;$$

$$A_2 = \text{Re}A_2 + \text{Im}A_2 i;$$

$$B_1 = \text{Re}B_1 + \text{Im}B_1 i;$$

$$B_2 = \text{Re}B_2 + \text{Im}B_2 i;$$

$$C_1 = \text{Re}C_1 + \text{Im}C_1 i;$$

$$C_2 = \text{Re}C_2 + \text{Im}C_2 i;$$

$$D_1 = \text{Re}D_1 + \text{Im}D_1 i;$$

$$D_2 = \text{Re}D_2 + \text{Im}D_2 i.$$

E aplicando estas relações para a multiplicação de matrizes, teremos:

$$E = (\text{Re}A_1 + \text{Im}A_1 i)(\text{Re}A_2 + \text{Im}A_2 i) + (\text{Re}B_1 + \text{Im}B_1 i)(\text{Re}D_2 + \text{Im}D_2 i).$$

$$E = \text{Re}A_1 \text{Re}A_2 + \text{Re}A_1 \text{Im}A_2 i + \text{Im}A_1 \text{Re}A_2 i + \text{Im}A_1 \text{Im}A_2 i^2 + \text{Re}B_1 \text{Re}D_2 + \text{Re}B_1 \text{Im}D_2 i + \text{Im}B_1 \text{Re}D_2 i + \text{Im}B_1 \text{Im}D_2 i^2$$

Sabendo que $i^2 = -1$, teremos

$$E = \text{Re}A_1 \text{Re}A_2 - \text{Im}A_1 \text{Im}A_2 + \text{Re}B_1 \text{Re}D_2 -$$

$$\text{Im}B_1 \text{Im}D_2 + (\text{Re}A_1 \text{Im}A_2 + \text{Im}A_1 \text{Re}A_2 + \text{Re}B_1 \text{Im}D_2 + \text{Im}B_1 \text{Re}D_2) i$$

Separando as partes real e imaginária, teremos:

$$\text{Re}E = \text{Re}A_1 \text{Re}A_2 - \text{Im}A_1 \text{Im}A_2 + \text{Re}B_1 \text{Re}D_2 - \text{Im}B_1 \text{Im}D_2$$

$$\text{ImE} = \text{ReA}_1 \text{ImA}_2 + \text{ImA}_1 \text{ReA}_2 + \text{ReB}_1 \text{ImD}_2 + \text{ImB}_1 \text{ReD}_2$$

O mesmo cálculo vale para os demais parâmetros:

$$\text{ReF} = \text{ReA}_1 \text{ReB}_2 - \text{ImA}_1 \text{ImB}_2 + \text{ReB}_1 \text{ReC}_2 - \text{ImB}_1 \text{ImC}_2$$

$$\text{ImF} = \text{ReA}_1 \text{ImB}_2 + \text{ImA}_1 \text{ReB}_2 + \text{ReB}_1 \text{ImC}_2 + \text{ImB}_1 \text{ReC}_2$$

$$\text{ReG} = \text{ReD}_1 \text{ReA}_2 - \text{ImD}_1 \text{ImA}_2 + \text{ReC}_1 \text{ReD}_2 - \text{ImC}_1 \text{ImD}_2$$

$$\text{ImG} = \text{ReD}_1 \text{ImA}_2 + \text{ImD}_1 \text{ReA}_2 + \text{ReC}_1 \text{ImD}_2 + \text{ImC}_1 \text{ReD}_2$$

$$\text{ReH} = \text{ReD}_1 \text{ReB}_2 - \text{ImD}_1 \text{ImB}_2 + \text{ReC}_1 \text{ReC}_2 - \text{ImC}_1 \text{ImC}_2$$

$$\text{ImH} = \text{ReD}_1 \text{ImB}_2 + \text{ImD}_1 \text{ReB}_2 + \text{ReC}_1 \text{ImC}_2 + \text{ImC}_1 \text{ReC}_2$$

Vale observar que o elemento 1 equivale ao material externo.

Para elementos com mais camadas, o cálculo também é o mesmo, aumentando-se o número de matrizes na multiplicação.

