

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS EM ESTRUTURA METÁLICA

AUTORA: MARIA ANGÉLICA VIEIRA PINTO

ORIENTADORES: Prof. Dr. Henor Artur de Souza
Prof. Dr. Márcilio Sousa da Rocha Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, julho de 2000.

P659 Pinto, Maria Angélica Vieira
2000 Avaliação Térmica de Edifícios em Estrutura Metálica /
Maria Angélica Vieira Pinto - Ouro Preto, UFOP, 2000.
xiii. 87 p., il.

VIII, 168p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas.

1 – Conforto térmico – Construção metálica
I. UFOP/EM II. Título.

CDU 697

DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada,
com amor e carinho,
à minha tia Didina.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos à Universidade Federal de Ouro Preto, que proporcionou a realização deste trabalho, e às pessoas que muito contribuíram para o desenvolvimento do mesmo:

- Ao arquiteto João Diniz, pelo projeto arquitetônico da edificação analisada.
- Alberto Hernandez Neto e Arlindo Tribess, devido ao apoio técnico.
- Aos bolsistas da FAPEMIG, Jane e Fred pela ajuda para o desenvolvimento de aprendizagem do programa.
- Ao Marcílio da Rocha Freitas pela orientação deste trabalho.
- Aos meus colegas, pela boa convivência nestes anos de mestrados.
- Aos demais amigos, colegas familiares e ao José Geraldo, que sempre me apoiaram das mais diversas formas, com compreensão e carinho, devido à minha ausência para o desenvolvimento deste trabalho.
- E em especial ao Henor Artur de Souza, pela atenção durante a fase de desenvolvimento da dissertação e pela grande amizade.

AVALIAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS EM ESTRUTURA METÁLICA

AUTORA: MARIA ANGÉLICA VIEIRA PINTO

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 3 de julho de 2000, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Henor Artur de Souza (Orientador / DETEF / UFOP)

Prof. Dr. Marcílio de Sousa da Rocha Freitas (Orientador / UFOP)

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP)

Prof. Dr. Arlindo Tribess (USP)

RESUMO

A solução para se ter conforto num ambiente construído está na adequação do projeto da envolvente da edificação (paredes, coberturas e aberturas). O desempenho térmico de edificações é um fator importante para a construção de habitações sociais. No entanto, a disponibilidade de energia, até o momento, fez com que os projetistas de edificações não dessem importância à questão da adequação climática das edificações. Uma edificação projetada de forma adequada para o clima no qual está inserida torna-se confortável, além de economizar energia. Este trabalho faz um estudo dinâmico de avaliação do desempenho térmico de um edifício em estrutura metálica, baseado em um modelo de referência, localizado na cidade de Belo Horizonte, MG. Avalia-se a capacidade de troca térmica dos elementos de vedação externa e interna utilizadas na edificação e também verifica-se a eficiência térmica de outros elementos de vedação. A análise térmica é realizada através de uma simulação detalhada do comportamento térmico da edificação, utilizando-se o programa computacional de simulação ESP-r. Verificam-se os princípios de arquitetura climática nesse edifício comercial e os ganhos de calor originados no exterior, devidos à radiação solar e às cargas de calor geradas nos ambientes internos. Os resultados obtidos servem de base para a busca do equilíbrio entre clima, conforto e custos, combinando os elementos e materiais construtivos, com o aproveitamento racional das condições climáticas do lugar de implantação do projeto.

ABSTRACT

The proper design of the boundary of a building (walls, coverings and openings) is the way to have comfort in the building ambient. The thermal performance is an important factor for the construction of social habitations; however, the availability of energy, until now, induce the designers to give no importance to the subject of the climatic adaptation of the constructions. Buildings designed in an appropriate way for the region climate become more comfortable, besides saving energy. The present work performance of a building in steel structure, based on a reference model, located in Belo Horizonte, MG. The capacity of thermal change of external and internal insulation elements used in the building is evaluated and the thermal efficiency of other insulation elements is also checked. The thermal analysis is performed through a detailed simulation of the thermal behavior of the building by using the computational simulation program ESP-r. This study took into consideration the principles of climatic architecture in this commercial building and the gains of heat originated in the exterior due to solar radiation and the load of heat generated inside the building. The results are used as a bases for the search of the compromise among climate, comfort and costs, combining the elements and constructive materials with the rational use of the climatic conditions of the construction site.

SUMÁRIO

Resumo	VI
Abstract	VII
Lista de Figuras.....	XI
Lista de Tabelas	XV

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Introdução	1
1.1 – Objetivos do trabalho.....	3
1.2 – Estrutura do trabalho.....	4

Capítulo 2 – CONSTRUÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Construções em estruturas metálicas	6
2.1 – Elementos de vedação.....	7

Capítulo 3 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Avaliação do desempenho térmico de edificações	14
3.1 – Etapas do processo de avaliação	16
3.2 – Etapas da simulação.....	17
3.2.1 – Levantamento das informações climáticas	17
3.2.2 – Levantamento das Informações da Edificação	19
3.2.3 – Levantamento das informações sobre as propriedades térmicas dos materiais componentes da edificação	19

3.2.4 – Determinação do ganho de calor devido à radiação solar.....	20
3.2.5 – Determinação do ganho de calor por condução em regime transitório.....	20
3.2.6 – Determinação do ganho de calor devido à fontes de calor internas.....	20
3.2.7 – Determinação do ganho de calor por troca de massas de ar.....	21
3.2.8 – Determinação das cargas térmicas de condicionamento e das temperaturas do ambiente.....	21
3.2.8.1 – Métodos simplificados para o cálculo de carga térmica	24
3.2.8.2 – Métodos detalhados para o cálculo da carga térmica	25
3.2.8.3 – Métodos intermediários para o cálculo da carga térmica	26
3.3 – Determinação do comportamento térmico da edificação.....	26
3.3.1 – Softwares de simulação	28

Capítulo 4 – **METODOLOGIA ADOTADA**

Metodologia adotada.....	30
4.1 – Edificação analisada.....	31
4.2 – Dados climáticos de Belo Horizonte	35
4.3 – Etapas da simulação.....	37
4.3.1 – Dados climáticos.....	37
4.3.2 – Dados da edificação	38
4.4 – Estudo de caso	38
4.5 – Materiais alternativos utilizados na análise	39

Capítulo 5 – **RESULTADOS**

Resultados.....	40
5.1 – Avaliação do software empregado.....	40
5.1.1 – Estudo de caso – exemplo 1.....	40
5.1.2 – Estudo de caso – exemplo 2.....	44
5.2 – Resultados.....	46

Capítulo 6 – **CONCLUSÕES**

Conclusões.....	80
-----------------	----

Capítulo 7 – **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Referências bibliográficas.....	82
---------------------------------	----

APÊNDICE I

Apêndice I.....	I - 1
-----------------	-------

LISTA DE FIGURAS

Página

Capítulo 1

Figura 1.1 – Maneira lógica de projeto.....	4
---	---

Capítulo 2

Figura 2.1 – Estruturas metálicas no exterior	6
Figura 2.2 – Pannel de gesso	8
Figura 2.3 – Pannel isolite	9
Figura 2.4 – Sistema de placas cimentícia.....	10
Figura 2.5 – Esquema das placas cimentícias.....	10
Figura 2.6 – Steel deck	11
Figura 2.7 – Seção transversal típica	11
Figura 2.8 – Colégio pré-vestibular Pitágoras	12
Figura 2.9 – Terminal rodoviário de Uberlândia	12
Figura 2.10 – Aeroporto internacional do Galeão	13

Capítulo 3

Figura 3.1 – Principais elementos para a simulação térmica de uma edificação	17
---	----

Capítulo 4

Figura 4.1 – Fachadas do edifício	30
Figura 4.2 – Detalhes arquitetônicos	31
Figura 4.3 – Detalhes arquitetônicos	31
Figura 4.4 – Pannel artístico	32
Figura 4.5 – Planta baixa	33
Figura 4.6 – Localização do Brasil e do Estado de Minas Gerais	34

Figura 4.7 – Localização de Belo Horizonte	35
--	----

Capítulo 5

Figura 5.1 – Planta e corte do galpão.....	42
Figura 5.2 – Temperatura interna e externa do galpão – 10 ren/h. Dia típico de verão.....	44
Figura 5.3 – Carga térmica de resfriamento da sala 02. Vedação Interna – alvenaria, vedação externa – painel isolite	45
Figura 5.4 – Carga térmica de resfriamento da sala 08. Vedação Interna – alvenaria, vedação externa – painel isolite	45
Figura 5.5 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 10 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	49
Figura 5.6 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 10 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	49
Figura 5.7 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 10 ren/h. Vedação interna com alvenaria	51
Figura 5.8 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 10 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	51
Figura 5.9 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 10 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	53
Figura 5.10 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 10 ren/h Vedação interna com painel de gesso	53
Figura 5.11 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão– 10 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	54
Figura 5.12 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 10 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	54
Figura 5.13 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 30 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	55
Figura 5.14 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 30 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	55

Figura 5.15 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 30 ren/h. Vedação interna com alvenaria	58
Figura 5.16 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 30 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	58
Figura 5.17 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 30 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	59
Figura 5.18 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 30 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	59
Figura 5.19 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão– 30 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	61
Figura 5.20 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 30 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	61
Figura 5.21 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 60 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	62
Figura 5.22 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 60 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	62
Figura 5.23 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 60 ren/h. Vedação interna com alvenaria	63
Figura 5.24 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 60 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	63
Figura 5.25 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 60 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	64
Figura 5.26 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 60 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	64
Figura 5.27 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão– 60 ren/h. Vedação interna com alvenaria.....	65
Figura 5.28 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 60 ren/h Vedação interna com painel de gesso.....	65
Figura 5.29 – Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão. Vedação interna com alvenaria.....	68
Figura 5.30 – Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão. Vedação interna com painel de gesso	68

Figura 5.31 – Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão. Vedação interna com alvenaria	69
Figura 5.32 – Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão. Vedação interna com painel de gesso	69
Figura 5.33 – Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de inverno. Vedação interna com alvenaria.....	70
Figura 5.34 – Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de inverno. Vedação interna com painel de gesso.....	70
Figura 5.35 – Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de inverno. Vedação interna com alvenaria.....	71
Figura 5.36 – Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de inverno. Vedação interna com painel de gesso.....	71
Figura 5.37 – PPD e PMV da sala 02 no dia típico de inverno.	74
Figura 5.38 – PPD e PMV da sala 08 no dia típico de inverno.	75
Figura 5.39 – PPD e PMV da sala 02 no dia típico de verão.	75
Figura 5.40 – PPD e PMV da sala 08 no dia típico de verão.	76
Figura 5.41 – Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão. Vedação interna com alvenaria.....	77
Figura 5.42 – Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão. Vedação interna com alvenaria.....	77
Figura 5.43 – PPD e PMV da sala 02 no dia típico de verão.	78
Figura 5.43 – PPD e PMV da sala 08 no dia típico de verão.	78
Figura 5.44 – PPD e PMV da sala 02 no dia típico de inverno.	79

LISTA DE TABELAS

	Página
Capítulo 4	
Tabela 4.1 – Evolução horária da temperatura exterior	36
Tabela 4.2 – Características de uma sala do pavimento tipo e perfil de ocupação e equipamento	39
Tabela 4.3 – Propriedades termofísicas dos materiais componentes do edifício	40
Capítulo 5	
Tabela 5.1 – Evolução horária da temperatura exterior no verão.....	43
Tabela 5.2 – Valores das propriedades térmicas dos materiais Que compõem o galpão industrial	43
Tabela 5.3 – Frequência acumulada da direção dos ventos em Belo Horizonte	46
Tabela 5.4 – Carga térmica de pico, em Watts, da sala 02 no verão.....	72
Tabela 5.5 – Carga térmica de pico, em Watts, da sala 08 no verão.....	72
Tabela 5.6 – Carga térmica de pico, em Watts, da sala 02 no inverno	72
Tabela 5.7 – Carga térmica de pico, em Watts, da sala 08 no inverno	73

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da preocupação com o meio ambiente (aquecimento global, preservação das florestas, poluição do ar) e a atual crise energética, estão sendo estudadas medidas no país para promover a conservação do meio ambiente e amenizar o consumo de energia. Para melhorar a qualidade do ambiente é necessário e fundamental que os profissionais de projeto observem o conforto térmico das habitações.

Enquanto países desenvolvidos conseguiram atingir altos índices de desempenho térmico-energético diminuindo o consumo em até 80 %, nas edificações brasileiras, ao contrário, tem se verificado um consumo crescente de energia (Souza, Grimme e Laar, 2000). Uma alternativa é a promoção do condicionamento térmico natural, minimizando assim o impacto das novas construções, e o desenvolvimento de um método, com razoável precisão e facilidade, para o estudo do comportamento térmico. Um condicionamento ambiental deficiente é também a principal causa de sintomas desagradáveis, tais como cansaço, desânimo, saídas freqüentes das salas de trabalho, que culminam com a perda de concentração das pessoas.

Antes da escassez de combustível dos anos setenta, não havia edifícios eficientes. Por exemplo, a redução da ventilação natural, que ocorre devido à janelas fechadas hermeticamente, contribuem para o empobrecimento da qualidade de ar promovendo um edifício doente e prejudicando a saúde humana. Em ambientes de recintos fechados, geralmente ocorrem reações alérgicas e infecções biológicas. Alguns ocupantes de edifícios comerciais mostram sintomas de doenças agudas, como enxaqueca, cansaço, náusea, secura das membranas das mucosas, etc. Sintomas de alergia também podem aparecer depois de um longo período de exposição à condicionadores de ar (Appleby, 1990). Outra questão importante é que os condicionadores de ar e refrigeradores industriais possuem um consumo de 25 % de CFC's no mundo, promovendo a destruição da camada de ozônio da superfície terrestre (Cox e Miro, 1991, Kelly, 1990, Rousseau et al., 1993).

Um grande problema que surge é o impacto ambiental causado pelos reservatórios, porque geralmente é necessário deslocar as pessoas de suas casas, quando as mesmas estão na região que será inundada devido a construção de barragens e por causa da matéria orgânica em putrefação quando se inunda um vale. Outros problemas são os riscos com a segurança pública devido à existência de usinas termelétricas e nucleares, sem contar com os problemas que aparecem com a utilização do ar condicionado, como ruído nas

proximidades quando está em funcionamento, desconforto de pessoas que tem problemas respiratórios, como asma e circulação de vírus e bactérias dentro do recinto quando o mesmo não é utilizado corretamente.

Em edifícios comerciais, localizados em regiões de clima tropical, geralmente, para alcançar o nível de conforto térmico, utilizam-se complexos sistemas de refrigeração, que representam uma parcela significativa no custo global do edifício, sem contar com as despesas de manutenção destes sistemas, que representam altas somas mensais. E o problema se complica quando se utilizam torres de vidro geralmente muito usual em prédios de estrutura metálica, pois há uma maior facilidade de absorção de calor e grande dificuldade de dissipação do mesmo. Outros fatores que influenciam as condições de conforto são as cargas internas existentes, devido aos equipamentos, máquinas, iluminação diurna e seus ocupantes. Vários estudos foram feitos em edifícios com recintos fechados utilizando sistemas de ar refrigerado, como por exemplo os estudos de Wyon e Sandberg (Gan, 1995). Neste estudo houve uma experiência usando um manequim térmico em uma sala em que o sistema refrigerado estava disposto no chão. As conclusões que obtiveram foram que as condições térmicas sobre a altura da mesa eram totalmente aceitáveis, mas foi observado o desconforto nas pernas, tornozelos e pés.

Para melhorar a produtividade e o bem estar dos usuários de uma edificação nos serviços domésticos e/ou de escritórios e fábricas, uma quantidade grande de trabalhos científicos tem sido realizados com o objetivo de desenvolver modelos relatando percepções do conforto térmico e dos fenômenos físicos para uma melhor compreensão dos processos de transferência de energia que ocorrem numa edificação e como manter a qualidade do ar interno (Fanger, 1972, ASHRAE, 1993).

A temperatura interna de uma edificação é primordialmente influenciada pelos parâmetros climáticos externos (principalmente a radiação solar e a temperatura externa) e pelas cargas internas (atividade humana, lâmpadas e equipamentos). Com um entorno e aberturas projetados adequadamente e uma edificação bem orientada geograficamente, a climatização mecânica pode ser diminuída e até mesmo eliminada (Balaras, 1996).

No Brasil, segundo o PROCEL (1998), a iluminação e o ar condicionado são os grandes consumidores de energia no setor de edifícios comerciais e públicos. O condicionamento de ambientes é responsável por 48 % da energia elétrica consumida no setor comercial. A preocupação atual de reduzir o consumo de energia e de preservar o

meio ambiente tem feito com que os profissionais da construção (projetistas e fabricantes) e também os usuários tomem medidas nesse sentido. Um ambiente interno confortável com um consumo mínimo de energia é o objetivo dos projetistas e usuários de edificações (Gan, 1995). No setor comercial e público cresce muito a complexidade, pelo fato de que os sistemas artificiais são quase sempre a fonte principal de iluminação e de conforto, porque o uso do espaço por maior número de pessoas demanda maior quantidade de energia. Neste caso é urgente a integração entre sistemas naturais e artificiais e a utilização de equipamentos mais eficientes. Neste sentido o uso da simulação na avaliação do desempenho térmico de edificações é importante, porque permite uma maior liberdade de criação para o projetista, além da possibilidade da utilização de métodos mais detalhados, Figura 1.1.

A seleção das condicionantes de projeto determina quais são as exigências de conforto térmico para dias típicos de verão e inverno de um determinado local. Nesta etapa deve-se verificar a quantidade de consumo de energia da edificação. Ao fazer o anteprojeto, determina-se as características físicas da edificação, isto é, o pré-projeto arquitetônico, baseando-se em Normas Técnicas e Regulamentações. Ao determinar as características do anteprojeto, faz-se a simulação da edificação avaliando as condições de conforto humano, que é um procedimento básico para a avaliação de desempenho. A partir dos resultados obtidos, verifica-se a necessidade de refazer o anteprojeto e posteriormente, o detalhamento do mesmo para a execução do projeto e sua avaliação final (Akutsu, 1998).

1.1 – Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo comparativo do desempenho térmico de elementos internos e externos de vedação de um edifício comercial em estrutura metálica. Estes elementos são avaliados através de uma simulação numérica com o programa ESP-r, considerando um andar tipo de um edifício comercial e dados climáticos da região onde está situada a edificação (item 4.2).

Foram avaliados os elementos de vedação mais comuns no mercado brasileiro. Como elemento de vedação externa avalia-se a alvenaria, que é a mais tradicional, o painel isolite e a placa cimentícia. Para a vedação interna considera-se, neste estudo, a alvenaria e o painel de gesso. Estes elementos de vedação estão detalhadamente descritos no item 2.1.

Neste estudo, são levados em consideração os princípios da arquitetura climática, as propriedades dos materiais dos elementos de vedação, bem como as fontes internas e externas de calor do ambiente analisado.

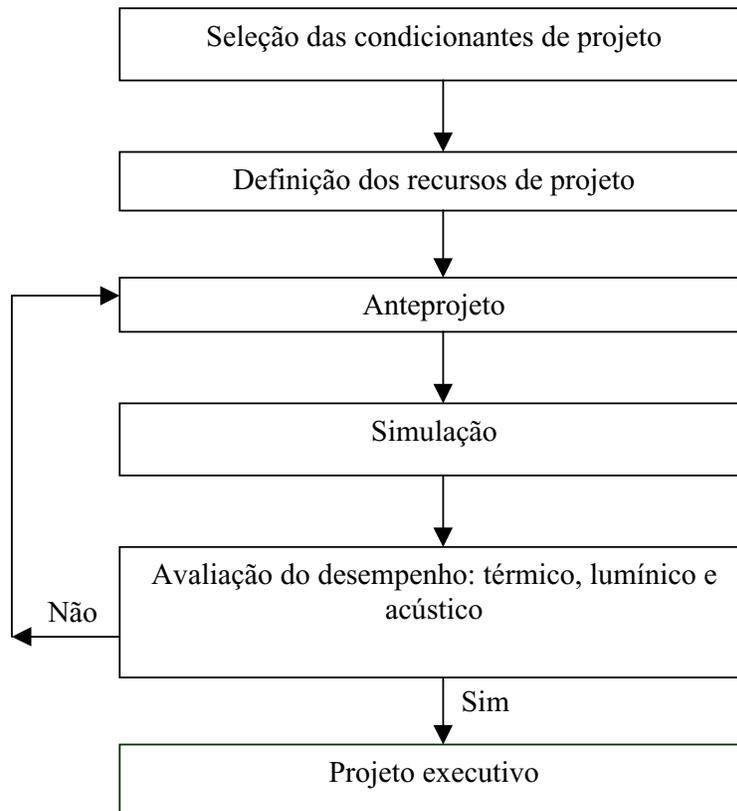


Figura 1.1 – Maneira lógica de avaliação do desempenho global de uma edificação na fase do pré-projeto.

1.2 – Estrutura do Trabalho

Este trabalho compreende seis capítulos e um apêndice. O capítulo 1 expõe a introdução mostrando a necessidade da simulação das edificações para a adequação das exigências de conforto térmico, com o mínimo de consumo de energia.

No capítulo 2 serão apresentadas informações sobre edificações feitas em estrutura metálica atualmente usadas nas construções de edifícios comerciais brasileiros.

Neste capítulo faz-se uma discussão sobre as causas que promovem entraves do desenvolvimento da construção metálica no Brasil.

O capítulo 3 trata das etapas relevantes no processo de avaliação do desempenho térmico tais como as exigências humanas, condições climáticas, caracterização e ocupação da edificação. Apresenta também as características para um estudo da avaliação do desempenho térmico de edificações envolvendo tanto as edificações não condicionadas quanto aquelas condicionadas, que consiste em verificar se as condições do ambiente interno são satisfatórias quanto ao conforto térmico proporcionado aos ocupantes.

O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada e as características da edificação analisada. Este capítulo enumera as etapas de desenvolvimento do trabalho, com uma breve síntese dos procedimentos adotados em cada uma delas. Apresenta os procedimentos necessários na avaliação do desempenho térmico de uma edificação.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através das respostas da simulação da edificação. Faz-se a avaliação com os materiais alternativos existentes no mercado brasileiro, mostrando a melhor alternativa para a edificação.

O capítulo 6 enfatiza as aplicações dos resultados obtidos, fazendo uma avaliação crítica do trabalho. Este capítulo apresentará uma indicação das possibilidades de aperfeiçoamento e desenvolvimento de trabalhos posteriores.

O apêndice apresenta um histórico do desenvolvimento do programa ESP-r e mostra a estrutura do programa subdividida em dois domínios: o do usuário e o técnico.

2. CONSTRUÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Os processos construtivos empregados no país mantém-se praticamente inalterados nas últimas décadas, tendo o concreto e a alvenaria tradicional como principais materiais. Na década de 90 começou um processo de mudança, onde as estruturas de telhado em madeira são substituídas pelo aço e as paredes de alvenaria por novos elementos de vedação e mesmo pelo próprio aço. O modelo construtivo que era marcado por custos elevados e pelo desperdício de material e de tempo começa agora a ser substituído adotando outro material estrutural, com vantagens, pois o desperdício é eliminado e os prazos de execução diminuídos. A estrutura metálica possui como uma grande vantagem a flexibilidade arquitetônica, como pode ser observado pelos exemplos mostrados na Figura 2.1.



(a) Espanha



(b) Dinamarca



(c) Japão



(d) Portugal

Figura 2.1 – Estruturas metálicas no exterior (Inaba, 1999)

Nos tempos atuais do mercado globalizado, as edificações em estruturas metálicas têm um papel importante quando se trata da rapidez do empreendimento e a minimização do desperdício de materiais de construção durante o processo construtivo, aliada a um melhor controle de qualidade e uma maior competitividade (Souza et al., 1999).

O aço é um material reciclável. Desde 1972, nos Estados Unidos houve uma redução de 40 % do consumo de energia para a produção de 1 tonelada de aço (Engestrom, 1999). Um dos entraves do desenvolvimento da construção metálica no Brasil é que o custo ainda é alto quando comparado com a estrutura de concreto. O principal fator que influencia estes valores é a tributação diferenciada das estruturas, sendo a tributação do concreto *in loco* varia de 2 a 5 %, do aço em vergalhão de 12 % e a do aço estrutural de 18 %. Com estes dados em mãos os fabricantes de aço estão em busca de equilíbrio nestas taxas de impostos para que haja ganhos efetivos de participação no mercado de construção civil. Este equilíbrio já está acontecendo, pois em 1996 o custo por kg da estrutura metálica montada era em torno de R\$ 2,80 e em 1999 foi de R\$ 1,80, ou seja, uma diferença de 60% (Janot Pacheco, 1999). Todos estes fatores, e uma nova mentalidade dos profissionais da área da construção civil, possibilitaram um movimento crescente em busca da industrialização do processo construtivo e o uso do aço como sistema estrutural que traduz esta nova mentalidade.

2.1 – Elementos de vedação

Acompanhando a tendência mundial, os edifícios em estrutura metálica são ideais quando se necessita de um empreendimento cuja rapidez de execução esteja em primeiro plano, como é o caso de edifícios comerciais. Como fechamento da estrutura metálica, utiliza-se em grande escala a tradicional alvenaria, mas observa-se que o tempo de construção da mesma, não é coerente com o da estrutura, promovendo um atraso do conjunto. Para suprir esta deficiência, surgiram outros elementos de vedação, tais como os painéis de gesso que promove uma maior economia, limpeza do canteiro de obras e rapidez. Um grande avanço também ocorreu com os elementos de vedação externa da edificação devido à substituição da alvenaria por placas cimentícias ou

painéis isolite. A laje “*steel deck*” transformou-se num elemento construtivo bastante difundido. A sua importância se deve a vãos maiores que os convencionais feitos de lajes de concreto armado ou pré-moldados.

As paredes de painéis de gesso são construídas de acordo com a Figura 2.2, sendo que a espessura de cada painel é de 25 mm, existindo um colchão de ar entre um painel e outro com espessura de 75 mm. Geralmente dentro deste colchão de ar, dispõe-se uma manta de lã de vidro ou lã de rocha, que são bons isolantes acústico e térmico.

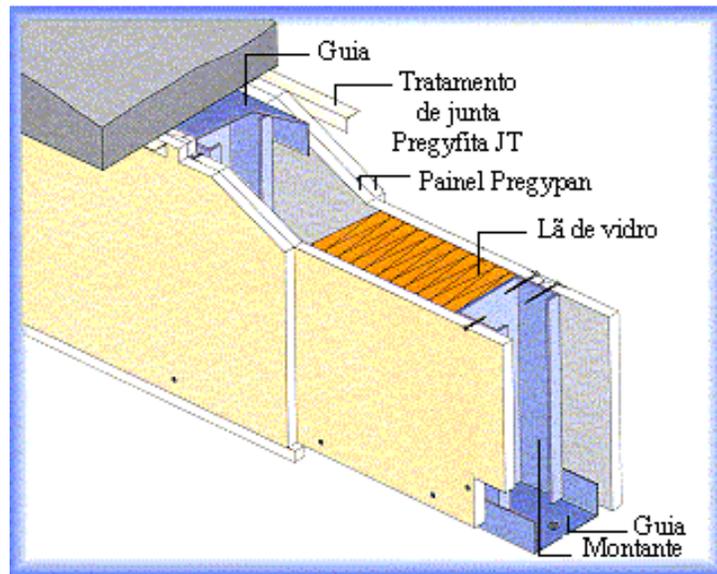


Figura 2.2 – Painel de gesso (Lafarge, 1999)

Estes painéis oferecem vantagens como alívio de carga na estrutura, facilidade para passagem das instalações elétricas e hidráulicas, agilidade e mudanças de *lay out*. As paredes são perfeitamente alinhadas e os painéis podem receber qualquer tipo de revestimento.

O sistema isolite, mostrado na Figura 2.3, é composto por uma placa isolante de EPS (poliestireno expandido) sustentado por telas de aço de alta resistência nas duas faces, onde são aplicadas um revestimento de micro-concreto, que confere ao mesmo uma característica estrutural de concreto armado bastante delgada e de alta resistência. O revestimento deste sistema de construção é vantajoso, pois elimina as etapas de reboco e emboço, utilizados num sistema tradicional.

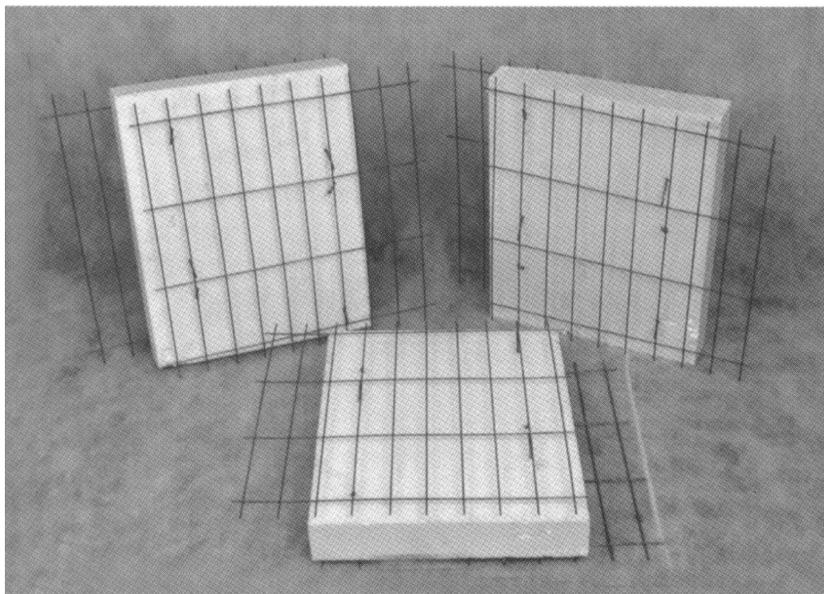


Figura 2.3 – Painel isolite (Lafarge, 1999)

O sistema de placas cimentícias, Figura 2.4, possui em sua composição uma base mineral ideal para revestimento de fachadas. A vantagem deste produto é a industrialização e o controle de qualidade. O sistema de construção destas placas é semelhante ao dos painéis de gesso, ou seja, é constituído por uma placa de espessura de 12,5 mm, espaço de ar, com a largura de aproximadamente 40 mm e outra placa. Este sistema de construção é a seco e promove uma redução significativa do peso da estrutura, sendo que há uma redução de 15 % de armaduras e 17 % de cargas nas fundações (Eidinger, 1999). A Figura 2.5 apresenta um esquema de montagem sendo que ‘a’ é a distância entre os montantes de fixação das placas, ‘d’ é a espessura de cada placa e ‘h’ é a camada de ar entre as duas placas.

Um dos tipos de laje mais comumente utilizada em edifício de estruturas metálicas é o “*steel deck*”, Figura 2.6. O “*steel deck*” é uma forma de aço galvanizado utilizada na confecção de lajes, que substitui as armaduras e a forma de madeira. Funciona como forma para o lançamento do concreto e, depois que este seca, uma espécie de armadura positiva que elimina a necessidade de escoramento.



Figura 2.4 – Sistema de placas cimentícias (Knauf, 1999)

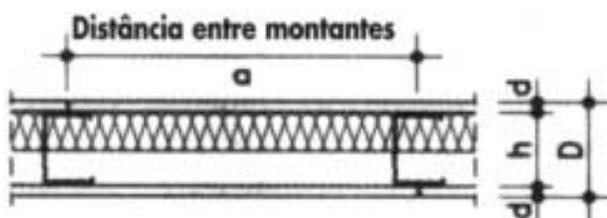


Figura 2.5 – Esquema das placas cimentícias (Knauf, 1999)

Como a velocidade de construção desta laje é compatível com a estrutura de aço pode-se ter uma simultaneidade de tarefas. Pelo fato de ser relativamente mais leve que as lajes convencionais, cerca de 25 %, o “*steel deck*” proporciona uma economia no preço final da obra devido às despesas com as fundações, além da diminuição do tempo gasto para a construção. A seção transversal da laje “*steel deck*” é mostrada de forma detalhada na Figura 2.7.

A laje de “*steel deck*” possui dupla função: como fôrma para concreto durante a construção e como armadura positiva de lajes para as cargas de serviço. A estrutura de aço da laje é conformada a frio e cobre uma largura útil de 820 mm. A estrutura de aço da laje “*steel deck*” possui nervuras largas, permitindo a utilização de conectores de cisalhamento denominados “*stud bolts*”, o que possibilita o cálculo como vigas mistas reduzindo o peso da estrutura.

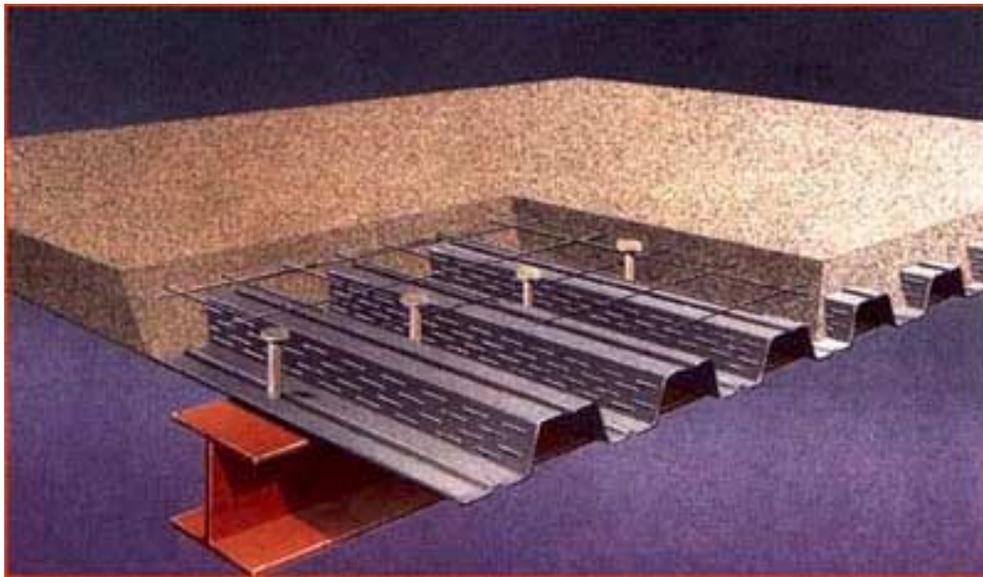


Figura 2.6 – “*steel deck*” (Codeme, 1998)

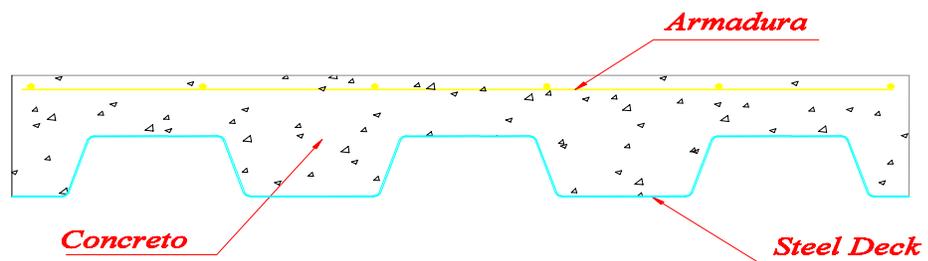


Figura 2.7 – Seção transversal típica (Codeme, 1998)

O “*steel deck*” é amplamente utilizado nos EUA com um consumo de 1.000.000 de ton./ano e na Europa com 500.000 ton./ano. A sua utilização no Brasil é

relativamente recente, podendo-se citar o edifício do curso pré-vestibular Pitágoras, em Belo Horizonte, cuja área total de laje é 8.000 m² (Figura 2.8), o terminal rodoviário de Uberlândia com 19.500 m² de laje (Figura 2.9) e aeroporto internacional do Galeão no Rio de Janeiro com 26.000 m² de laje (Figura 2.10).



Figura 2.8 – Colégio pré-vestibular Pitágoras (Monteiro, 1999)



Figura 2.9 – Terminal rodoviário de Uberlândia (Monteiro, 1999)



Figura 2.10 – Aeroporto internacional do Galeão (Monteiro, 1999)

3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A avaliação do desempenho térmico de edificações envolve tanto as edificações não condicionadas quanto aquelas condicionadas, e consiste em verificar se as condições do ambiente interno são satisfatórias quanto ao conforto térmico proporcionado aos ocupantes. No caso das edificações não condicionadas artificialmente, a avaliação consiste em se fazer um estudo da temperatura interna do ambiente, verificando-se a existência das condições de conforto térmico. Esta análise é feita considerando a resposta global da edificação e não somente o comportamento térmico de elementos de vedação isoladamente. É necessário levar em consideração as interações entre o ambiente natural externo e o ambiente construído. Uma edificação que não leve em consideração, por exemplo, as condições de insolação poderá vir a exigir um gasto maior e evitável de energia para seu aquecimento ou resfriamento (Michalka, 2000).

Para as edificações condicionadas é necessário avaliar a demanda de cargas térmicas para o condicionamento dos ambientes internos. Quando a temperatura interna fica muito acima da faixa de temperaturas aceitáveis para o conforto, verifica-se a necessidade do resfriamento do ambiente. A carga térmica do ambiente corresponde à quantidade de calor a ser trocada pelo ar insuflado no ambiente pelo equipamento de condicionamento de ar, para manter a temperatura do ambiente nas condições desejadas.

Nos países frios, onde as condições climáticas são bastante diferentes das regiões de clima tropical, a hipótese de regime permanente é recomendável para a determinação das trocas térmicas que ocorrem através da envoltória da edificação. Esta hipótese baseia-se na avaliação do desempenho térmico de edificações adotando como indicadores a resistência térmica ou a condutância dos elementos componentes da edificação. Assim, os critérios de avaliação indicam valores limites para esses parâmetros (resistência térmica ou condutância), definidos em função do tipo do uso da edificação e das características do clima local.

Estes indicadores se aplicam às avaliações em condições de inverno, pois o objetivo está limitado no cálculo das perdas de energia utilizada no aquecimento dos

ambientes. Nas condições de verão as exigências relativas ao conforto do ambiente são contornadas por meio do controle dos ganhos de energia solar e das trocas de massa de ar do ambiente.

Já no Brasil a hipótese de regime permanente é bastante inadequada, pois a busca do conforto no verão ocorre através de sistemas de condicionamento térmico mecânico e as variações de temperatura são significativamente maiores em relação aos países de clima frio. Sendo assim, observa-se que não basta o mesmo procedimento utilizado para a condição de inverno, baseado no parâmetro resistência térmica ou no coeficiente global de transmissão de calor, simplesmente invertendo o fluxo de energia. Isto é, supor que o objetivo é apenas reduzir os ganhos de energia por condução proveniente do ambiente externo. Neste caso, é necessário também avaliar outras trocas térmicas que ocorram nos ambientes, tais como as possibilidades de perda de energia do ambiente pela ventilação, pela condução e convecção por alguns elementos da edificação através de uma abordagem dinâmica. Baseando nestes parâmetros deve-se equacionar o equilíbrio entre as perdas e ganhos de energia que ocorrem simultaneamente e que variam significativamente ao longo de um dia. Sendo assim, a capacidade térmica da edificação não pode ser desprezada e deve ser associada juntamente com a resistência térmica dos elementos e componentes para a avaliação do comportamento térmico da edificação.

Existem duas formas de estudo para a determinação da temperatura e da carga térmica de um ambiente. Uma das maneiras é através da medição dos parâmetros climáticos. Neste caso é muito importante observar o comportamento destes parâmetros dos dias anteriores a um dia típico considerado (item 4.2) devido aos fenômenos provocados pela inércia térmica da edificação. Outra forma de avaliar o conforto térmico é através de uma simulação computacional. Neste caso as condições dinâmicas não são desprezadas quando ocorrem as trocas térmicas entre o ambiente externo e os componentes da edificação, Figura 1.1.

O programa computacional para o cálculo do comportamento global da edificação deve possuir as seguintes características de cálculo (detalhado no item 3.2):

- a) Cálculo dos fluxos de energia térmica por condução em regime transitório;

- b) Cálculo das temperaturas superficiais internas e externas das vedações, por meio de equações de balanço de energia que considerem simultaneamente as trocas de calor por radiação entre as vedações e por convecção com o ar;
- c) Cálculo da temperatura do ar interior do ambiente, em conjunto com o cálculo das temperaturas superficiais das vedações, considerando as trocas de massa de ar do ambiente.

3.1 – Etapas do Processo de Avaliação

As etapas relevantes do processo de avaliação do desempenho térmico de uma edificação abrangem a verificação das exigências humanas, das condições climáticas, da edificação em relação a sua caracterização, sua ocupação e do seu comportamento térmico e dos elementos de vedação.

As exigências humanas são caracterizadas por intervalos de valores inter-relacionados das seguintes variáveis: temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura média radiante do meio ambiente. Estes valores são fixados em função das características do ocupante, dadas pela sua taxa metabólica e pelo índice de resistência térmica da sua vestimenta (Fanger, 1972). A taxa metabólica interfere na sensação de desconforto térmico, quente ou frio, sendo devida em parte, a sensores nervosos localizados na pele. Esta sensação está relacionada com a temperatura central, podendo ser agradável ou desagradável, dependendo da situação. Por exemplo, a sensação de frio pode ser agradável se o corpo estiver excessivamente quente, e desagradável se o mesmo já estiver frio. Outro fator a se considerar é que a temperatura da pele não é uniforme. Assim como há variações devidas à vaso-regulação, há variações em diferentes partes do corpo devidas a características locais de vascularização e presença de gordura subcutânea. Portanto a sensação térmica pode variar em partes diferentes do corpo em função da exposição e da temperatura externa (Gonçalves, 2000).

Não existe uma temperatura exata para definir conforto térmico. Um indivíduo pode sentir conforto numa faixa de temperatura, que ao ser mudada, não significarão que a sensação de desconforto seja imediata. Além dos aspectos físicos envolvidos, a reação do indivíduo à temperatura depende das expectativas, sua personalidade e da

atividade que está realizando naquele momento, dificultando assim, o estabelecimento do conceito de conforto.

A Norma brasileira NBR 6401 (ABNT, 1978) apresenta valores das temperaturas do ar recomendáveis e máximas de bulbo seco e úmido, para as condições de verão e inverno, de acordo com o local (residência, comércio e outros) e finalidade (lojas de curto tempo de ocupação, etc.). As Normas ASHRAE 55 (1992) e ISO 7730 (1984) consideram a necessidade de que 80 % dos ocupantes expressem satisfação com as condições ambientais internas de conforto.

As considerações referentes às características climáticas, a edificação, ocupação, comportamento térmico e avaliação do desempenho térmico estão disponíveis no tópico seguinte.

3.2 – Etapas da Simulação

Os elementos principais que compõem os *softwares* de simulação do comportamento térmico de edificações estão mostrados na Figura 3.1 e serão detalhados a seguir.

3.2.1 Levantamento das informações climáticas

Um fator determinante para a avaliação do desempenho térmico de edificações é a influência das condições climáticas. Esta influência reflete em dois aspectos fundamentais que são os indicadores do desempenho térmico das edificações e as características dos parâmetros climáticos. A resistência e a condutância térmica das edificações são definidas em função de um modelo matemático utilizado para se determinar as trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente externo e os componentes da edificação.

Estes indicadores são importantes para que haja a simplificação das equações utilizadas, considerando o que pode ser tratado como regime permanente, caso as condições dinâmicas possam ser desprezadas.

Nas características dos parâmetros climáticos do ambiente, quando se efetuam avaliações por meio de medições, é importante observar as condições climáticas dos

dias anteriores para a consideração da inércia térmica dos elementos componentes da edificação (Akutsu, 1998). As informações climáticas são caracterizadas pela temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento.