6. Cálculos de ReJ, ImJ, ReK, ImK, ReL, ImL, ReM, ImM, ReAD, ImAD e AD

Seguem os mesmos cálculos descritos para componentes homogêneos.

E.3. Exemplo numérico para componentes heterogêneos:

Foi usado como exemplo o componente descrito em MILBANK & LYNN:

Tabela A.3: valores de componentes.

Camada	Material	Espessura	Condutividade	Massa Específica	Calor Específico
		L [m]	CD [W/(m °C)]	ME [kg / m ³]	CE [J / (kg °C)]
1	Tijolo cerâmico	0.150	0.840	1700	800
2	Reboco	0.016	0.500	1300	1000

a) Cálculos para a camada 1:

1. Resistência da camada:

$$R = \frac{L}{\lambda}$$

$$R = \frac{0,150}{0,84}$$

$$R=0,125 \text{ m}^2\text{C/W}$$

2. Difusividade térmica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\alpha = \frac{0,84}{1700 \cdot 800}$$

$$\alpha = 6,176\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$$

3. Cálculo de ϕ

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega L^2}{2\alpha}}$$

$$\omega = \pi / (24 \cdot 3600) = 3,636\text{E-}05$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{3,636E-05(0,15)^2}{2,6,176E-07}}$$

$$\varphi = 0,806$$

4. Cálculo de A

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{\varphi} \cos \varphi + e^{-\varphi} \cos(-\varphi)}{2} = R \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{0,806} \cos(0,806) + e^{-0,806} \cos(-0,806)}{2} = -0,930$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{\varphi} \operatorname{sen} \varphi + e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi)}{2} = I \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{0,806} \operatorname{sen}(0,806) + e^{-0,806} \operatorname{sen}(-0,806)}{2} = 0,646$$

5. Cálculo de B

Parte real do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{\varphi} \cos \varphi - e^{-\varphi} \cos(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{0,806} \cos(0,806) - e^{-0,806} \cos(-0,806))}{2} = -0,620$$

Parte imaginária do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Im} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{-\varphi} \operatorname{sen}(\varphi) - e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{-0,806} \operatorname{sen}(0,806) - e^{-0,806} \operatorname{sen}(-0,806))}{2} = 0,968$$

$$\operatorname{Re} B = \frac{0,125}{2 \cdot 0,806} (-0,620 + 0,968) = 0,123$$

$$\operatorname{Im} B = \frac{0,125}{2 \cdot 0,806} (0,968 - (-0,620)) = 0,027$$

6. Cálculo de D:

$$\operatorname{Re} D = \frac{\varphi}{R} (\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] - I \operatorname{senh}[(1+i)\varphi])$$

$$\operatorname{Re} D = \frac{0,806}{0,125} (-0,620 - 0,968) = -2,242$$

$$\text{Im } D = \frac{\varphi}{R} (\text{Re } \sinh[(1+i)\varphi] + I \sinh[(1+i)\varphi])$$

$$\text{Im } D = \frac{0,806}{0,125} (-0,620 + 0,968) = 10,239$$

b) Cálculos para a camada 2:

1. Resistência da camada:

$$R = \frac{L}{\lambda}$$

$$R = \frac{0,016}{0,500}$$

$$R = 0,032 \text{ m}^2\text{C/W}$$

2. Difusividade térmica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\alpha = \frac{0,500}{1300 \cdot 1000}$$

$$\alpha = 3,846\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$$

3. Cálculo de ϕ

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega L^2}{2\alpha}}$$

$$\omega = \pi / (24 \cdot 3600) = 3,636\text{E-}05$$

$$\phi = \sqrt{\frac{3,636\text{E-}05 (0,016)^2}{2 \cdot 3,846\text{E-}07}}$$

$$\phi = 0,156$$

4. Cálculo de A

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{\varphi} \cos \varphi + e^{-\varphi} \cos(-\varphi)}{2} = R \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Re} A = \frac{e^{0,156} \cos(0,156) + e^{-0,156} \cos(-0,156)}{2} = -1,000$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{\varphi} \operatorname{sen} \varphi + e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi)}{2} = I \cosh[(1+i)\varphi]$$

$$\operatorname{Im} A = \frac{e^{0,156} \operatorname{sen}(0,156) + e^{-0,156} \operatorname{sen}(-0,156)}{2} = 0,024$$