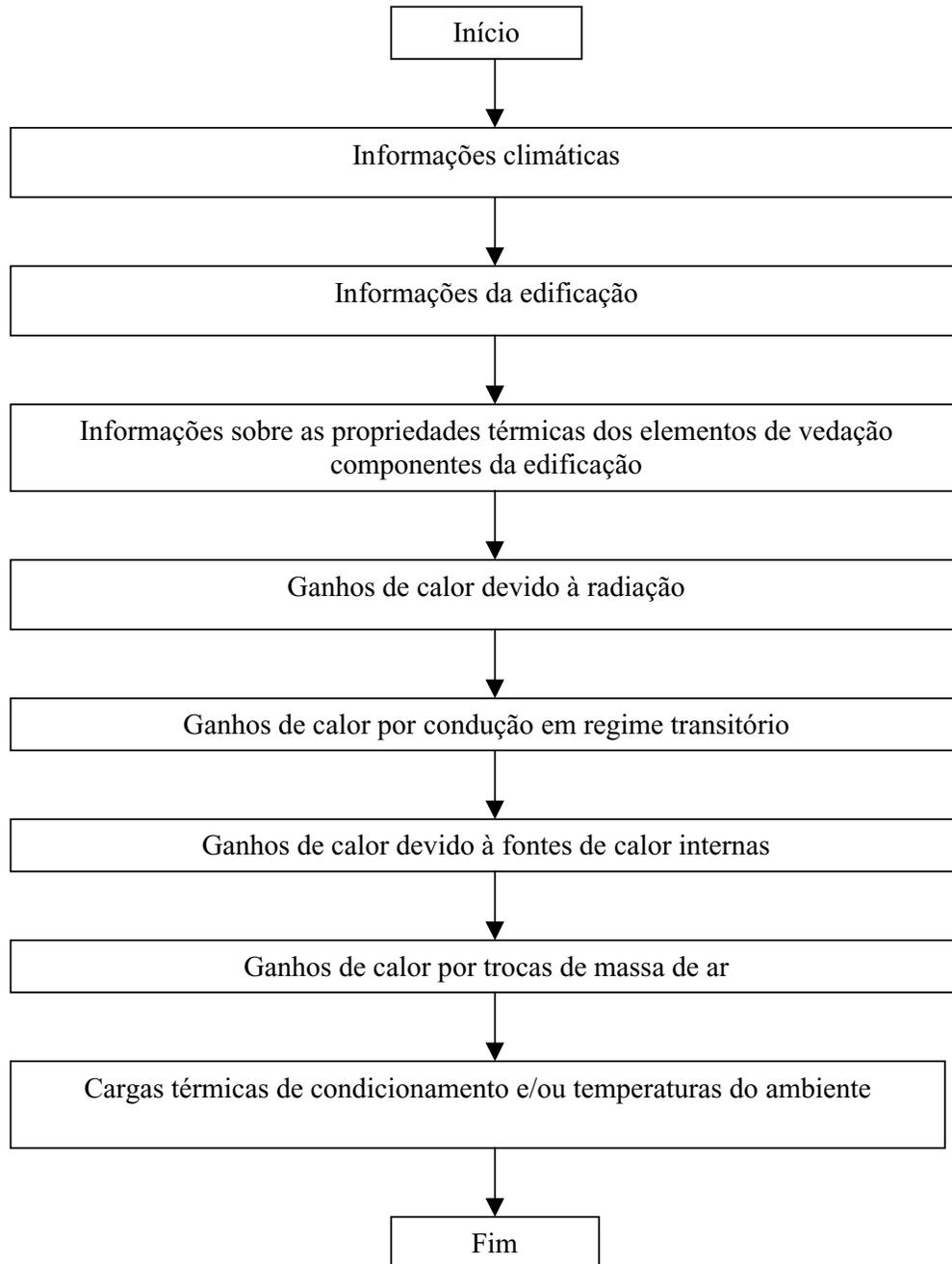


Figura 3.1– Principais elementos para a simulação térmica de uma edificação

3.2.2 Levantamento das informações da edificação

As informações da edificação estão associadas aos recintos típicos, à posição geográfica, à orientação solar e às dimensões da edificação. A forma arquitetônica influencia o conforto ambiental da edificação, bem como o seu consumo de energia. Isto se deve à interferência direta sobre os fluxos de ar no interior e no exterior e à quantidade de calor e luz recebidos pelo edifício. A quantidade de radiação solar que incide em cada superfície externa de uma edificação é variável segundo a orientação e a época do ano. A variação da distribuição de janelas em um dado volume, bem como a modificação da área de envidraçamento, implica em variações térmicas do microclima interno.

3.2.3 Levantamento das informações sobre as propriedades térmicas dos elementos de vedação componentes da edificação

As propriedades térmicas dos materiais componentes dos elementos de vedação mais relevantes são a condutividade térmica (k), o calor específico (c_p), a emissividade (ϵ), a massa específica (ρ), a absorvância à radiação solar (α), a refletância em ondas longas e a transmitância à radiação solar. Conhecidas as propriedades condutividade térmica, calor específico e massa específica dos materiais componentes é possível determinar a resistência térmica à passagem de calor das envoltivas (paredes externas e telhados) e das divisórias internas, piso, forro e esquadrias (janelas e portas). A resistência térmica é importante na avaliação do mecanismo de condução através da envoltória da edificação e paredes internas. As propriedades absorvância, refletância e transmitância são importantes na avaliação do mecanismo de radiação através das áreas envidraçadas e também para a radiação solar incidente

3.2.4 Determinação do ganho de calor devido à radiação solar

Para a determinação do ganho de calor devido à radiação solar, leva-se em conta a posição da edificação em relação ao sol, a distribuição da radiação incidente e a data de cálculo. A transferência de calor por radiação é dividida em cinco partes principais que são a radiação solar direta (onda curta), a radiação solar difusa (onda curta), a radiação solar refletida pelo solo e pelo entorno (onda curta), a radiação térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu (onda longa) e a radiação térmica emitida pelo edifício (onda longa). A radiação solar é a principal fonte de luz natural. A parte direta da luz que penetra em um edifício é absorvida e convertida em calor.

3.2.5 Determinação do ganho de calor por condução em regime transitório

Para a determinação das condições de conforto é necessário determinar o ganho de calor por condução que ocorre através da envoltória da edificação, observando-se o comportamento global da estrutura e as variações dinâmicas das condições de exposição ao clima e à ocupação. No campo de análise de consumo de energia em edifícios, existem dois importantes métodos: Método das Diferenças Finitas e Método dos Elementos Finitos. Ambos os métodos oferecem técnicas poderosas para a solução de equações diferenciais parciais que governam o problema de transferência de calor por condução (Clarke, 1985; Negrão, 1994).

3.2.6 Determinação do ganho de calor devido às fontes de calor internas

As principais fontes de geração interna de calor são as lâmpadas, os ocupantes e os equipamentos de operação interna. O número de ocupantes deve ser levado em conta, pois a transferência de calor dos ocupantes é especialmente importante no projeto ambiental de salas de aula, salas de conferência, teatros e outros ambientes onde ocorre concentração de pessoas. A atividade dos ocupantes é importante pois a taxa de

liberação de calor por um ocupante de um ambiente condicionado pode variar de 120 W para uma pessoa em atividade sedentária até 440 W para atividade intensa (Stoecher, 1985). A potência das lâmpadas acesas deve ser considerada, pois a quantidade de calor ganho pelo espaço proveniente das lâmpadas depende da potência delas e do tipo de conexão elétrica utilizado. A energia radiante proveniente das lâmpadas é absorvida pelas paredes, piso, mobília, promovendo o aumento da temperatura dos mesmos. Este calor é trocado com o ambiente, constituindo uma carga térmica do sistema de ar condicionado. O calor de outras fontes, como de equipamentos que dissipam energia, necessita ser estimado através de sua potência, período e frequência de utilização.

3.2.7 Determinação do ganho de calor por trocas de massa de ar

O ambiente deve estar vedado para que não haja a entrada e/ou saída de fluxos de ar. As aberturas são por onde ocorre a penetração do ar externo no recinto que tanto afeta a temperatura do ar, quanto a umidade. Quando o efeito ocorre sobre a temperatura, denomina-se a carga de calor sensível. Quando esta for sobre a umidade, calor latente. Em edifícios, principalmente os comerciais e os governamentais que têm um consumo excessivo de energia elétrica, é necessário o controle da entrada de ar externo de ventilação para minimizar o consumo de energia. Já a infiltração, que é uma penetração não controlada de ar externo dentro do recinto, deve ser limitada através de vedação das superfícies externas.

3.2.8 Determinação das cargas térmicas de condicionamento e das temperaturas do ambiente.

Para a determinação da carga térmica é necessário o conhecimento da temperatura de bulbo seco, da umidade e da intensidade da radiação solar, da localização geográfica e da orientação do recinto estudado. Existem uma série de procedimentos desenvolvidos para o cálculo da carga térmica, que se baseiam em fatores que afetam as trocas térmicas e que são divididos em quatro categorias:

- a) Carga de transmissão que é a transferência de calor devido à diferença de temperatura por meio do componente ou elemento do edifício.
- b) Carga solar que é a transferência de energia solar através de um componente de um edifício que seja transparente, ou absorção desta energia por um componente opaco.
- c) Carga de infiltração que é a perda ou ganho de calor pela infiltração do ar externo no recinto condicionado.
- d) Carga devido à geração interna, resultante da liberação de energia no interior do recinto (luzes, pessoas, equipamentos, etc.) (Stoecher, 1985).

A carga térmica de resfriamento é a quantidade de calor total que deverá ser extraída ou fornecida ao ar do ambiente para mantê-lo em condições desejáveis de temperatura e umidade. Baseado no cálculo da carga térmica é possível dimensionar um sistema de resfriamento ou aquecimento para o ambiente. A carga térmica de resfriamento é classificada em carga térmica do ambiente e carga térmica do equipamento, dependendo do local onde a carga é considerada (Tribess et al., 1997) . Esta carga pode ser subdividida em:

- a) Calor que entra no ambiente através dos elementos de vedação da envoltória (carga térmica perimetral);
- b) Calor gerado no interior do ambiente.

A carga térmica do equipamento é a quantidade de calor processada no equipamento de ar condicionado para se obter o ar insuflado na sala em condições especificadas de temperatura e umidade. Esta carga térmica pode ser dividida em:

- a) Carga térmica do ambiente - CT_{ambiente} ;
- b) Carga térmica associada à entrada de ar de renovação - CT_{ren} ;
- c) Carga devido a ventiladores e outros componentes - CT_{vent} ;
- d) Carga associada a vazamentos - CT_{vaz} .

As cargas térmicas do ambiente e do equipamento podem ser divididas em:

- a) Carga térmica sensível que é a quantidade de calor que deverá ser trocada com o ar interno para mantê-lo a uma determinada temperatura;

- b) Carga térmica latente que é a quantidade de calor que deverá ser trocada com o ar interno para mantê-lo a uma determinada umidade pré-definida.

Na determinação da carga térmica é importante observar os ganhos de calor devido à radiação solar que penetra na sala através da janela, aquecendo o piso e outros corpos e a transferência de calor para o ar da sala. Deve-se observar que existe o armazenamento de calor no piso e em outros corpos durante os períodos de condicionamento do ar parados (Yamane e Saito, 1986).

Os métodos de cálculo da carga térmica têm evoluído. Na década de 40, Mackey e Wright determinaram soluções para a equação de condução de calor através de paredes compostas por múltiplas camadas de materiais homogêneos. Os seus estudos consideravam os efeitos transitórios da condução de calor, aprimorando a determinação dos ganhos de calor nos ambientes. As análises utilizavam uma excitação senoidal de temperatura como condição de contorno para a face externa da parede e a manutenção de um valor constante para a temperatura de outra face.

Já no início dos anos 60, a determinação das trocas térmicas entre o ambiente a ser condicionado e o ambiente exterior através de elementos opacos, era feita em larga escala admitindo-se que o fenômeno ocorre em regime permanente. Esta simplificação não apresentava bons resultados devido ao armazenamento térmico existente em alguns destes elementos opacos da envoltória. A resistência desse armazenamento impõe que a questão seja encarada sob o ponto de vista dinâmico.

Em 1967, a ASHRAE, através do seu Handbook of Fundamentals (ASHRAE, 1989) apresentou o método da temperatura total equivalente (TETD) que consiste em somar vários componentes dos ganhos de calor, num dado instante, obtendo-se assim, o ganho de calor total instantâneo do ambiente. Este ganho é convertido em carga térmica de resfriamento instantâneo por uma técnica de rateamento deste valor ao longo do tempo, que corresponde a distribuir a componente radiante no período de tempo imediatamente precedente. Esse procedimento complicou os cálculos, por exigir uma consulta a diversas tabelas diferentes para todas as superfícies da edificação. O método das funções de transferência, também proposto pela ASHRAE, aplica uma série de fatores de ponderação aos ganhos de calor e às cargas das horas anteriores, bem como

aos ganhos de calor que ocorrem no instante do cálculo, para considerar o efeito de armazenamento térmico na conversão dos ganhos de calor em carga térmica.

Existem três métodos para o cálculo da carga térmica, que são os métodos simplificados, os métodos intermediários e os métodos detalhados.

3.2.8.1 Métodos simplificados para o cálculo de carga térmica

Os métodos ainda utilizados no Brasil para o cálculo da carga térmica são os métodos simplificados devido à sua simplicidade, pois apresentam como características cálculos em regime permanente; a não separação das componentes radiante e convectiva dos ganhos de calor; e determinação apenas do valor máximo diário da carga térmica, considerando apenas as condições mais rigorosas de exposição, e que o instante de ocorrência do valor máximo diário de radiação coincide com o do valor máximo da temperatura de bulbo seco externa. Assim, a determinação da carga térmica (CT), devido à transferência de calor por elementos opacos, é feita através da expressão:

$$CT = U.A.(T_{Ar-Sol} - T_{int}), \quad (3.1)$$

onde U é o coeficiente global de troca de calor entre o ambiente interno e o meio externo, é função dos coeficientes de película que englobam tanto os efeitos de convecção como de radiação; A é a área do elemento de vedação; T_{int} é a temperatura de bulbo seco de projeto do ar interior; e T_{Ar-Sol} é a temperatura Ar – Sol fictícia e é determinada através da expressão:

$$T_{Ar-Sol} = T_{ext} + \frac{\alpha.I}{h_e}, \quad (3.2)$$

onde T_{ex} é a temperatura de bulbo seco de projeto do ar exterior; α é a absorptância à radiação solar da face externa do elemento de vedação; I é a radiação solar incidente no elemento; e h_e é o coeficiente de troca de calor combinado com convecção e radiação, na face externa do elemento de vedação.

A carga térmica sensível total é determinada pela simples adição de todos os demais valores máximos de ganhos de calor (pessoas, equipamentos, lâmpadas,

radiação pelas janelas, componente sensível da infiltração) com a somatória dos ganhos de calor por condução através de todos os elementos opacos (todas as paredes, portas, teto e piso).

3.2.8.2 Métodos detalhados para o cálculo da carga térmica

Os métodos detalhados são feitos através da determinação da carga térmica sensível através da primeira lei da termodinâmica a um volume de controle que contém todo o ar do recinto a ser condicionado. São assumidas as hipóteses de que o ar é um fluido isotérmico, incompressível e com propriedades constantes, e que sua capacidade térmica é desprezível. A carga térmica para este método é dada por:

$$CT_t = \dot{m}_{inf} \cdot c_p \cdot (T_{int,t} - T_{ext,t}) + \sum_{j=1}^n [h_{j,t} \cdot (TS_{j,t} - T_{int,t})], \quad (3.3)$$

onde \dot{m}_{inf} é a vazão em massa de ar externo de infiltração; c_p é o calor específico do ar à pressão constante; h é o coeficiente de convecção na face interna do elemento de vedação; TS é a temperatura superficial do elemento de vedação; j é o índice que denota o elemento de vedação; e t é o instante de cálculo.

Para utilizar a Equação 3.3, é necessário determinar a taxa de infiltração do ar externo no ambiente e as temperaturas superficiais dos elementos de vedação. O primeiro elemento geralmente é um dado assumido a partir de tabelas, e em casos especiais pode ser determinado por meio de algoritmos de cálculo (Clarke, 1993). A determinação das temperaturas superficiais é feita instante a instante, juntamente com o cálculo das cargas térmicas aplicando-se novamente a primeira lei da termodinâmica a um volume de controle ao redor da superfície interna do elemento de vedação. A equação resultante é:

$$Q_{condj,t} + h_{j,t} \cdot (TS_{j,t} - T_{int,t}) + \sum_{k=1}^n F_{j,k} \cdot h_r \cdot (TS_{k,t} - TS_{j,t}) + Rad_{j,t} = 0, \quad (3.4)$$

onde $Q_{condj,t}$ é o fluxo de calor por condução que atravessa a superfície de controle; k é o índice que denota os demais elementos de vedação do ambiente; F é o fator de forma

geométrico entre as superfícies j e k; h_r é o coeficiente linearizado de troca de calor por radiação; Rad são os fluxos de calor radiante devido à fontes internas e à radiação solar que atravessam os elementos transparentes da edificação.

O termo que representa os fluxos de calor por condução podem ser determinados por diversas maneiras, tais como empregando-se a técnica das diferenças finitas (Clarke, 1993) ou o método de fatores de resposta térmica (Kusuda, 1976). O uso destas técnicas requer um balanço de energia na face externa do elemento de vedação nos mesmos moldes que o realizado para a face interna.

3.2.8.3 Métodos intermediários para o cálculo da carga térmica

Os métodos intermediários determinam a carga térmica através de equações mais simplificadas que as dos Métodos Detalhados, utilizando fatores para reproduzir o efeito de armazenamento térmico das componentes radiantes dos ganhos de calor e da natureza transitória da condução de calor nos elementos de vedação. Entre tais métodos destaca-se o das CLTD/CLF seguindo recomendações da ASHRAE (1993):

$$CT_t = \dot{m}_{inf} \cdot c_p \cdot (T_{int,t} - T_{ext,t}) + \sum_{j=1}^n U_j \cdot CLTD_{j,t} + Rad_t \cdot CLF_t, \quad (3.5)$$

onde CLTD é a diferença de temperatura equivalente entre o ambiente interno e externo, na qual está embutido o efeito transitório de condução de calor e sua conversão em carga térmica; e CLF é o fator de ponderação para conversão da componente radiante dos ganhos de calor em carga térmica, específico para cada fonte de energia radiante.

3.3 – Determinação do Comportamento Térmico da Edificação

Em algumas regiões brasileiras é necessário fazer uma análise do desempenho térmico, na condição de inverno para verificar a necessidade de aquecimento do ambiente. Para tais regiões, os métodos de cálculos podem ser bastante simplificados, pois pode-se considerar as condições de regime permanente para a determinação das trocas térmicas que ocorrem pela envoltória da edificação. Mas em outras regiões onde

há necessidade de análise para as condições de verão, com ou sem o condicionamento da edificação, estes métodos já não são mais adequados, pois as características dinâmicas de exposição ao clima não são mais desprezíveis, o que faz com que os métodos de análise e as regulamentações sejam mais complexos.

A regulamentação quanto aos métodos para a avaliação do desempenho térmico das edificações encontra-se melhor formulada em países desenvolvidos, para regiões de clima frio. Nesses países, a legislação e a normalização exercem importante função na orientação para o uso mais racional da energia consumida no condicionamento térmico de edificações. Desta forma, a construção de uma edificação só pode ser iniciada após o projeto ter sido aprovado por órgãos competentes que realizam rigorosa avaliação, onde o desempenho térmico tem peso importante, principalmente por estar relacionado à questão de economia de energia (Akutsu, 1998).

O comportamento térmico de uma edificação é a sua resposta térmica às condições típicas de exposição ao clima e à ocupação. Este caracteriza-se pela medição *in loco* ou cálculos. Para o cálculo utiliza-se software que considere o caráter dinâmico dos fenômenos de troca de energia e de massa entre a edificação e o ambiente externo. Para as medições deve-se seguir os procedimentos recomendáveis apresentados nas Normas ISO 7726 (1985) e ANSI/ASHRAE 55-81. Estas medidas devem ocorrer numa seqüência de três dias, considerando dias típicos, ou seja, o intervalo da variação do comportamento da temperatura do ar exterior destes três dias deve ser o mesmo. Devido aos problemas em determinar o dia típico, bem como a medição *in loco* demanda longos períodos, um de inverno e outro de verão, é recomendável que as avaliações de conforto térmico sejam procedidas por meio de cálculos e simulações.

Na literatura encontram-se várias ferramentas de cálculo simplificadas (item 3.2.8) para se estimar as cargas de resfriamento de um ambiente, levando em conta o tipo de material do entorno da edificação (Balaras, 1996). Estes modelos simplificados tem valor para os projetistas, durante a etapa de pré-projeto, para uma avaliação de novas tecnologias e sistemas que podem ser empregados e seus desempenhos sob condições preestabelecidas. Estas ferramentas de cálculo simplificadas oferecem uma alternativa para os programas computacionais mais complexos e avançados que também já estão disponíveis. Estes programas computacionais são adequados para a simulação detalhada do comportamento térmico de edificações por meio de balanços de energia no

ar interior e nos elementos do entorno para determinar as componentes convectivas dos ganhos de calor e para avaliação da eficiência de vários sistemas construtivos com uma precisão melhor, uma vez que possibilitam um número maior de parâmetros de entrada a serem analisados.

3.3.1 – Softwares de simulação

Os programas de simulação utilizam modelos matemáticos complexos que simulam o efeito do armazenamento térmico e das trocas de calor (convecção e radiação) que ocorrem no interior de ambientes. Desta modelagem resulta um sistema de n equações lineares a n incógnitas, sendo n o número de superfícies que constituem o ambiente. Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o problema torna-se bastante complexo e por isso, foram desenvolvidos programas de simulação energética de edificações como NBSLD (Kusuda, 1976), BLAST (Pedersen, 1993), DOE-2 (Birdsall, 1994), ARQUITROP (Roriz, 1991) e o ESP-r (Clarke, 1993). Muitos programas de pesquisas europeus, na área de conservação de energia de edificações, têm utilizado extensivamente o ESP-r na avaliação do desempenho de sistemas ambientais.

O programa NBSLD (National Bureau of Standards Load Determination) utiliza o método de balanço de energia térmica do ambiente e o método dos fatores de resposta térmica para o cálculo da transferência de calor por condução. Este programa permite o cálculo das temperaturas superficiais dos elementos e componentes, a temperatura e a umidade relativa do ar, e as cargas térmicas de condicionamento de ambientes. O programa também apresenta uma opção alternativa de cálculo simplificado para cargas térmicas.

O DOE-2 é constituído de quatro subprogramas e bancos de dados climáticos, propriedades térmicas de materiais e componentes. Este programa faz simulações com dados climáticos para um ano, hora a hora, permitindo uma avaliação econômica através do consumo de energia das diversas opções simuladas. Ele é mais apropriado para avaliações do desempenho energético do edifício e do seu sistema de ar-condicionado.

O BLAST tem as mesmas características de cálculo do DOE-2 que corresponde a uma implementação do NBSLD, pois além das mesmas características de cálculo

relativas ao edifício, permite também, uma análise detalhada do seu desempenho energético.

O programa ARQUITROP, da Universidade Federal de São Carlos, é o único programa de origem brasileira que está sendo comercializado. Este programa simula o desempenho térmico de edificações verificando a sua adequação climática. Tem como desvantagem não calcular as cargas térmicas de condicionamento.

O programa de simulação ESP-r permite avaliar a carga térmica máxima de resfriamento ou aquecimento, onde e quando ela ocorre, o efeito do isolamento térmico (espessura ou material) na carga térmica, o instante ótimo (em relação ao conforto térmico e consumo de energia) para que a instalação de climatização entre em operação. Permite também a avaliação de como o consumo de energia é afetado pelos diferentes esquemas de iluminação, o efeito do sombreamento ou de cortinas na carga térmica e a influência das diferentes associações de equipamentos de climatização no consumo de energia (Negrão, 1996). Os seus modelos de cálculo utilizam os métodos dos elementos finitos e das diferenças finitas para a simulação do comportamento térmico dos ambientes e dos sistemas de condicionamento térmico (Negrão, 1995). Pode-se determinar gradientes de temperatura e distribuição de vazão de ar com um grau de refinamento que não podem ser calculados com os programas anteriores (Apêndice I).

A análise da edificação estudada foi feita com o programa de simulação ESP-r (Energy Simulation Program – research) (Clarke et al., 1993), onde os modelos de cálculos utilizados estão baseados nos métodos dos elementos finitos e das diferenças finitas, promovendo a simulação do comportamento térmico dos ambientes condicionados ou não. Baseados nos métodos citados, determina-se gradientes de temperatura e distribuição de vazão do ar com alto grau de refinamento, o que implica , por enquanto, no uso de computadores de alto porte, constituindo um fator limitante ao seu uso. O programa ESP-r requer mais detalhadamente que dos dados de entrada, em relação aos outros programas de simulação devidos aos modelos matemáticos empregados (Akutsu, 1998).

4. METODOLOGIA ADOTADA

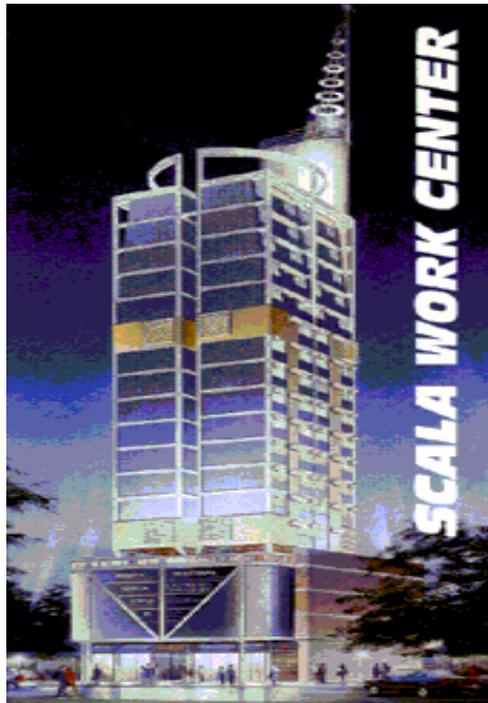
Este capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do trabalho, com uma breve síntese dos procedimentos adotados em cada uma delas. Apresenta os procedimentos necessários na avaliação do desempenho térmico de uma edificação. Como definido anteriormente a avaliação do desempenho térmico de uma edificação consiste em verificar se as condições do ambiente interno são satisfatórias quanto ao conforto térmico proporcionado aos ocupantes. Este estudo engloba edificações com ventilação natural e edificações condicionadas e é feito considerando a resposta global da edificação.

O processo de ventilação natural ocorre devido à diferença de pressão que provoca a passagem do ar através das aberturas, do exterior para o interior do prédio e vice-versa. O projetista é responsável pela solução natural do problema da ventilação ao escolher a forma, a dimensão e o local de implantação das aberturas (Toledo, 1999). No caso das edificações condicionadas artificialmente, além das avaliações pertinentes às edificações não condicionadas, a verificação é feita sobre a demanda de cargas térmicas necessárias para o condicionamento do ar dos ambientes internos.

O método de análise pode ser efetuado de duas maneiras: por meio de cálculos, utilizando softwares de simulação do comportamento térmico da edificação; ou por meio de medições *in loco*. Em termos práticos, é inviável a utilização de medições *in loco* na avaliação de novos empreendimentos, uma vez que realizada a instalação do equipamento de ar condicionado, já se tem uma solução “definitiva”, seja pelo custo dos equipamentos, seja pela dificuldade operacional em se realizar mudanças rápidas em instalações de grande porte (Akutsu, 1998). As medições são fundamentais para o processo de “*retrofit*” de uma instalação. Esta situação não está sendo avaliada neste trabalho. Para alguns tipos de edificações, pré-definidos, esta avaliação pode ser feita pela simples consulta de tabelas de dados. Neste trabalho emprega-se o software de simulação ESP-r (Apêndice I) como método de avaliação do comportamento térmico da edificação.

4.1 - Edificação Analisada

A análise utiliza como modelo de referência o edifício de escritório Scala Work Center, projetado pelo Arquiteto João Diniz, construído em estrutura metálica. Este edifício é constituído por 19 andares, localizado na cidade de Belo Horizonte, na Avenida do Contorno, nº. 9636. Nas figuras 4.1 a 4.4 são apresentadas as fachadas da edificação analisada e alguns detalhes arquitetônicos.



(a)



(b)

Figura 4.1 – Fachadas do edifício (João Diniz, 1996)

Na Figura 4.2 mostra-se o detalhe da torre de circulação vertical, totalmente executada em concreto, promovendo um equilíbrio estético para a edificação. Os elementos de vedação são neutros com as esquadrias em alumínio preto e os fechamentos externos em alvenaria revestidos de pastilhas azul escuro, fundindo-se bem com os vidros, promovendo um contraste com a estrutura metálica.

A edificação é constituída por 8 salas de consultórios médicos por andar. Nos corredores de cada pavimento existe uma recepção. Os fechamentos internos são

em painéis de gesso. O pavimento térreo constitui-se de quatro lojas e um hall público de acesso que mostra um painel artístico de Jorge dos Anjos, Figura 4.4. Acima do pavimento térreo existem três pavimentos de garagens. O quinto pavimento é pilotis e os quatorze pavimentos restantes são pavimentos tipo. Na Figura 4.5 apresenta-se uma planta baixa do pavimento tipo analisado.



Figura 4.2 – Detalhes arquitetônicos (João Diniz, 1996)



Figura 4.3 – Detalhes arquitetônicos (João Diniz, 1996)



Figura 4.4 – Painel artístico (João Diniz, 1996)

O pé direito das salas, banheiros e circulação é de 2,70 m. As envoltórias são constituídas de alvenaria, cuja espessura é de 25 cm com tijolo cerâmico de 8 furos. As faces internas são revestidas com 2 cm de argamassa, pintadas com látex branco, sobre massa látex. As faces externas são revestidas com 3 cm de emboço e pastilhas cerâmicas azul escuro. As esquadrias são de alumínio preto do tipo maxar, cujas dimensões são 253,75 x 150 cm para as salas e 190 x 150 cm para os lavatórios. As paredes externas são de alvenaria até a altura de 0,9 m, sendo que acima, foram colocadas esquadrias de alumínio. A fachada principal do edifício foi toda fechada em alvenaria, coberta com pastilhas azuis escuras, existindo pequenas janelas. Esta fachada possui a maior área atingida pelo sol da tarde. As paredes internas são constituídas de painéis de gesso revestidos com pintura látex branco gelo, sobre massa látex. As paredes internas dos banheiros são revestidas de cerâmica. O piso das salas e corredores é constituído por um contrapiso revestido por porcelanato e o teto pela laje “*steel deck*”, com revestimento de forro de gesso situado a 40 cm da laje.

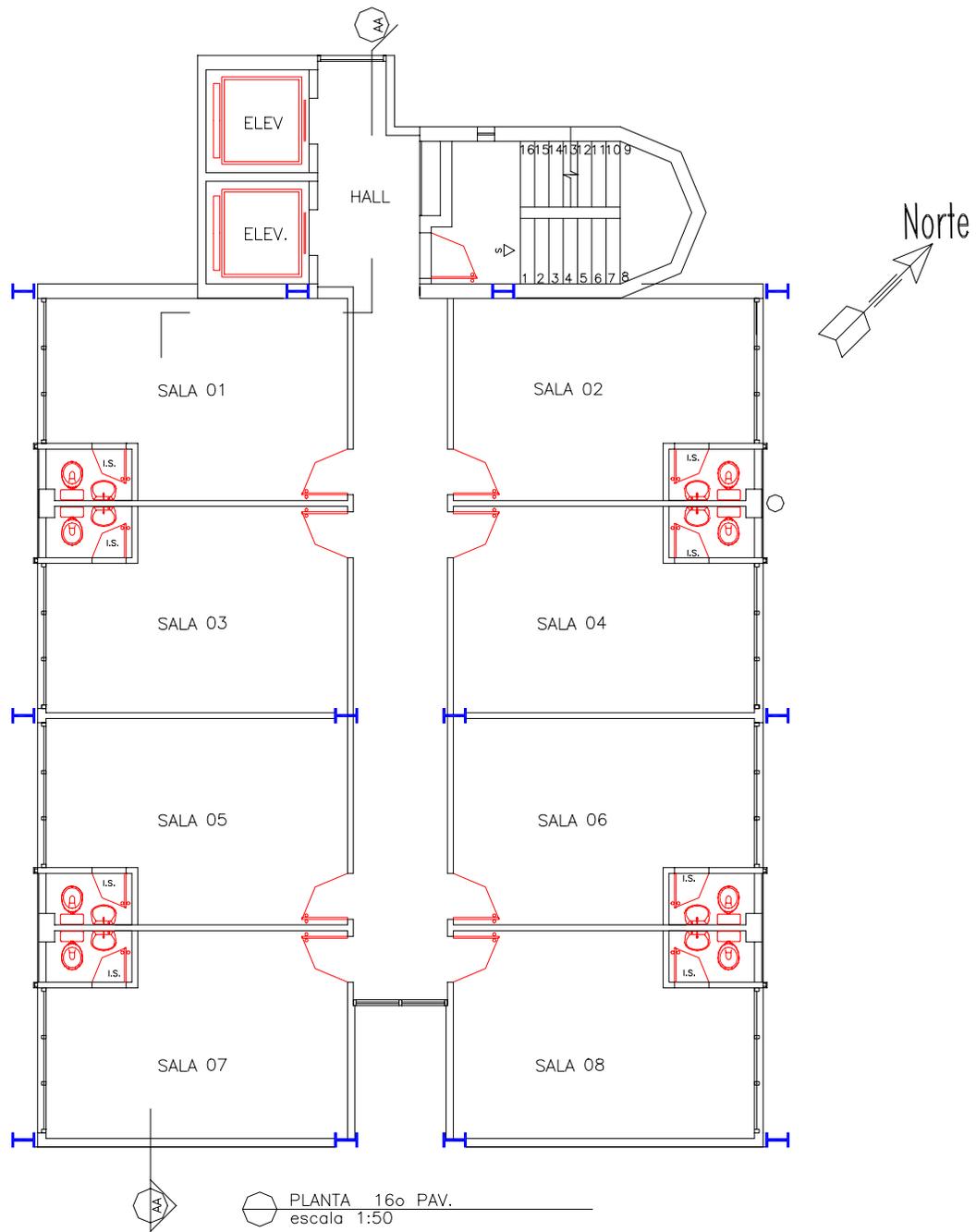


Figura 4.5 – Planta baixa (João Diniz, 1996)

4.2 – Dados Climáticos de Belo Horizonte

Belo Horizonte está localizada a 19,56 ° de latitude e 43,56 ° de longitude, Figuras 4.6 e 4.7, a uma altitude média de 875 m. A cidade apresenta como características climáticas, a temperatura máxima de bulbo seco de 32,0 °C e mínima de 21,70 °C, para o verão, e no inverno, máxima de 21,30 °C e mínima de 8,70 °C. A radiação solar global incidente em superfície horizontal é de 2677 W/m² e a radiação solar global incidente na direção normal é de 4668 W/m². Dados do INMET (1999) apontam que a média anual da umidade relativa é 72,2 %. No período de novembro a fevereiro as médias mensais da umidade relativa são mais elevadas e de agosto até setembro há uma queda das mesmas. A região estudada está sujeita a uma grande variabilidade de condições do tempo e do clima, apresentando características típicas do clima tropical de altitude, com verões quentes e úmidos e uma estação seca, com temperaturas mais baixas no inverno. A altitude da cidade é um fator de redução das temperaturas de verão e da suavidade do inverno.



(a) Localização do Brasil



(b) Estado de Minas Gerais

Figura 4.6 – Localização do Brasil e do Estado de Minas Gerais (Ribeiro, 1999)

Na Tabela 4.1 apresenta-se os perfis de temperatura do ambiente exterior para os dias típicos de inverno e verão considerados. Os dias típicos representam dias com

freqüência de ocorrência de 10 %, ou seja, para o verão, 10 % dos dias deste período apresentam temperatura máxima diária maior que a do dia típico de verão, e para o inverno, 10 % dos dias apresentam temperatura mínima diária menor que a do dia típico de inverno.

Tabela 4.1 – Evolução horária da temperatura exterior

Horário (h)	Temperatura (°C)	
	Inverno	Verão
1	10,34	23,04
2	9,71	22,52
3	9,20	22,11
4	8,83	21,80
5	8,70	21,70
6	8,95	21,91
7	9,58	22,42
8	10,72	23,35
9	12,35	24,69
10	14,24	26,23
11	16,39	27,98
12	18,40	29,63
13	19,91	30,87
14	20,92	31,69
15	21,30	32,00
16	20,92	31,69
17	20,04	30,97
18	18,65	29,84
19	17,02	28,50
20	15,38	27,16
21	13,99	26,03
22	12,73	25,00
23	11,72	24,17
24	10,97	23,55

4.3 – Etapas da Simulação

O método de estudo foi através da simulação da edificação com o código computacional ESP-r. Para o processo de simulação do desempenho térmico de uma edificação são necessários os seguintes dados: dados climáticos da região e dados da edificação.

4.3.1 – Dados climáticos

Para a simulação é necessário dados do ambiente externo, tais como a temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), a velocidade do vento (m/s), a direção do vento em graus para a direção norte no sentido anti-horário, a distribuição solar difusa na horizontal (W/m^2), a intensidade solar na direção normal (W/m^2) e a umidade relativa do ar (%). Estes dados, juntamente com a latitude e longitude da região estudada são analisados e salvos pelo programa.



Figura 4.7 – Localização de Belo Horizonte (Ribeiro, 1999)

4.3.2 – Dados da edificação

Para a simulação é necessária a configuração da edificação estudada, tais como a área de piso, o nível do piso, o pé direito da edificação, a área constituída de vidros das fachadas e os materiais dos componentes da envoltória e das divisórias. É necessário definir os ganhos de calor devido ao número de ocupantes, perfil dos equipamentos e nível de iluminação, bem como o período de ocupação, utilização destes equipamentos e das lâmpadas acesas. Outros dados relevantes são a taxa de ventilação forçada e natural.

4.4 - Estudo de Caso

Neste trabalho o objetivo é fazer um estudo comparativo do desempenho térmico desta edificação em estrutura metálica, considerando algumas variações da envoltória. Para a simulação do edifício, considera-se um pavimento tipo, Figura 4.5, que é constituído por oito salas de escritórios (área da base é de 16,25 m² e volume de 43,90 m³), com lavatórios (área da base é de 1,60 m² e volume de 3,84 m³) conjugados com as salas e um corredor (área da base é de 18,81 m² e volume de 51,00 m³).

A verificação foi feita considerando uma laje com 140 mm de espessura total de concreto (75 mm do “*steel deck*” e 65 mm de cobrimento). Para esta laje, não há necessidade de utilização de escoramento, isto porque o vão de 3.640 mm é inferior aos vãos máximos (3.700 mm) sem escoramento relacionados na Tabela de Cargas do “*steel deck*” (Codeme, 1998).

O vidro usado para o fechamento das esquadrias é liso, incolor, dispostos em duas fileiras, cuja espessura é de 6 mm e dimensões de 80 x 80 cm e 40 x 80 cm.

A iluminação é composta por 3 lâmpadas fluorescentes dispostas nas salas, e nos banheiros, 1 lâmpada. Nos corredores estão dispostas 8 lâmpadas. Isto corresponde a uma taxa de iluminação de 20 W/m².

Como o edifício é comercial, a utilização dos equipamentos é utilizado no horário de 7 às 17 h. Na Tabela 4.2 são apresentadas as características de uma sala do pavimento estudado e o perfil dos equipamentos e de ocupação adotados.

Tabela 4.2 – Características de uma sala do pavimento tipo e perfil de ocupação e equipamento.

Ambiente		Área Envidraçada [m ²]	Equipamentos/Calor Total Dissipado [W]		Perfil de Ocupação/Horário	
Sala	1 janela 1 porta	4,62	1 microcomputador	100	3 pessoas	07:00 às 17:00

Admite-se uma resistência térmica de 0,5 CLO para a vestimenta dos ocupantes, o que representa um valor para uma roupa formal de trabalho em tecido leve. Para uma roupa formal de trabalho em tecido pesado considera-se uma resistência térmica de 0,7 CLO.

Para o nível de atividade dos ocupantes considera-se a condição de pessoa sentada, que corresponde a uma taxa de produção de energia igual a 58,2 W/m².

Considera-se 0,1 m/s como o valor representativo da velocidade do ar no ambiente interno (Fanger, 1972).

Foram realizadas simulações numéricas no ESP-r, para a avaliação dos perfis da carga térmica e temperatura para a condição interna do ambiente estudado. Modifica-se os materiais de vedação internos e externos, possibilitando uma comparação do desempenho térmico entre materiais convencionais e os alternativos que apresentam disponibilidade no mercado brasileiro e acompanham a rapidez e agilidade de um processo construtivo, como o de um obra em estrutura metálica. As simulações foram realizadas para um dia típico de verão e inverno da cidade de Belo Horizonte.

4.5 – Materiais Alternativos Utilizados na Análise

Os materiais alternativos utilizados para este estudo são o painel isolite (Lafarge, 1999) e o sistema de placas cimentícias (Knauf, 1999). Como estrutura interna alternativa considerou-se o painel de gesso acartonado (Lafarge, 1999). O painel isolite e a placa cimentícia foram utilizados para substituir a alvenaria exterior, durante o processo de simulação. A escolha destes materiais foi em função da facilidade de

montagem, ausência de umidade durante a construção, menor espessura das paredes por maior área útil, pequena geração de entulho no canteiro de obras, flexibilidade arquitetônica, rápida execução inclusive a simplificação de instalações hidráulicas e elétricas, que são detalhes muito importantes para a construção de uma edificação em estrutura metálica.

Na Tabela 4.3 são mostradas as propriedades termofísicas dos materiais componentes do edifício, onde T é a temperatura dada em Kelvin; ϵ é a emissividade; ρ é a massa específica; k é a condutividade térmica; c_p é o calor específico e α é a propriedade de absorção em relação à radiação solar.

Tabela 4.3 - Propriedades termofísicas dos materiais componentes do edifício
(Temperatura =300 K)

Materiais	ϵ	ρ (kg/m ³)	k (W/m . K)	c_p (J/kg . K)	α
Alumínio	0,22	2700	210	880	0,20
Concreto	0,90	2100	1,40	653	0,65
Tijolo vermelho	0,90	2000	0,96	650	0,63
Vidro de janela	0,25	2710	0,76	837	0,05
Cerâmica opaca	0,90	1900	0,85	837	0,60
Argamassa de cimento	0,90	1500	0,36	1000	0,60
Painel de gesso	0,90	800	0,17	700	0,50
Poliestireno expandido	0,90	16	0,30	1000	0,30
Aço carbono	0,22	2700	210	880	0,2

5. RESULTADOS

5.1 – Avaliação do Software Empregado

Para a verificação do desempenho do programa ESP-r, fez-se algumas análises comparativas com resultados obtidos com os programas NBLSD e BLAST, já testados. O programa NBLSD tem sido utilizado em diversos trabalhos de pesquisa que comprovam o seu bom desempenho, dentre os quais os trabalhos de Akutsu (1993 e 1998) e de Vittorino (1994). O programa BLAST vem sendo testado em vários trabalhos de Pesquisadores da USP (Hernandez et al., 1999a, 1999b, 1993). Foram realizadas as avaliações do desempenho térmico de um galpão para as condições climáticas da cidade de São Paulo e de um edifício comercial, o edifício Scala Work Center (estudo de caso deste trabalho), para as condições climáticas de Belo Horizonte.

5.1.1 – Estudo de caso – Exemplo 1

Como uma primeira avaliação do ESP-r analisa-se o desempenho térmico de um galpão industrial já estudado através do NBLSD, programa amplamente estudado. O galpão industrial considerado tem uma área de piso de 2000 m² (50 m x 40 m), com um pé direito de 5 m. O piso é feito de cimento e as paredes de vedação em alvenaria de blocos de concreto de 9 cm de espessura, revestidas internamente com argamassa. A cobertura é em fibro-cimento de 8 mm de espessura, sem forro. Como o telhado tem uma forma côncava, o pé direito é de 8 m no meio do galpão. As janelas possuem vidros comuns de 3 mm de espessura, perfazendo 15 % da área do piso. Este galpão é ocupado por 65 pessoas, exercendo atividades leves a moderadas e ocasionalmente pesadas.

Neste exemplo compara-se a temperatura interior do galpão, Figura 5.1, esquematizado através dos resultados obtidos utilizando-se os programas ESP-r e NBLSD. As demais informações necessárias à simulação são:

a taxa de renovação de ar (10 ren/h) e a transmitância à radiação solar do vidro (0,87).

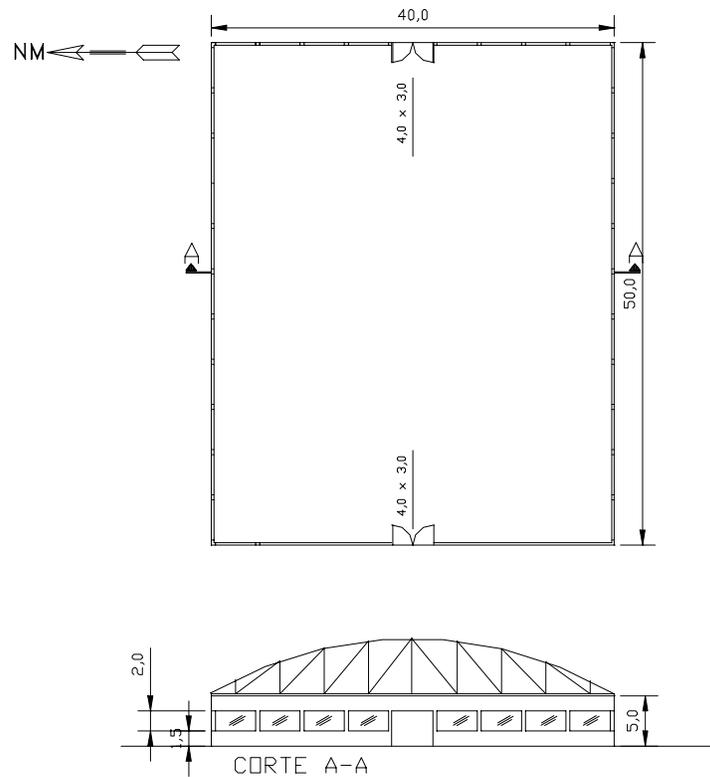


Figura 5.1 – Planta e corte do galpão

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das temperaturas de bulbo seco do dia típico de verão da cidade de São Paulo.

Considera-se o valor de 65 % como o valor médio da umidade relativa do ar, neste dia típico. O valor global da radiação solar incidente em plano horizontal foi de 5740 W/m^2 , e o valor global da radiação solar incidente na direção normal foi de 4600 W/m^2 .

A fonte de iluminação é feita por 32 luminárias, contendo cada uma 4 lâmpadas de 40 W de potência. Os equipamentos considerados liberam uma taxa de 20 W/m^2 .

Os valores das propriedades térmicas dos materiais que compõem o galpão estão mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Evolução horária da temperatura exterior no verão

Horário (h)	Temperatura (°C)
1	21,7
2	21,2
3	20,6
4	20,4
5	19,5
6	19,0
7	19,9
8	22,0
9	24,3
10	26,3
11	28,2
12	29,5
13	30,0
14	31,2
15	31,4
16	30,9
17	30,4
18	29,5
19	25,7
20	24,5
21	23,5
22	22,3
23	22,7
24	22,1

Tabela 5.2 – Valores das propriedades térmicas dos materiais que compõem o galpão industrial

Material	k [W/(m K)]	C _p [J/(kg K)]	ρ (kg/m ³)
Concreto (bloco e contrapiso)	1,9	840	2250
Cimento Amianto (telha)	0,56	1000	1600
Argamassa (revestimento e assentamento)	1,0	780	1790

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.2.