5. Cálculo de B

Parte real do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{\varphi} \cos \varphi - e^{-\varphi} \cos(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{0,156} \cos(0,156) - e^{-0,156} \cos(-0,156))}{2} = 0,154$$

Parte imaginária do seno hiperbólico:

$$\operatorname{Im} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] = \frac{(e^{-\varphi} \operatorname{sen}(\varphi) - e^{-\varphi} \operatorname{sen}(-\varphi))}{2} = \frac{(e^{-0,156} \operatorname{sen}(0,156) - e^{-0,156} \operatorname{sen}(-0,156))}{2} = 0,157$$

$$\operatorname{Re} B = \frac{0,032}{2 \cdot 0,156} (0,154 + 0,157) = 0,032$$

$$\operatorname{Im} B = \frac{0,032}{2 \cdot 0,156} (0,157 - (-0,154)) = 0,000$$

6. Cálculo de D:

$$\operatorname{Re} D = \frac{\varphi}{R} (\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] - I \operatorname{senh}[(1+i)\varphi])$$

$$\operatorname{Re} D = \frac{0,156}{0,032} (0,154 - 0,157) = -0,012$$

$$\operatorname{Im} D = \frac{\varphi}{R} (\operatorname{Re} \operatorname{senh}[(1+i)\varphi] + I \operatorname{senh}[(1+i)\varphi])$$

$$\operatorname{Im} D = \frac{0,156}{0,032} (0,154 + 0,157) = 1,513$$

7. Cálculo de E, F, G e H.

$$\text{ReE} = \text{ReA}_1\text{ReA}_2 - \text{ImA}_1\text{ImA}_2 + \text{ReB}_1\text{ReD}_2 - \text{ImB}_1\text{ImD}_2 = 0,872$$

$$\text{ImE} = \text{ReA}_1\text{ImA}_2 + \text{ImA}_1\text{ReA}_2 + \text{ReB}_1\text{ImD}_2 + \text{ImB}_1\text{ReD}_2 = 0,855$$

O mesmo cálculo vale para os demais parâmetros:

$$\text{ReF} = \text{ReA}_1\text{ReB}_2 - \text{ImA}_1\text{ImB}_2 + \text{ReB}_1\text{ReC}_2 - \text{ImB}_1\text{ImC}_2 = 0,152$$

$$\text{ImF} = \text{ReA}_1\text{ImB}_2 + \text{ImA}_1\text{ReB}_2 + \text{ReB}_1\text{ImC}_2 + \text{ImB}_1\text{ReC}_2 = 0,051$$

$$\text{ReG} = \text{ReD}_1\text{ReA}_2 - \text{ImD}_1\text{ImA}_2 + \text{ReC}_1\text{ReD}_2 - \text{ImC}_1\text{ImD}_2 = -3,478$$

$$\text{ImG} = \text{ReD}_1\text{ImA}_2 + \text{ImD}_1\text{ReA}_2 + \text{ReC}_1\text{ImD}_2 + \text{ImC}_1\text{ReD}_2 = 11,582$$

$$\text{ReH} = \text{ReD}_1\text{ReB}_2 - \text{ImD}_1\text{ImB}_2 + \text{ReC}_1\text{ReC}_2 - \text{ImC}_1\text{ImC}_2 = 0,840$$

$$\text{ImH} = \text{ReD}_1\text{ImB}_2 + \text{ImD}_1\text{ReB}_2 + \text{ReC}_1\text{ImC}_2 + \text{ImC}_1\text{ReC}_2 = 0,996$$