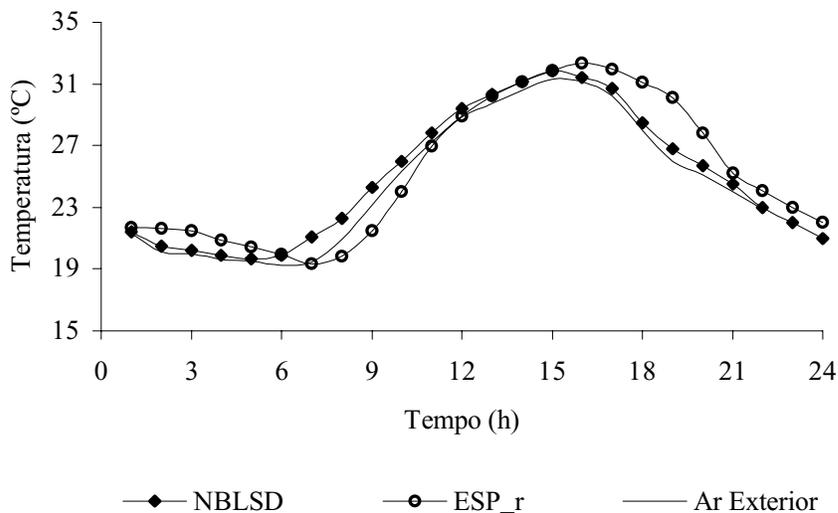


Figura 5.2 – Temperatura interna e externa do galpão – 10 ren/h.
Dia típico de verão.

Observa-se que os resultados das temperaturas interiores do galpão utilizando os programas ESP-r e NBLSD estão bastante próximos. A diferença máxima entre os valores das temperaturas, comparando-se os resultados, é de 3 °C.

5.1.2 – Estudo de caso – Exemplo 2

Neste exemplo compara-se os resultados das simulações da edificação analisada neste trabalho, Figura 4.5, utilizando os programas ESP-r e BLAST. As condições climáticas de verão da cidade de Belo Horizonte e as cargas internas estão detalhadas no item 4.4.

As simulações foram feitas considerando a alvenaria (espessura de 15 cm) como elemento de vedação interna e o painel isolite como elemento de vedação externa. Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, considerando o painel

isolite como elemento de vedação externa, e a alvenaria como elemento de vedação interna.

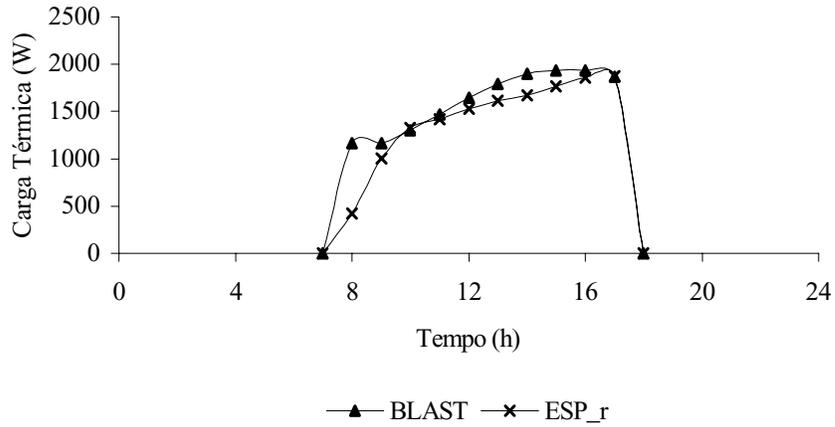


Figura 5.3 – Carga térmica de resfriamento da sala 02.
Vedação interna – alvenaria, vedação externa – painel isolite.

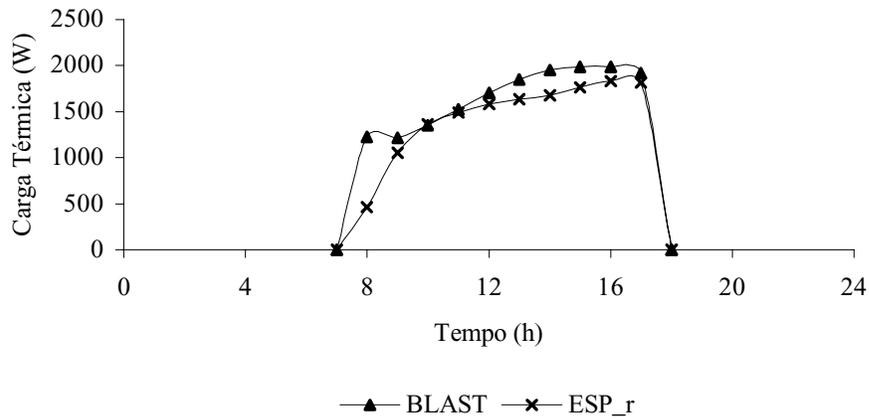


Figura 5.4 – Carga térmica de resfriamento da sala 08.
Vedação interna – alvenaria, vedação externa – painel isolite.

Os resultados obtidos através dos dois programas de simulação são bem similares, com diferenças não significativas.

5.2 – Resultados

Neste capítulo apresenta-se os resultados da simulação para o ambiente definido no capítulo anterior, considerando-se dias típicos de inverno e verão e as condições climáticas locais. A partir das condições de vento (direção e velocidade) da região em estudo pode-se fazer uma estimativa da ventilação natural dentro das salas (número de renovações por hora). Baseando-se nos dados da frequência acumulada da direção dos ventos de Belo Horizonte no período de 1994 a 1998, para o mês de janeiro, obteve-se o seguinte resultado mostrado na Tabela 5.3 (INFRAERO, 1999).

Tabela 5.3 – Frequência acumulada da direção dos ventos em Belo Horizonte

Direção	Frequência (%)
Sudeste	29
Leste	36
Oeste	10
Noroeste	07
Norte	06
Sul	06
Nordeste	04
Sudoeste	02

A velocidade do vento considerada foi 3,35 m/s, que é a velocidade média predominante da região estudada. A partir dos dados da Tabela 5.3, observa-se que a predominância do vento é na direção leste. Com estes dados verifica-se que a direção predominante do vento nas janelas das fachadas da edificação possui um ângulo de 45° no sentido horário. As janelas foram consideradas abertas numa área igual à metade da área iluminante. As portas externas foram mantidas fechadas, as portas internas completamente abertas e nenhuma obstrução externa à incidência do vento na edificação é considerada. Com estes valores pode-se determinar uma vazão de ar igual a 1188 m³/h para as condições mais favoráveis. Como a taxa de renovação de ar é a razão entre a vazão e o volume de uma sala típica da edificação (43,9 m³), obteve-se um valor de aproximadamente 30 renovações por hora, como a condição mais representativa para a edificação em estudo.

Para os casos estudados, foram consideradas três situações de renovação de ar: 10 ren/h, situação que representa uma circulação de ar baixa; 30 ren/h, situação que

representa um caso de circulação razoável no recinto; e 60 ren/h, que indica uma alternativa de muito boa ventilação nos ambientes. Os resultados obtidos estão sintetizados nas Figuras 5.5 a 5.28 onde são representados graficamente o comportamento das temperaturas internas para as salas 02 e 08 da edificação, considerando três tipos de vedação externa (alvenaria, painel isolite e placa cimentícia) e dois tipos de vedação interna (alvenaria e painel de gesso) e o comportamento da temperatura do ar exterior para as condições de inverno e verão. De acordo com a disposição e características físicas do andar tipo, Figura 4.5, a sala 02 possui características térmicas mais desfavoráveis, promovendo maior insatisfação dos usuários das mesmas e a sala 08, apresenta condições mais favoráveis. Os resultados da simulação das outras salas do pavimento tipo apresentaram valores intermediários em relação aos valores das salas 02 e 08, que são valores bastante próximos uns dos outros. Isto se deve pela disposição das salas em relação ao sol (sentido leste – oeste), pois há uma maior carga solar neste sentido. Por isso, os resultados das análises que seguem são apresentados somente para as salas 02 e 08.

Numa primeira avaliação foi considerada a edificação não condicionada e com uma ventilação natural para a verificação das condições de conforto. Os resultados para as salas 02 e 08, Figura 4.5, com temperaturas mais diferenciadas são apresentados nas Figuras 5.5 a 5.28.

As características dos elementos de vedação utilizados são:

- a) Elementos de vedação interna
 - Parede de alvenaria constituída por uma camada de tijolos cerâmicos, com espessura de 100 mm e revestimento de argamassa de 25 mm nas duas faces;
 - Parede em painel de gesso constituída de duas placas de gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm, colocadas em paralelo e com uma camada de ar de 75 mm de espessura entre elas.
- b) Elementos de vedação externa
 - Parede de alvenaria constituída por uma camada de tijolos cerâmicos, com espessura de 200 mm e revestimento de argamassa de 25 mm nas duas faces;

- Parede em painel isolite constituída por uma placa de poliestireno expandido com 40 mm de espessura. Nas suas faces são colocadas duas malhas de telas de aço soldadas e acima destas uma camada de 30 mm de argamassa projetada.
 - Placa cimentícia constituída por duas placas de composição à base mineral, cuja espessura é de 12,5 mm e um espaço de ar entre as duas de 40 mm
- c) Forro e piso
- Laje “*steel deck*” com 140 mm de espessura (75 mm de “*steel deck*” e 65 mm de cobertura).

Admite-se que é desprezível a resistência oferecida à circulação do ar no interior do edifício e que as perdas de cargas só ocorrem nas passagens do ar pelas aberturas (frestas) das janelas e portas. Nas Figuras 5.5 a 5.8 apresenta-se os dados para as duas salas nas condições de inverno, considerando-se uma taxa de ventilação igual a 10 ren/h e como elemento de vedação interno a alvenaria, Figuras 5.5 e 5.6, e painel de gesso, Figuras 5.7 e 5.8.

Com os resultados apresentados na Figura 5.5, observa-se que o ambiente interno possui uma maior temperatura quando a placa cimentícia é o elemento de vedação externa. O painel isolite apresenta o valor de menor temperatura de pico, sendo que a diferença entre as temperaturas considerando o painel isolite e a placa cimentícia é 2,3 °C.

A sala 02 apresenta um valor máximo diário da temperatura do ar interior de 5 °C maior que o valor máximo diário da temperatura do ar exterior, considerando a placa cimentícia como elemento de vedação externo. Para os outros materiais de vedação externa, painel isolite e alvenaria, a diferença entre os valores máximos diários da temperatura externa e a temperatura interna é em torno de 3,6 °C. O atraso para estes valores máximos diários das temperaturas internas e a externa é de 2 h, aproximadamente, para os materiais painel isolite, placa cimentícia e alvenaria. Este atraso se deve a inércia térmica da edificação. Existe uma demora de 2 h, em média, nos resultados analisados nas Figuras 5.5 a 5.28, no processo de transferência de calor por condução nos elementos de vedação externos da estrutura.

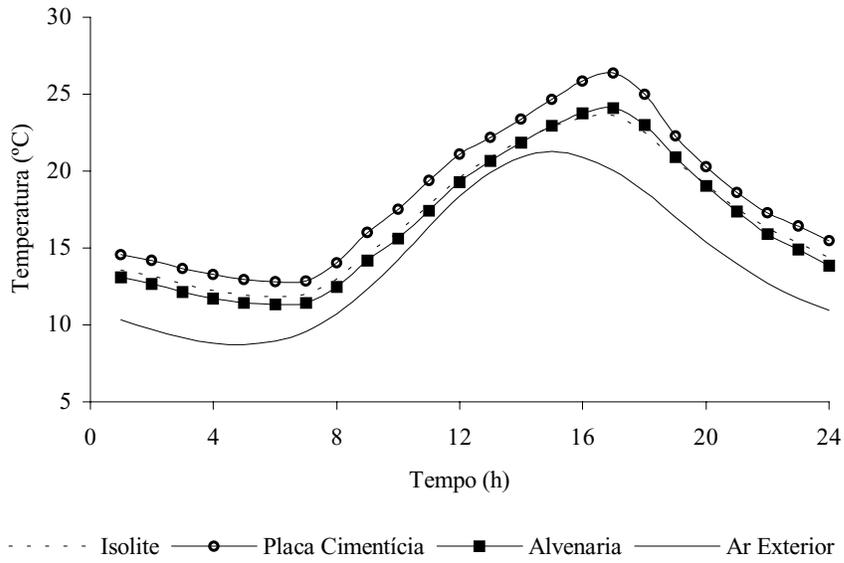


Figura 5.5 - Temperatura do ar no interior da sala 02 no dia típico de inverno – 10 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

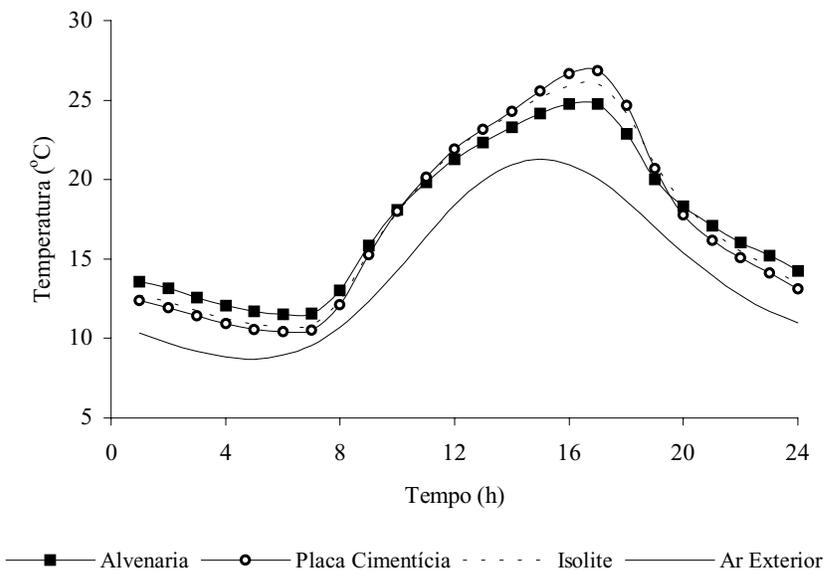


Figura 5.6 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 10 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

Comparando-se os resultados das Figuras 5.5 e 5.6, os valores das temperaturas da sala 02 variam pouco quando a alvenaria é substituída pelo painel de gesso como vedação interna apresentando uma diferença de aproximadamente 0,5 °C. A diferença da temperatura interna resultante, considerando a alvenaria e a placa cimentícia como elementos de vedação externa, é de no máximo 0,7 °C, para os dois tipos de vedação interna. Somente para o painel isolite observa-se que houve uma mudança no comportamento das curvas das temperaturas da sala 02.

A diferença da temperatura neste caso fica em torno de 2,5 °C. O valor máximo é alcançado com a placa cimentícia e é em torno de 25 °C.

Através dos resultados apresentados na Figura 5.7 pode-se observar que a temperatura do ambiente interno possui valores aproximados para todos os materiais. A diferença entre as temperaturas internas com o painel isolite e a placa cimentícia é de 0,5 °C. Nesta sala o nível de conforto (o mínimo é de 17 °C) é alcançado no período de 11 às 21 h, considerando qualquer um dos elementos estudados de vedação externa.

De acordo com a Norma NBR 6401 (1978), o intervalo de conforto térmico considerado como recomendável para um edifício comercial condicionado estabelece temperaturas entre 23 °C e 25 °C, admitindo uma temperatura de bulbo seco máxima de até 27 °C aproximadamente. Para ambientes de escritórios não condicionados, as Normas ISO 7730 (1994) e ASHRAE (1993) determinam que se pode admitir uma temperatura limite de até 29 °C, no verão. No inverno, as exigências de conforto no período diurno são atendidas quando o nível de temperatura do ar seja superior a 17 °C. Esta situação considera que as pessoas tenham uma atividade sedentária (58,2 W/m²), vestimenta com resistência térmica de 0,5 CLO, umidade relativa do ar em torno de 60 % e velocidade do ar no interior do recinto de 0,8 m/s. Para o intervalo de temperatura de conforto, segundo a Norma, durante o período de inverno, para a edificação analisada, os ocupantes estão sujeitos a uma condição de ambiente frio, apenas em parte do período da manhã de uma forma mais intensa.

Analisando os resultados mostrados na Figura 5.8, com painel de gesso como vedação interna, percebe-se que houve uma mudança do elemento que apresenta a temperatura de pico maior. O maior pico ocorreu com o painel isolite como a envolvente da edificação, cuja temperatura chegou a um valor de 24,4 °C.

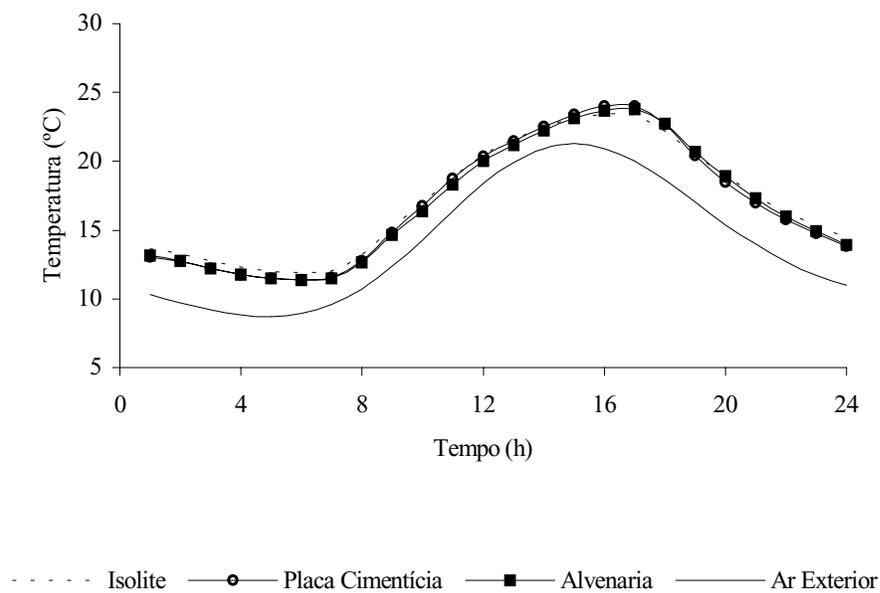


Figura 5.7 - Temperatura do ar no interior da sala 08 no dia típico de inverno – 10 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

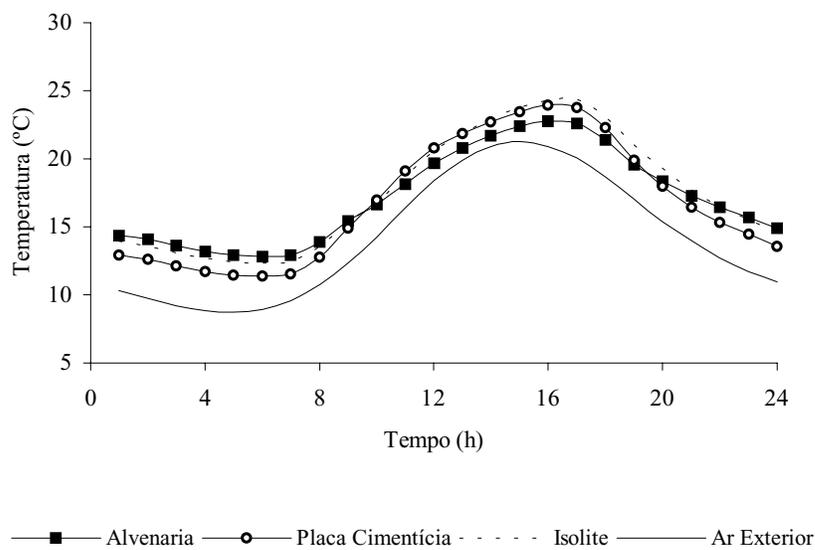


Figura 5.8 - Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 10 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

Ao se fazer uma avaliação do desempenho térmico dos elementos de vedação externa, observa-se que a temperatura interna da sala 02, quando se tem a placa cimentícia como entorno, Figura 5.5, atinge o nível de conforto térmico, considerando uma ventilação natural de 10 ren/h, no intervalo de 10 às 22 h. Já para os outros materiais, alvenaria e painel isolite, o nível de conforto térmico é atingido em um intervalo menor, ou seja, de 11 às 21 h. A Figura 5.6 mostra uma diferença de 2,1 °C entre as temperaturas de pico utilizando-se a placa cimentícia e a alvenaria como elementos externos da edificação.

A temperatura interna máxima é 26,9 °C considerando a placa cimentícia como elemento de vedação externa. O valor máximo estipulado é de 29 °C.

Os resultados para as condições de verão são apresentados nas Figuras 5.9 a 5.12, considerando-se uma ventilação natural de 10 ren/h. A Figura 5.9 indica uma variação das temperaturas internas para a sala 02, considerando o painel isolite e a placa cimentícia, em torno de 3,6° C. Já o painel isolite e a alvenaria, como elementos externos, apresentam uma diferença máxima de 2 °C.

Deve-se observar que esta edificação é ocupada por consultórios médicos possuindo como fontes internas de calor somente as pessoas (usuários) e equipamentos (microcomputadores e impressoras). Estas fontes internas não produzem nenhum pico acentuado de energia.

Nas Figuras 5.13 a 5.16 indicam-se as condições de inverno e nas Figuras 5.17 a 5.18 as condições de verão, considerando-se uma taxa de renovação de 30 ren/h de ventilação natural.

Na sala 02 para qualquer tipo de material utilizado como vedação externa, a temperatura de conforto térmico é atingido no período de 11 às 20 h, Figura 5.13. A diferença das temperaturas quando se considera a placa cimentícia e o painel isolite é de apenas 1 °C. Já a maior diferença entre as temperaturas internas, usando painel de gesso como vedação interna, ocorre quando se tem a placa cimentícia e a alvenaria e atinge apenas 1,2 °C, Figura 5.14. Na sala 08, no período de inverno, Figura 5.15, caracteriza-se a semelhança dos valores da temperatura do ambiente interno com a alvenaria e a placa cimentícia.

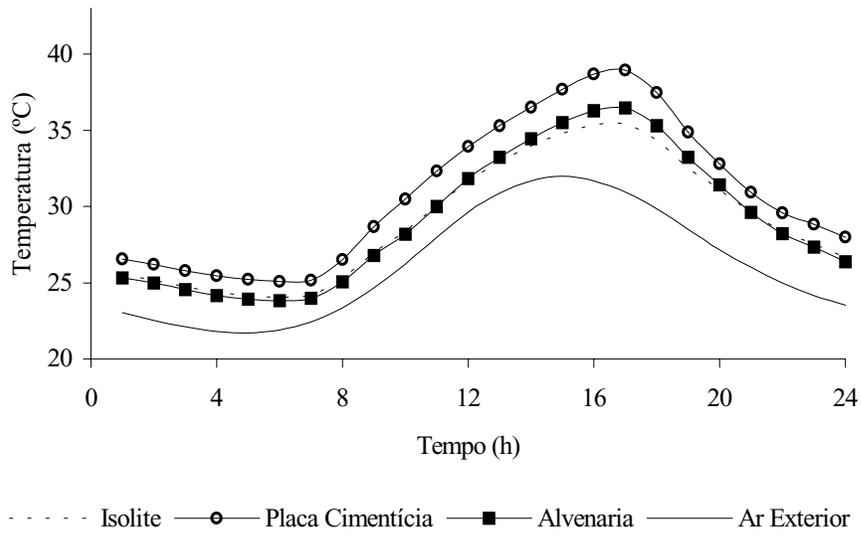


Figura 5.9 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 10 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

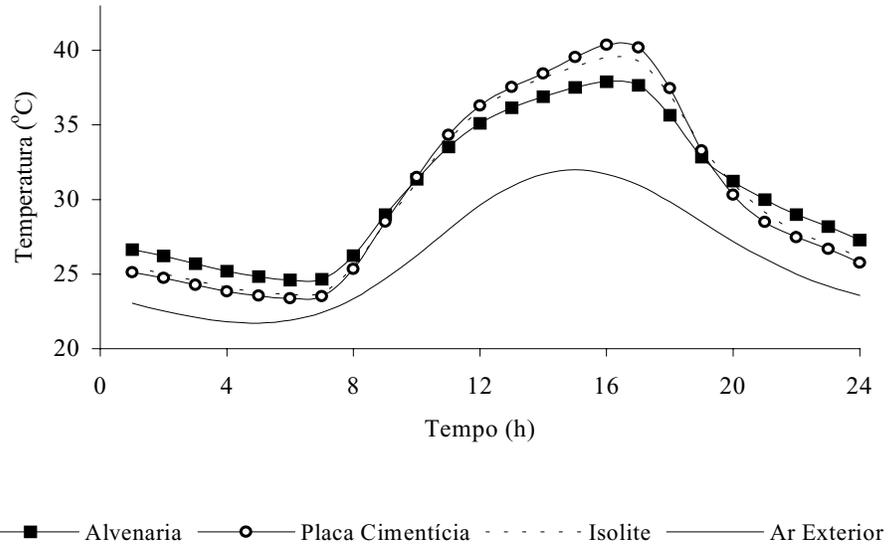


Figura 5.10 - Temperatura do ar do interior da sala 02 no dia típico de verão – 10 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

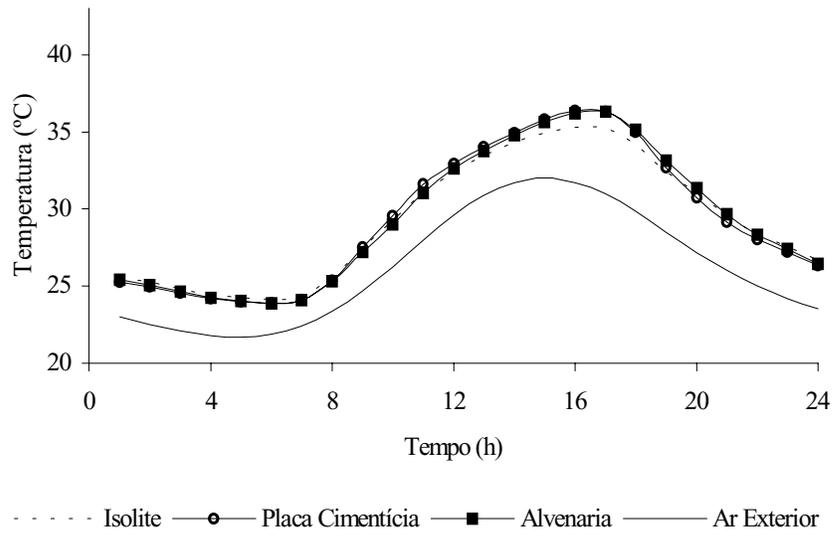


Figura 5.11 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 10 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

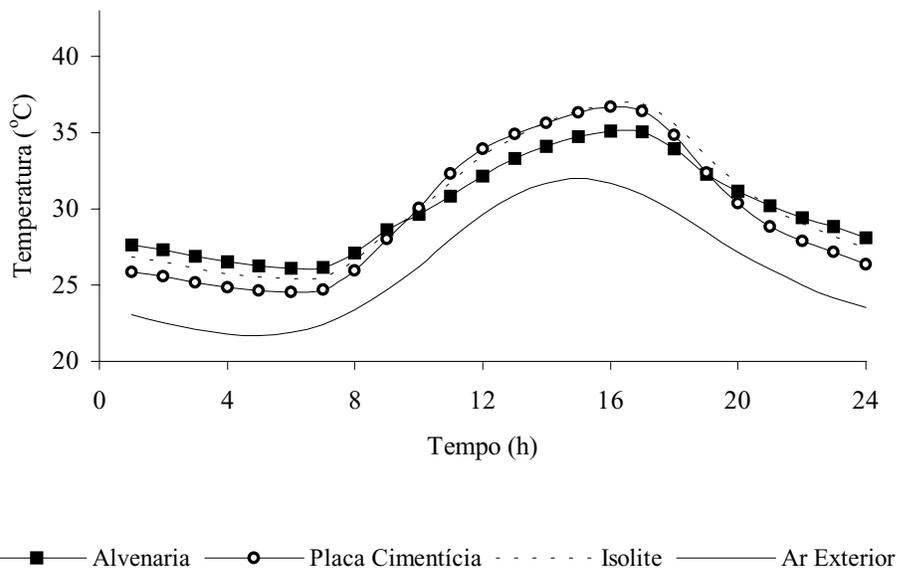


Figura 5.12 - Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 10 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

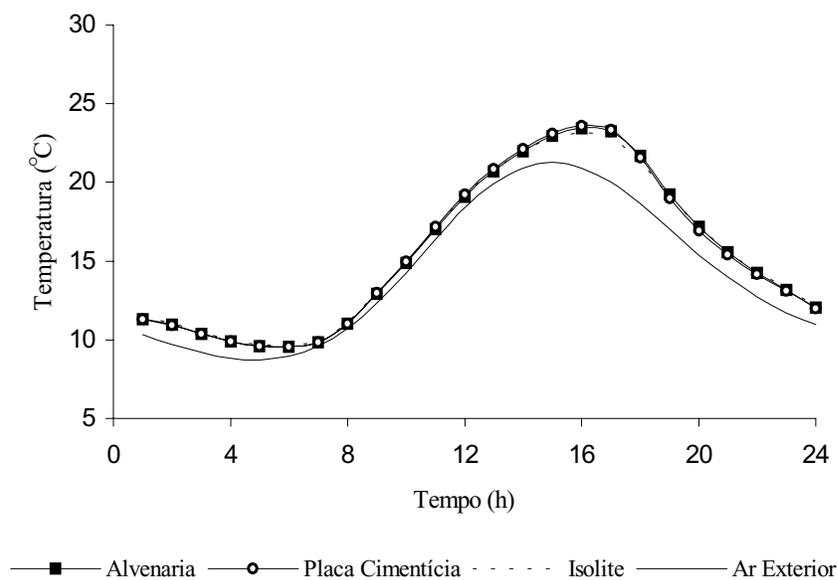


Figura 5.13 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 30 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

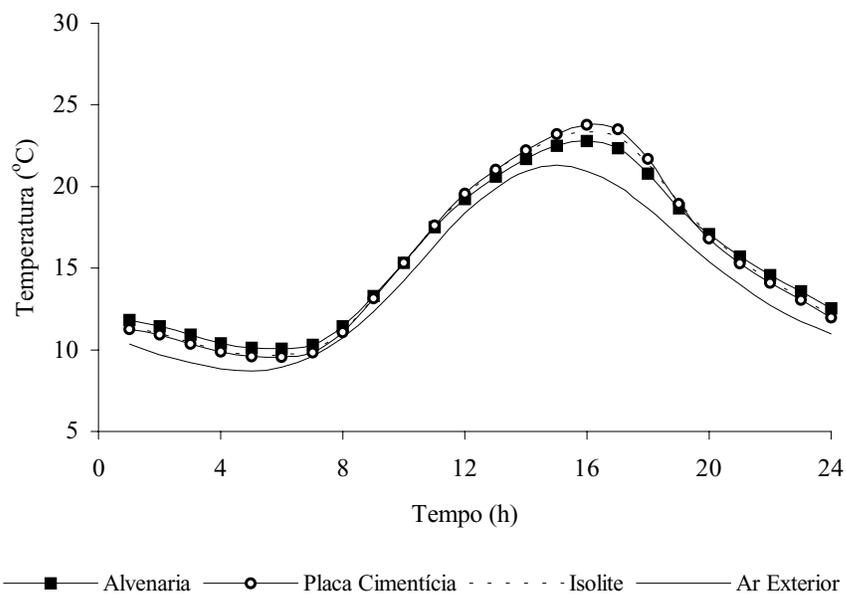


Figura 5.14 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 30 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

Para o painel isolite, a temperatura da sala 08 no inverno é confortável no intervalo de tempo de 11 às 20 h, sendo que a temperatura máxima atingida é de 21,6 °C, que é uma temperatura inferior ao limite estabelecido. Observa-se que com o painel isolite houve o ambiente apresenta-se mais confortável, quando se compara com os outros elementos de vedação externa. Para o painel de gesso como vedante interno, Figura 5.16, a diferença entres os picos de temperatura ocorre com a alvenaria e a placa cimentícia e é de 1,4 °C.

O comportamento da temperatura interna, Figuras 5.5 a 5.28, se assemelha com aquele da curva da temperatura externa, por não haver nenhuma carga térmica interna considerável durante o intervalo de tempo analisado.

Para o período de inverno, considerando uma condição de ventilação natural de 30 ren/h, Figuras 5.13 a 5.16 a edificação apresenta temperaturas internas semelhantes para todos os elementos de vedação. Com esta condição de ventilação há uma necessidade de aquecimento do ambiente, apenas no período de 7 às 10 h, se for observado o limite inferior da temperatura de conforto estabelecido pelas Normas.

A preferência térmica em relação a um dado ambiente depende das condições físicas e psicológicas de cada usuário. Considerando-se que os ocupantes desta edificação estão em atividades ditas sedentárias (consultórios médicos) e há uma mudança constante na maioria dos usuários (pacientes) durante o dia, a faixa de temperatura de conforto pode ser mais ampla que aquela especificada pela Norma. Estudos estatísticos feitos para verificação da preferência térmica na região de Belo Horizonte mostraram que 33,8 % das pessoas preferem ter a sensação de frio, 11,27 % preferem ter a sensação de calor e 54,23 % escolhem a condição de neutralidade térmica (Gonçalves, 2000). Observa-se que aproximadamente um terço da população aceita temperaturas inferiores ao limite da temperatura de conforto estabelecida pela Norma. Um dos fatores que pode influenciar na preferência térmica é o tempo de residência na região estudada. A influência da adaptação climática é um parâmetro relevante na obtenção dos votos de conforto térmico. Por exemplo, as pessoas que têm um tempo de residência inferior a um ano, podem influenciar na determinação dos limites de conforto para a população em estudo. Por isso, a faixa de temperaturas de conforto pode ser um pouco mais ampla.

A atividade desempenhada por uma pessoa também influencia na sua sensação de conforto térmico. Sabe-se que através das reações químicas do metabolismo alimentar, o corpo produz energia, que se transforma em trabalho externo e calor. Por exemplo, durante um exercício intenso e prolongado, a taxa metabólica aumenta de 20 a 25 vezes acima do nível basal (o metabolismo basal corresponde a uma taxa em torno de 45 W/m^2 e representa a condição básica de sobrevivência, ou seja, respiração e circulação do sangue). O aumento da taxa metabólica, devido à atividade física intensa e prolongada, teoricamente pode elevar a temperatura central em cerca de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ a cada cinco minutos (McArdle et al., 1985). Além destes fatores, o tipo da vestimenta, que pode promover um maior ou menor isolamento térmico, também interfere.

Para as condições de verão, na sala 02, as temperaturas internas se aproximam tendo uma diferença no pico de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ considerando os materiais placa cimentícia e painel isolite, Figura 5.17. A faixa de temperatura de conforto térmico é atingida no período de 21 às 10 h.

Do ponto de vista térmico não há diferença significativa quanto ao desempenho térmico destes materiais. No período de verão, para a sala mais crítica (sala 02) a temperatura interna mais elevada é de $35,8 \text{ }^\circ\text{C}$, quando se utiliza a placa cimentícia como parede externa e gesso como interna, Figura 5.18. A alvenaria como parede externa apresenta um desempenho térmico um pouco melhor, obtendo-se uma diferença nas temperaturas máximas de aproximadamente $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Já para a sala 08 (sala menos crítica) neste mesmo período a temperatura máxima alcançada é de $33,9 \text{ }^\circ\text{C}$, Figura 5.20. A diferença entre as temperaturas de pico utilizando placa cimentícia e painel isolite em relação à alvenaria é aproximadamente de $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

As Figuras 5.21 a 5.28 apresentam os resultados da simulação considerando uma ventilação natural de 60 ren/h , que neste estudo é um valor acima da situação real. Nas Figuras 5.17 a 5.20 indica-se as condições de inverno e nas Figuras 5.25 a 5.28, as condições de verão.

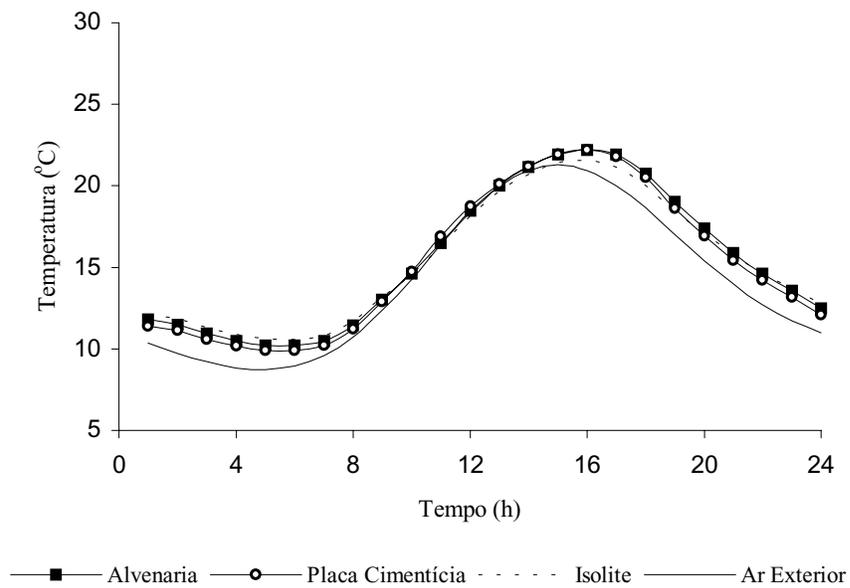


Figura 5.15 - Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 30 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

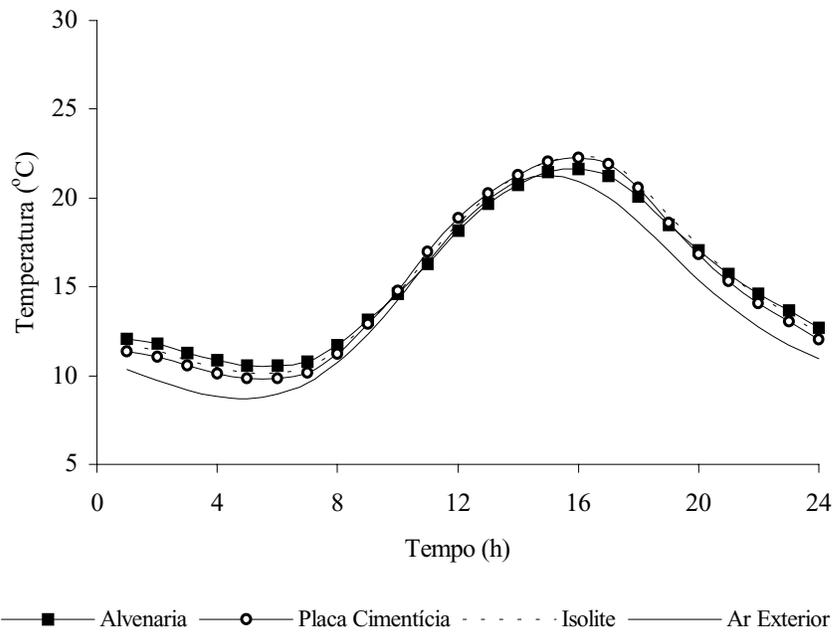


Figura 5.16 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 30 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

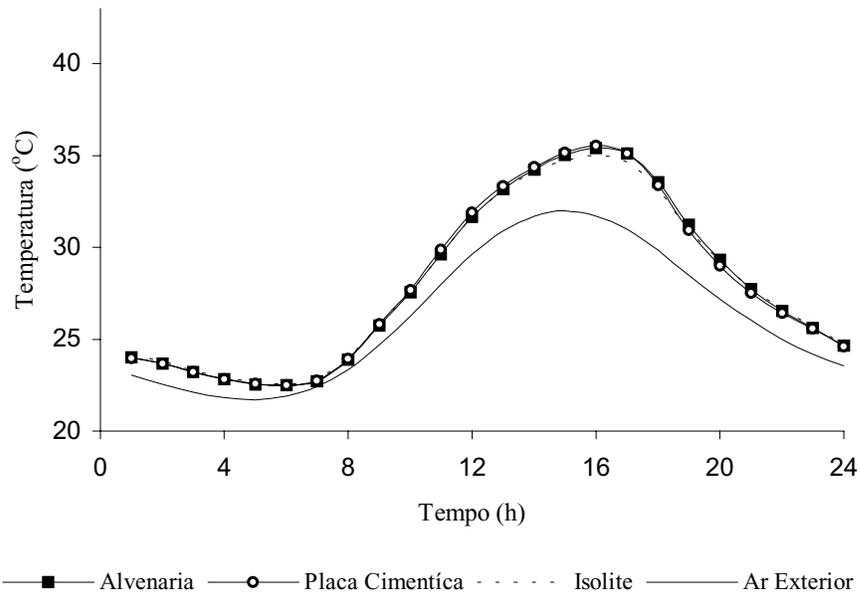


Figura 5.17 - Temperatura do ar do interior da sala 02 no dia típico de verão – 30 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

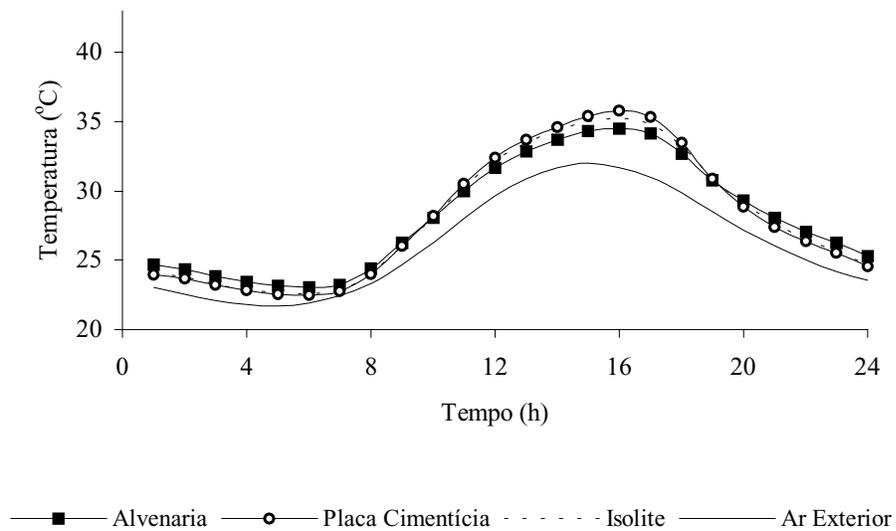


Figura 5.18 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 30 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

Nas Figuras 5.21 a 5.24 observa-se que houve uma diminuição significativa da temperatura do ambiente interno, quando compara-se as temperaturas das salas 02 e 08 no dia típico de inverno, considerando-se a ventilação natural de 10 ren/h e 30 ren/h. A temperatura de pico do ambiente para a taxa de ventilação de 60 ren/h, considerando qualquer um dos tipos de materiais analisados, ocorre sempre às 16 hs com uma temperatura média de 22,5 °C. No intervalo de 12 às 20 h o ambiente térmico é adequado para a ocupação, segundo o critério da Norma. Fora desse intervalo, os ocupantes da sala 02 têm a sensação de desconforto térmico, devido à sensação de frio.

Quando são verificadas as condições para verão ocorre uma elevação acentuada na temperatura do ambiente interno, independentemente da vedação externa utilizada, Figuras 5.24 e 5.28. Esta situação exige o condicionamento do ar interior das salas, no período de 11 às 20 h. Mesmo com uma circulação alta de ventilação natural, a temperatura de pico nas salas é em torno de 33 °C às 16 h.

Se há necessidade de utilização de grandes superfícies envidraçadas, que permitem a entrada da radiação solar nos ambientes e impedem a sua saída, causando um efeito estufa nos interiores, é necessário prover uma boa circulação natural a fim de diminuir o condicionamento mecânico dos ambientes internos.

Em todos os casos analisados a temperatura do ar interior está sempre acima da temperatura do ar exterior. A ventilação do ambiente apresenta grandes efeitos na redução da temperatura do ar interior. Este efeito é mais significativo quando ocorrem, altas taxas de renovação de ar que nem sempre são garantidas. Com os resultados obtidos pode-se afirmar que os detalhes de projeto, relativos ao controle de ventilação dos ambientes, conforme a necessidade do verão e do inverno são muito importantes, além da escolha de tipos de elementos de vedação interna e externa. Isto reforça as observações feitas quanto à importância da avaliação do comportamento térmico global dos ambientes.

Com uma maior variação do fluxo de ar nos ambientes percebe-se que houve uma melhoria significativa do conforto térmico. Nas condições de inverno os picos das curvas de temperatura estão em torno de 26 °C, que é uma temperatura aceitável. Já no verão o mesmo não acontece, pois a temperatura chega em torno dos 39 °C, no caso mais crítico (sem ventilação natural) que é um valor muito alto, sendo portanto necessário o condicionamento térmico do ambiente.