8. Cálculo dos parâmetros J, K, L e M

$$\text{ReJ} = \text{ReE} + \text{Rso} * \text{ReG} = 0,681$$

$$\text{ImJ} = \text{ImE} + \text{Rso} * \text{ImG} = 1,492$$

$$\text{ReK} = \text{ReE} * \text{Rsi} + \text{Rsi} * \text{Rso} * \text{ReG} + \text{Rso} * \text{ReH} + \text{ReF} = 0,282$$

$$\text{ImK} = \text{ImE} * \text{Rsi} + \text{Rsi} * \text{Rso} * \text{ImG} + \text{Rso} * \text{ImH} + \text{ImF} = 0,289$$

$$\text{ReL} = \text{ReG} = -3,478$$

$$\text{ImL} = \text{ImG} = 11,582$$

$$\text{ReM} = \text{ReG} * \text{Rsi} + \text{ReH} = 0,412$$

$$\text{ImM} = \text{ImG} * \text{Rsi} + \text{ImH} = 2,420$$

9. Divisão entre números complexos:

$$\text{ReAD} = (\text{WA} * \text{WC} + \text{WB} * \text{WD}) / (\text{WC}^2 + \text{WD}^2) = -3,820$$

$$\text{ImAD} = (\text{WC} * \text{WB} - \text{WA} * \text{WD}) / (\text{WC}^2 + \text{WD}^2) = -1,373$$

10. Cálculo da Admitância:

$$\text{ADM} = \text{SQR}(\text{ReAD}^2 + \text{ImAD}^2) = 4,059 \text{ W/m}^{20}\text{c}$$

O valor esperado, de acordo com MILBANK & LYNN, 1974, é de 4,1, o que também demonstra que estes cálculos estão corretos.

Usando o mesmo componente com espessuras diferentes, os valores obtidos foram:

Tabela A.4 : valores obtidos para admitância.

Componente	Admitância (W/m²⁰C)	
	Calculado	Citado em Milbank e Lynn,1974
Parede sólida, com reboco denso Parede: e = 105 mm Reboco: e = 16 mm	4,059	4,1
Parede sólida, com reboco denso Parede: e = 220 mm Reboco: e = 16 mm	4,413	4,4
Parede sólida, com reboco denso Parede: e = 335 mm Reboco: e = 16 mm	4,416	4,4

Observa-se, portanto, que os resultados foram bem próximos dos apresentados na literatura.

Anexo 4 – tabela com valores de fator solar para vidros

Tabela A.5: fator de ganho solar para os vidros.

Valores para o Fator de Ganho Solar para sistemas usuais						
Vidros sem proteção	Caixilho simples			Caixilho duplo		
Vidro comum	0,76			0,64		
Vidro especial (reflexão média)	0,51			0,44		
Vidro especial (alta reflexão)	0,26			0,25		
Valores para o Fator de Ganho Solar para sistemas usuais						
Proteção exterior	Cor da proteção			Cor da proteção		
	Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Treliça madeira, 1 a 2 cm de vão	0,043	0,082	0,121	0,036	0,059	0,082
Esteira madeira ou toldo de lona	0,063	0,098	0,133	0,035	0,064	0,093
Persiana	0,100	0,110	0,120	0,080	0,090	0,100
Veneziana de madeira	0,018	0,037	0,056	0,060	0,079	0,098
Veneziana de lâmina delgada	0,123	0,132	0,141	0,080	0,090	0,100
Valores para o Fator de Ganho Solar para sistemas usuais (continuação)						
Proteção entre os vidros	Cor da proteção			Cor da proteção		
	Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Veneziana de lâmina delgada	-	-	-	0,269	0,352	0,435
Cortina pouco transparente	-	-	-	0,272	0,375	0,478
Cortina muito transparente	-	-	-	0,452	0,607	0,762
Proteção interior	Cor da proteção			Cor da proteção		
	Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Veneziana de lâmina delgada	0,434	0,571	0,709	0,452	0,607	0,762
Cortina pouco transparente	0,315	0,474	0,633	0,365	0,543	0,722
Cortina muito transparente	0,403	0,472	0,542	0,412	0,559	0,707

Fonte: RORIZ, 1996.

Anexo 5 – Planilha “UniClim”.