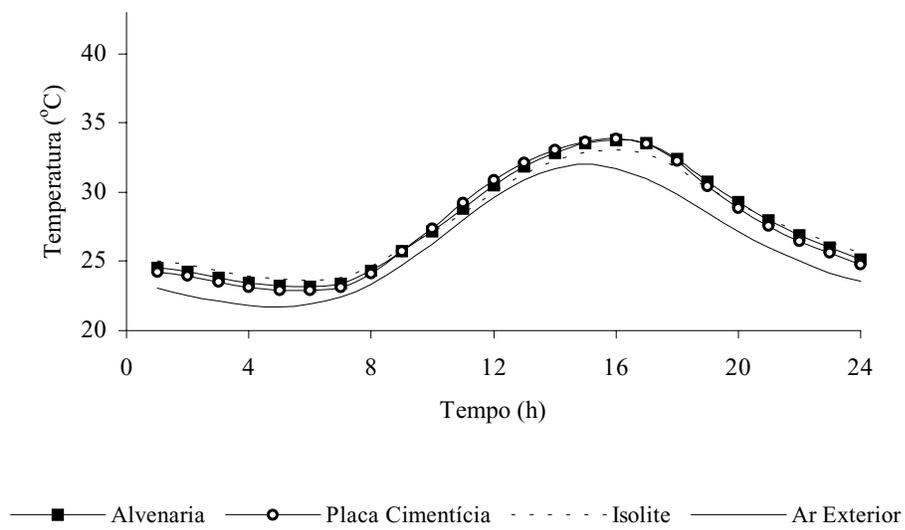


Figura 5.19 - Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 30 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

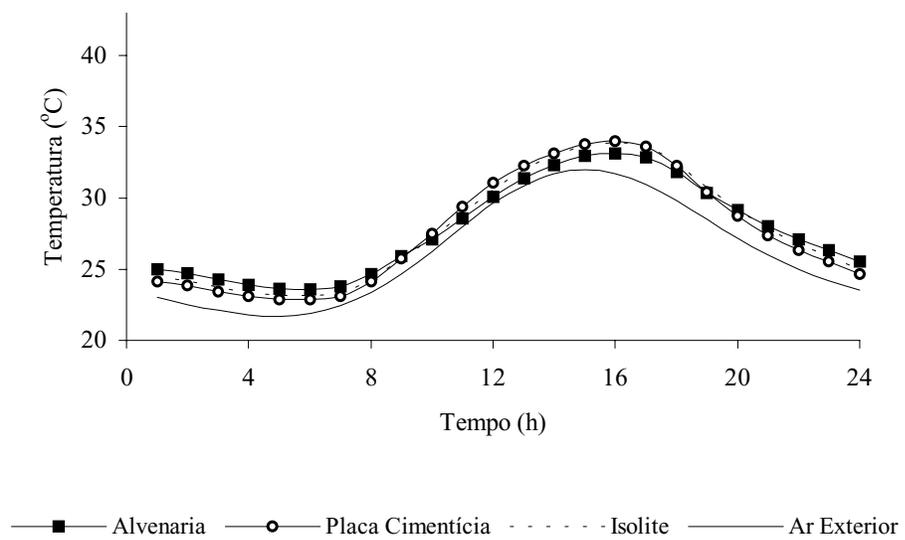


Figura 5.20 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 30 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

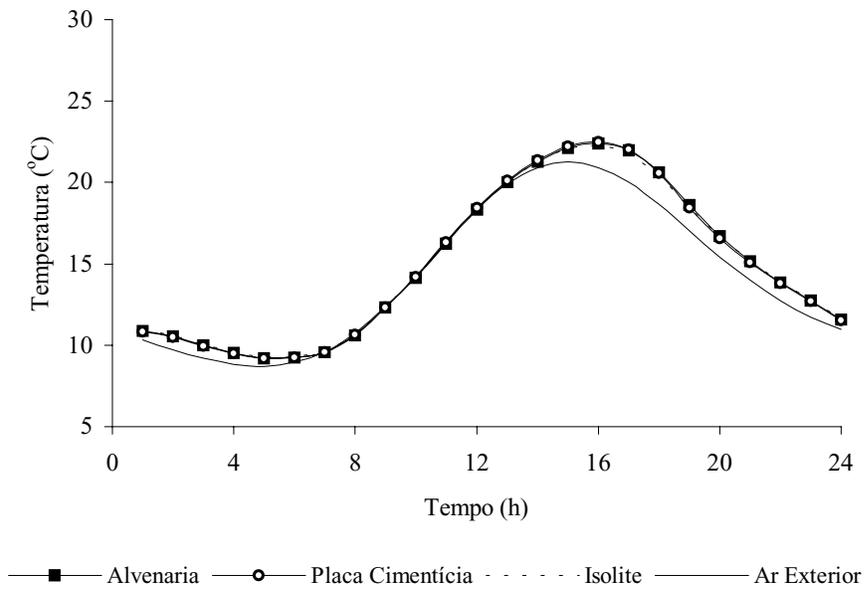


Figura 5.21 – Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno – 60 ren/h. Vedação interna com alvenaria.

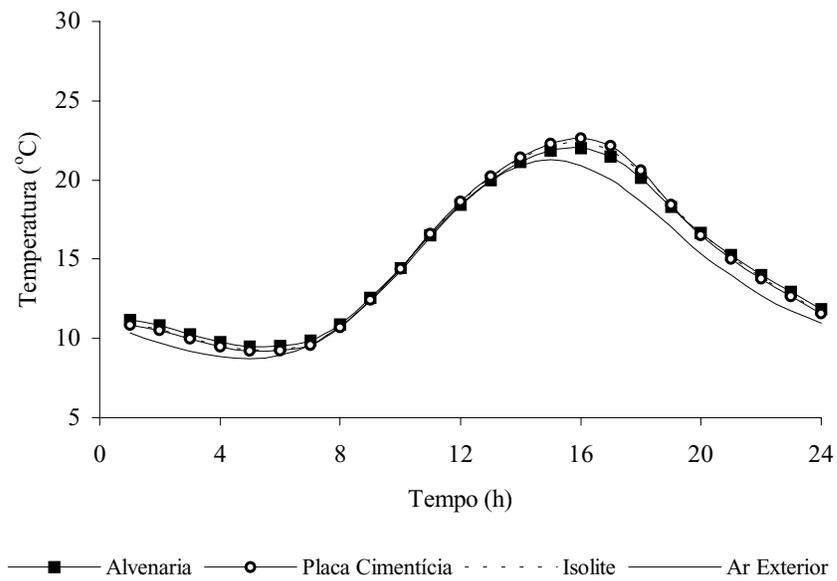


Figura 5.22 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de inverno - 60 ren/h . Vedação interna com painel de gesso.

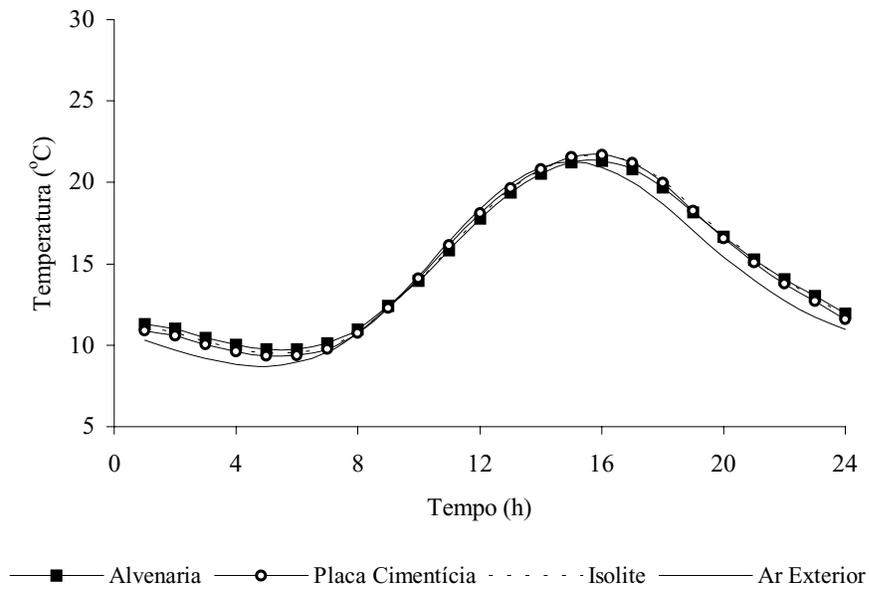


Figura 5.23 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 60 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

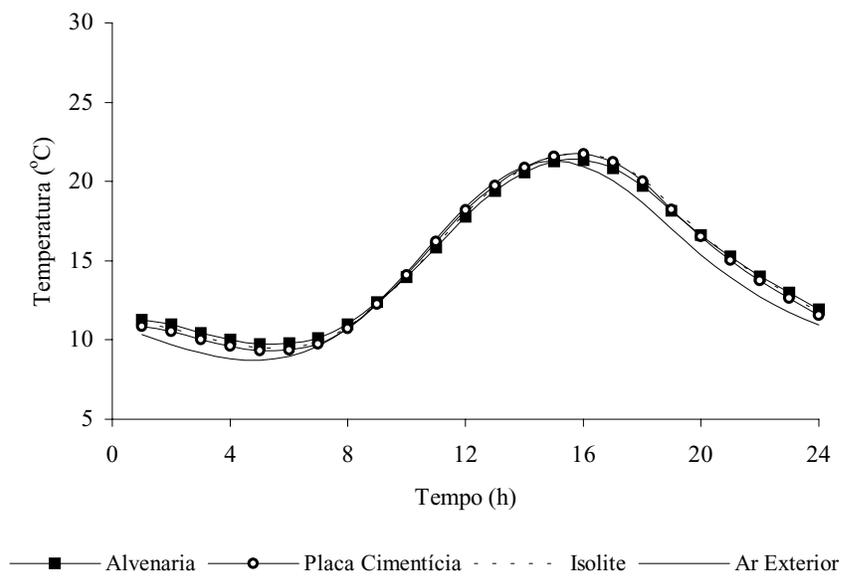


Figura 5.24 – Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de inverno – 60 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

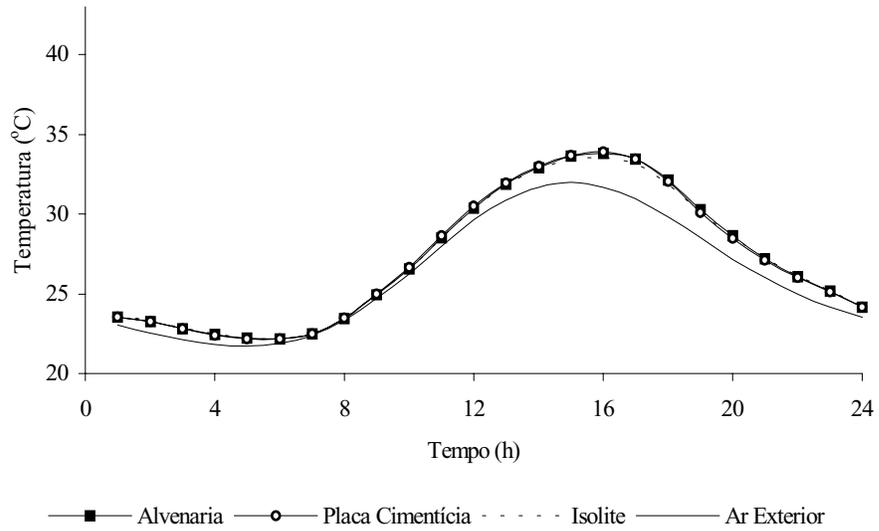


Figura 5.25 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 60 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

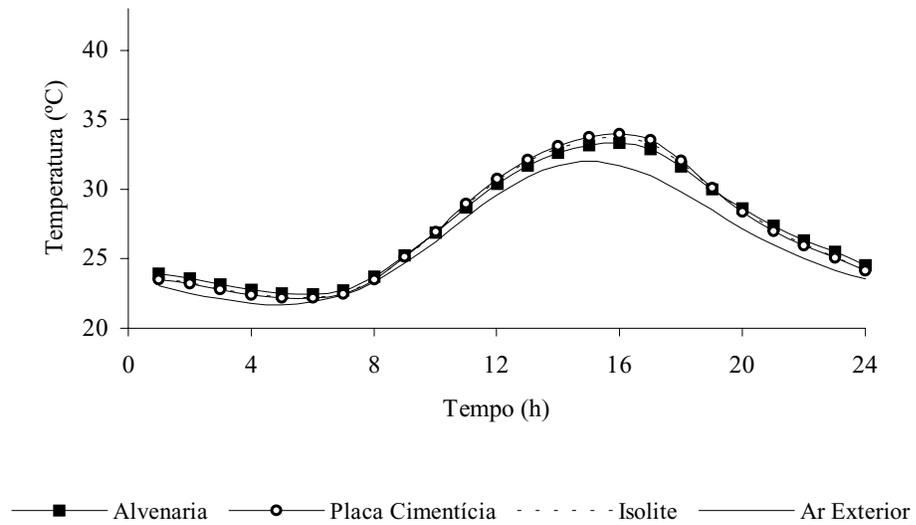


Figura 5.26 - Temperatura do ar interior da sala 02 no dia típico de verão – 60 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

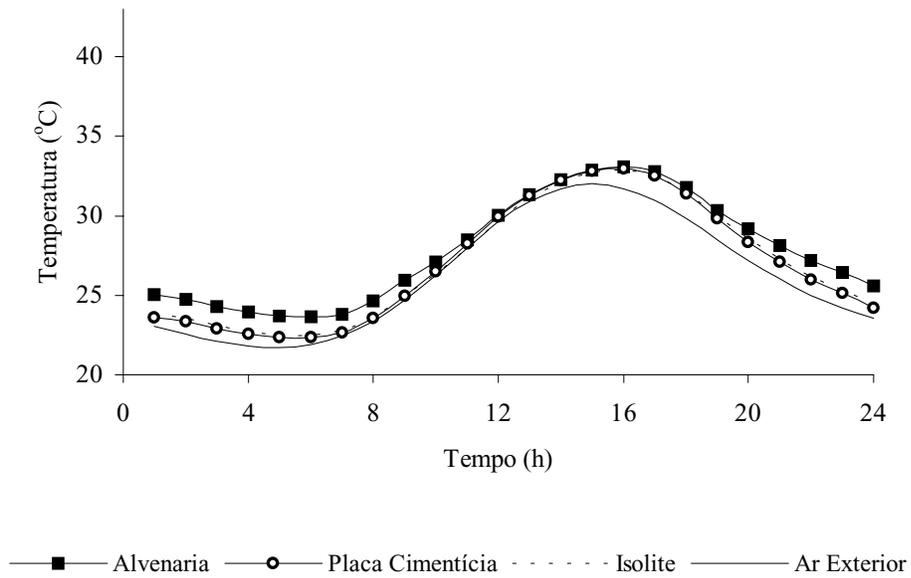


Figura 5.27 - Temperatura do ar do interior da sala 08 no dia típico de verão – 60 ren/h.
Vedação interna com alvenaria.

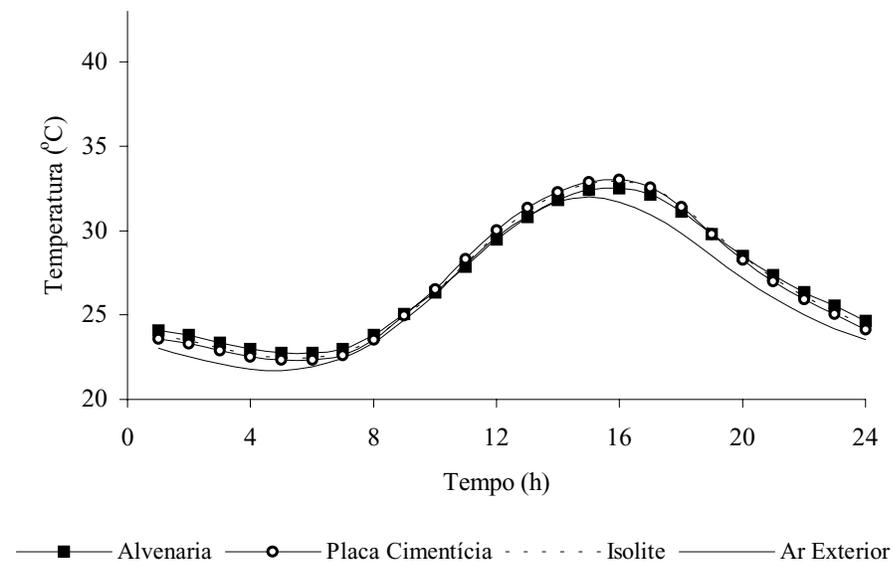


Figura 5.28 - Temperatura do ar interior da sala 08 no dia típico de verão – 60 ren/h.
Vedação interna com painel de gesso.

O elemento de vedação externa utilizado na edificação é a alvenaria. Como elemento de vedação interna tem-se o painel de gesso (item 4.1). Como elementos alternativos (item 4.5) verificou-se o desempenho térmico do painel isolite e da placa cimentícia (para a vedação externa) e da alvenaria (para a vedação interna).

Comparando-se os resultados obtidos para a temperatura interna nas diversas alternativas de elementos para a envoltória e divisórias internas tem-se do ponto de vista de isolamento térmico que:

- a) os elementos alternativos para a vedação externa apresentaram desempenho semelhante em relação à alvenaria com uma diferença máxima de temperatura, no pico, de aproximadamente 2,5 °C, tanto para a alvenaria, quanto para o painel de gesso como divisórias internas;
- b) durante o horário de ocupação, a placa cimentícia apresenta o pior desempenho;
- c) quando o painel de gesso é utilizado como elemento de vedação interna a temperatura de pico do ambiente atinge um valor maior. Esta diferença, no entanto, é de aproximadamente 1 °C.

A análise agora é feita considerando-se a edificação condicionada para a verificação das condições de conforto. Nesta simulação, o condicionador de ar é constituído de um sistema de controle ideal capaz de controlar o ar à uma temperatura de 24 °C. O ar é recirculado a uma taxa de 1,0 ren/h. Os resultados das análises das salas críticas, considera-se como elementos de vedação externa:

- Parede de alvenaria constituída por uma camada de tijolos cerâmicos, com espessura de 200 mm e revestimento de argamassa de 25 mm nas duas faces;
- Parede em painel isolite constituída por uma placa de poliestireno expandido com 40 mm de espessura. Nas suas faces são colocadas duas malhas de telas de aço soldadas e acima destas uma camada de 30 mm de argamassa projetada.
- Placa cimentícia constituída por duas placas de composição à base mineral, cuja espessura é de 12,5 mm e um espaço de ar entre as duas de 40 mm

E como elementos de vedação interna:

- Parede de alvenaria constituída por uma camada de tijolos cerâmicos, com espessura de 100 mm e revestimento de argamassa de 25 mm nas duas faces;
- Parede em painel de gesso constituída de duas placas de gesso acartonado, com espessura de 12,5 mm, colocadas em paralelo e com uma camada de ar de 75 mm de espessura entre elas.

c) Elementos de vedação externa

Estes resultados estão apresentados nas Figuras 5.29 a 5.36. Neste caso, o objetivo é avaliar as possibilidades de redução das cargas térmicas de resfriamento dos ambientes, pela substituição dos materiais de vedação externa e interna da edificação. Assim, faz-se o cálculo das cargas térmicas de resfriamento para o dia típico de verão e inverno. Embora os resultados apresentem, para o período de inverno, temperaturas internas abaixo daquele limite estabelecido pela Norma, analisa-se somente o resfriamento do ambiente. Isto decorre do fato que uma percentagem bem maior de pessoas (33,8 %), na região de Belo Horizonte, sentem-se confortáveis em ambientes com temperaturas levemente abaixo do limite estabelecido.

No dia típico de inverno, verifica-se que a carga térmica apresenta um valor maior quando se tem a placa cimentícia na sala 02, cuja diferença entre as cargas térmicas, Figuras 5.33 e 5.34, é de aproximadamente 90 W. Já na sala 08, o painel isolite, como entorno da edificação, promove um valor de carga térmica mais elevado, Figuras 5.35 e 5.36, cujo valor é de aproximadamente 1018 W. Estes resultados são obtidos considerando tanto a alvenaria, quanto o painel de gesso como elementos internos. No verão, o material que promove uma carga térmica mais elevada é a alvenaria, para as duas salas em questão.

Nas Figuras representativas das cargas térmicas observa-se que o comportamento da placa cimentícia e da alvenaria, como elementos de vedação externa, não é uniforme, ou seja, varia de sala para sala, dependendo das condições de contorno. A carga máxima do sistema ocorre às 16 h, tanto no verão como no inverno, quando ocorre a mais elevada temperatura do ar externo.

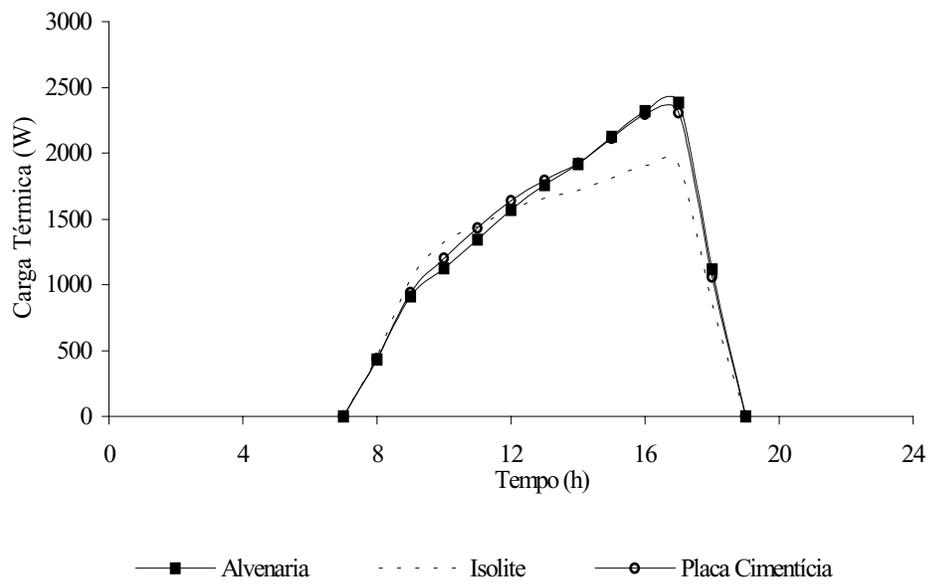


Figura 5.29 - Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão.
 .Vedação interna com alvenaria

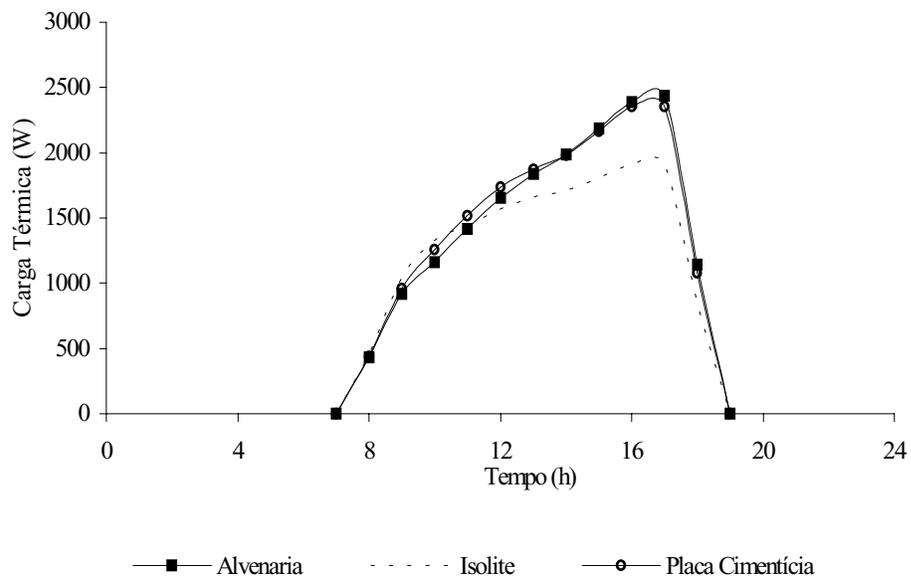


Figura 5.30 - Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão.
 Vedação interna com painel de gesso

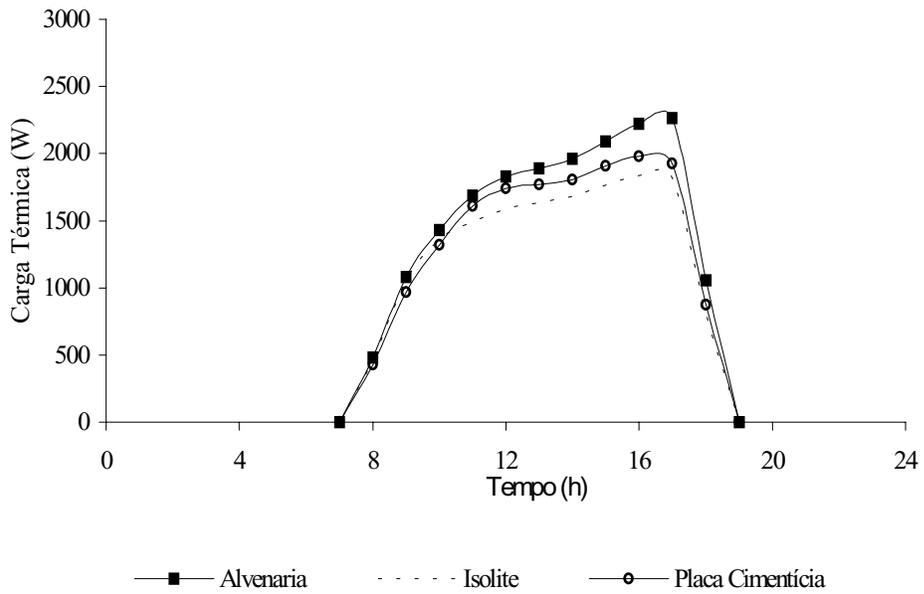


Figura 5.31 - Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão.
Vedação interna com alvenaria

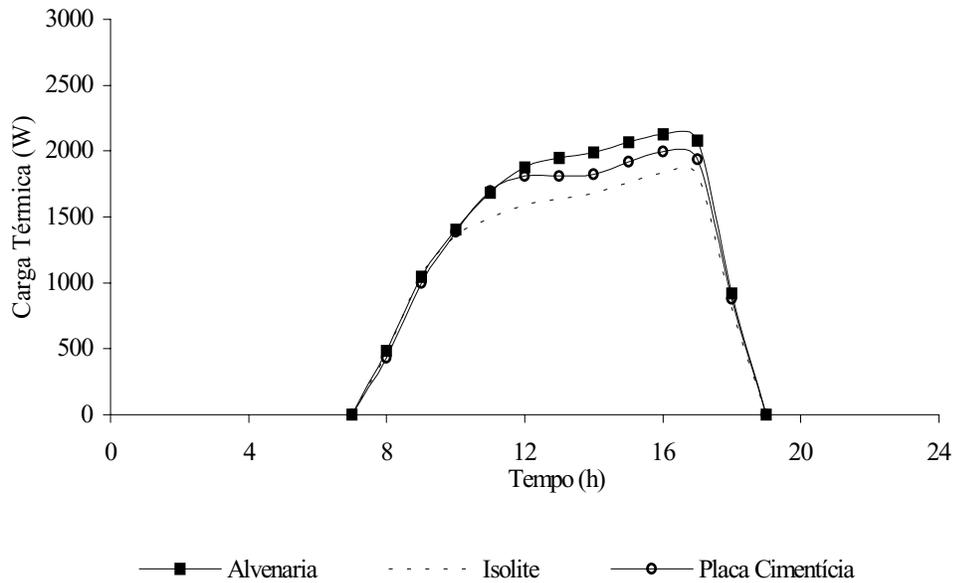


Figura 5.32 - Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão.
Vedação interna com painel de gesso

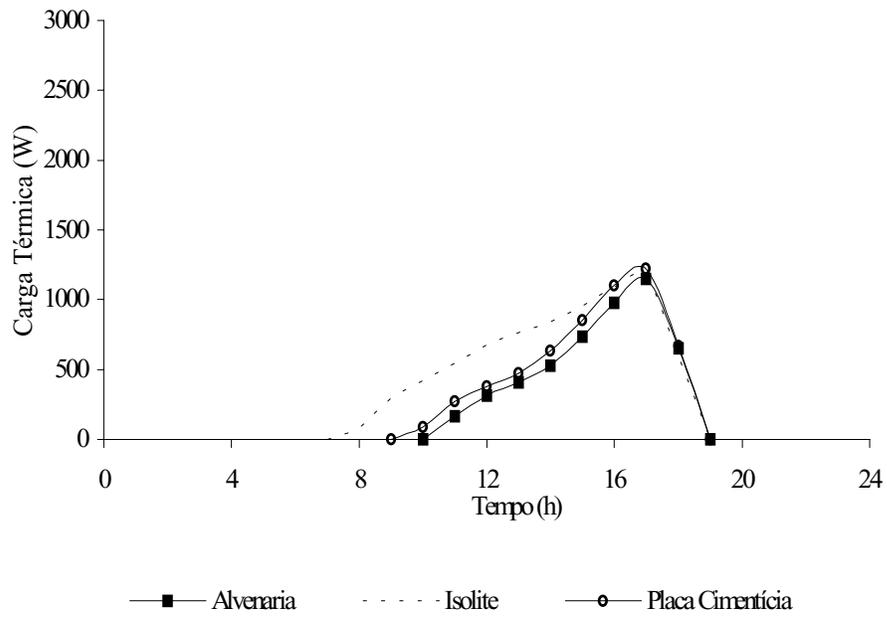


Figura 5.33 - Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de inverno. Vedação interna com alvenaria

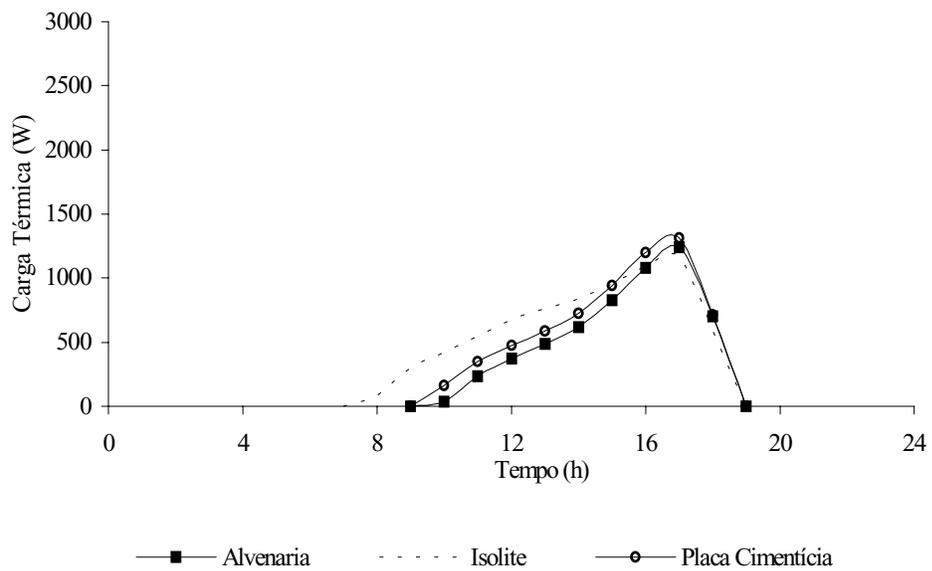


Figura 5.34 - Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de inverno. Vedação interna com painel de gesso

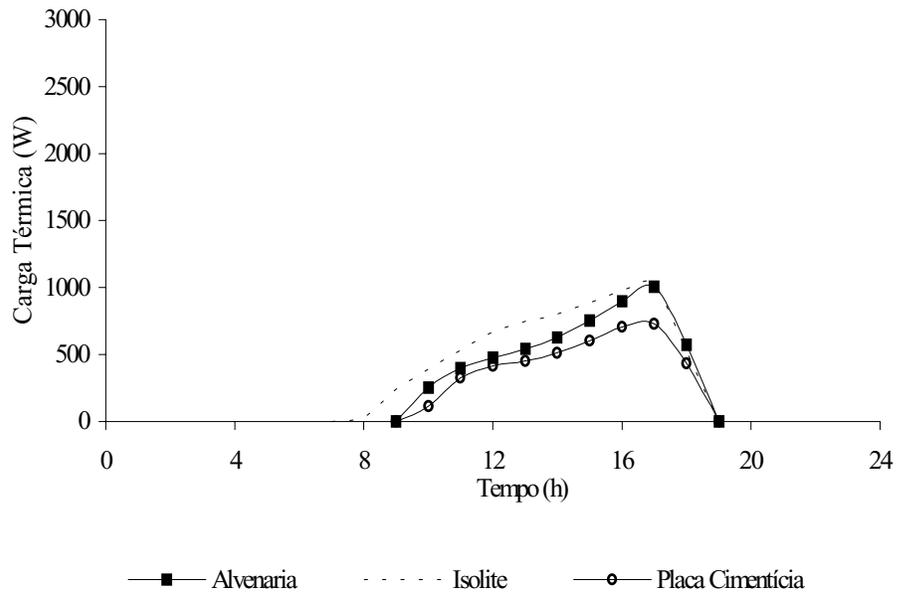


Figura 5.35 - Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de inverno. Vedação interna com alvenaria

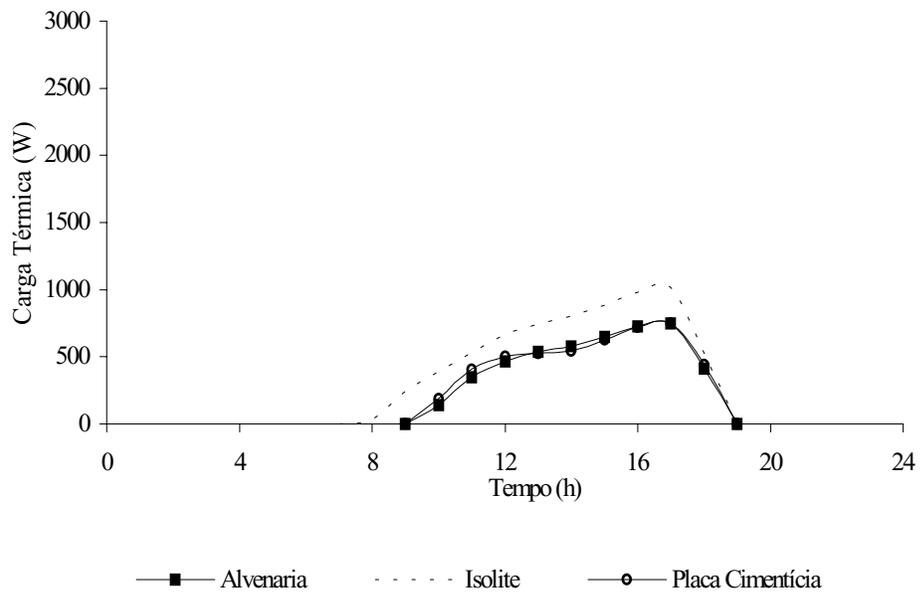


Figura 5.36 - Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de inverno. Vedação interna com painel de gesso

As Tabelas 5.4 a 5.7 mostram os resultados das cargas térmicas de pico das salas 02 e 08, considerando a temperatura de condicionamento do ambiente interno de 24 °C.

Tabela 5.4 – Cargas térmicas de pico, em Watts, da sala 02 no verão

Vedação Interna	Vedação Externa		
	Alvenaria	P. Cimentícia	P. Isolite
P. de Gesso	2436,9	2352,7	1909,8
Alvenaria	2383,8	2306,6	1909,8
Diferença	53,1	46,1	-

Tabela 5.5 – Cargas térmicas de pico, em Watts, da sala 08 no verão

Vedação Interna	Vedação Externa		
	Alvenaria	P. Cimentícia	P. Isolite
P. de Gesso	2080,5	1935,8	1819,3
Alvenaria	2263,9	1926,8	1819,3
Diferença	183,4	9,0	-

Tabela 5.6 – Cargas térmicas de pico, em Watts, da sala 02 no inverno

Vedação Interna	Vedação Externa		
	Alvenaria	P. Cimentícia	P. Isolite
P. de Gesso	1243,0	1312,7	1163,9
Alvenaria	1147,4	1223,9	1163,9
Diferença	95,6	88,8	-

Tabela 5.7 – Cargas térmicas de pico, em Watts, da sala 08 no inverno

Vedação Interna	Vedação Externa		
	Alvenaria	P. Cimentícia	P. Isolite
P. de Gesso	749,3	749,9	1017,8
Alvenaria	1004,4	730,7	1017,8
Diferença	255,1	19,2	-

Comparando-se os resultados das Tabelas 5.4 a 5.7, obtidos para a carga térmica externa com as diversas alternativas de elementos para a envoltória e divisórias internas tem-se do ponto de vista de consumo de energia que:

- a) Na sala 02, nas condições de verão, observa-se que houve um acréscimo dos valores de pico da cargas térmicas em torno de 2,1 %, comparando-se os valores obtidos quando se tem painel de gesso e alvenaria como elementos de vedação interna e alvenaria e placa cimentícia como vedação externa. No inverno, esta taxa aumenta para 7,2 %;
- b) Na sala 08, no verão, observa-se que houve um acréscimo dos valores de pico quando se tem a alvenaria, como elemento de vedação externa de 8 % e com a placa cimentícia é de aproximadamente 1 %. No inverno, a taxa fica em torno de 25 %, quando se tem a alvenaria e 3 % para a placa cimentícia.
- c) O painel isolite não apresenta alteração na carga térmica de pico constante quando se varia os elementos de vedação interna.

Nas condições estudadas os ambientes não apresentaram condições satisfatórias de conforto durante todo o período de ocupação. O percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) é mostrado nas Figuras 5.37 a 5.40, para as salas 02 e 08, nas condições mais críticas. Na avaliação de percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) e do voto médio estimado (PMV), no período de inverno, considera-se a alvenaria como elemento de vedação interna e o painel isolite como elemento de vedação externa. Para a avaliação da porcentagem de pessoas insatisfeitas e do voto médio estimado, no período de verão, a alvenaria é o elemento de vedação interna e externa.

Segundo as Normas ISO 7730 (1994) e ASHRAE (1993) um ambiente é considerado termicamente confortável quando a percentagem de insatisfeitos (PPD) é de até 20 %, que corresponde ao voto médio estimado (PMV) na faixa de $-0,85$ a $+0,85$. Para as condições brasileiras pode-se admitir um percentual um pouco mais elevado.

A partir das Figuras 5.37 a 5.40 percebe-se que em alguns casos não se atingiu as condições de conforto ideais com o condicionamento do ar a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se que durante o inverno, o percentual de insatisfeitos é totalmente aceitável, para a temperatura de condicionamento igual a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

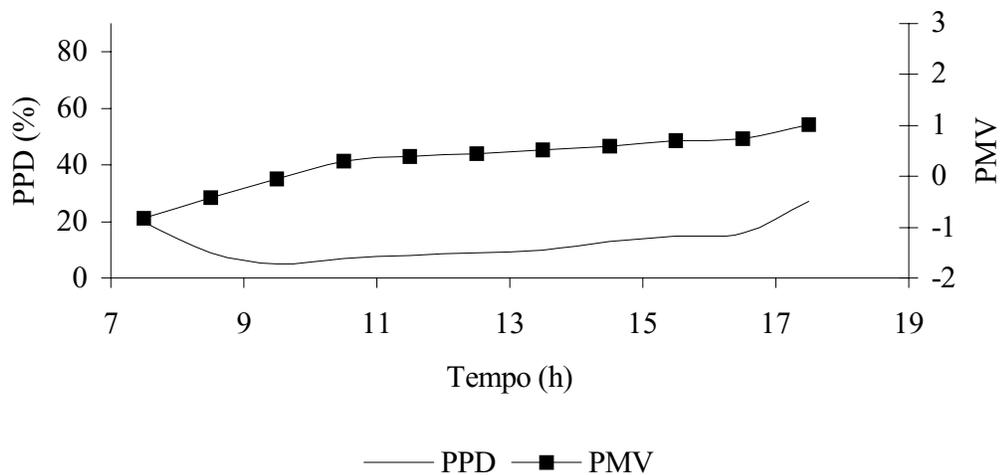


Figura 5.37 - PPD e PMV da sala 02 no dia típico de inverno.

Já durante o verão os resultados apresentados nas Figuras 5.39 e 5.40 mostram a necessidade de condicionamento do ambiente numa temperatura inferior à $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, em função de um elevado percentual de pessoas insatisfeitas no período de 15,5 as 17,5 h.

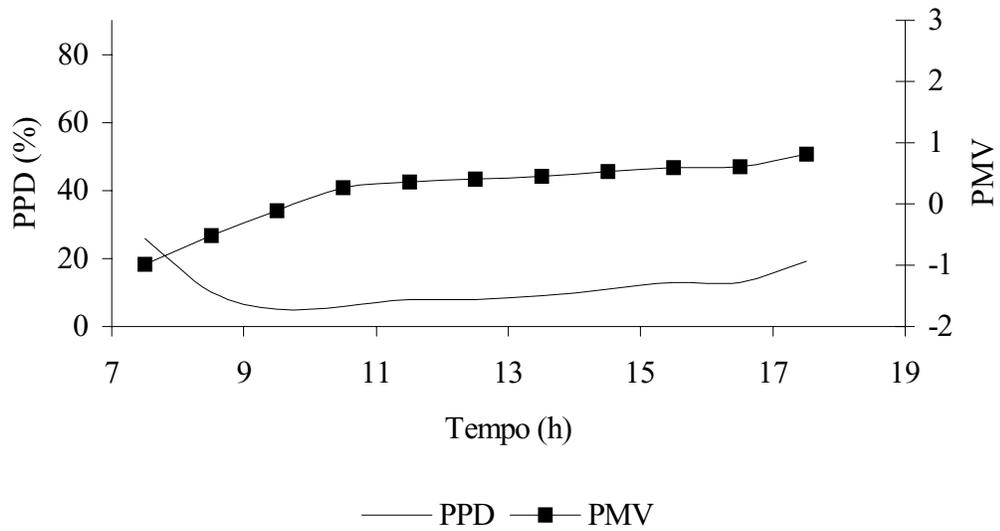


Figura 5.38 - PPD e PMV da sala 08 no dia típico de inverno.

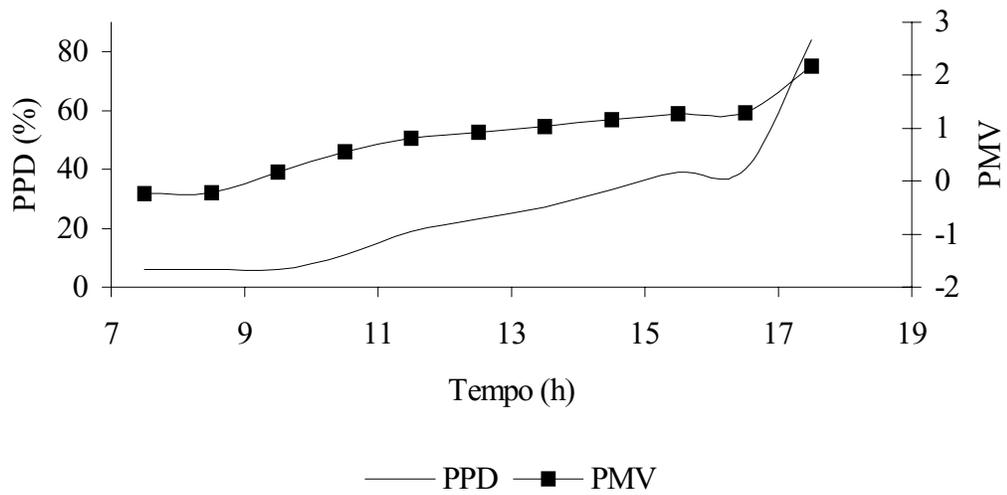


Figura 5.39 - PPD e PMV da sala 02 no dia típico de verão.

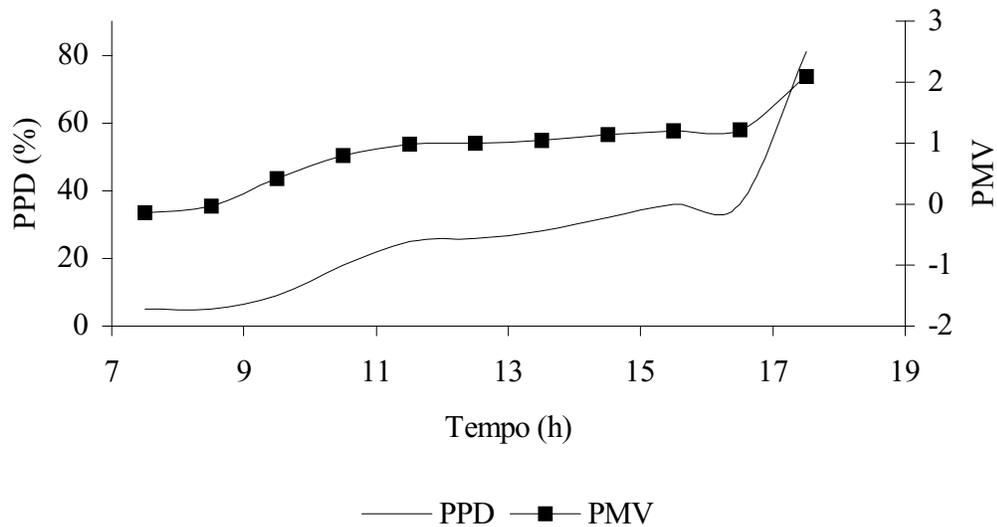


Figura 5.40 - PPD e PMV da sala 08 no dia típico de verão.

Uma outra análise foi feita para as mesmas condições anteriores, considerando a temperatura interior do ar a 22 °C. Na análise considera-se a alvenaria (15 cm) como elemento de vedação interna e alvenaria, painel isolite e placa cimentícia como elementos externos. Neste caso só é mostrado a resposta da carga térmica para a alvenaria devido à proximidade da resposta da carga térmica com o painel de gesso, como elemento interno, Figuras 5.41 e 5.42.

Os elementos de vedação apresentaram um desempenho térmico semelhante para a edificação analisada. Do ponto de vista térmico as diferenças entre eles, em relação às trocas térmicas dos ambientes externo e interno, são muito pequenas. A escolha de um destes painéis dependeria de fatores como o custo e a facilidade construtiva entre outros.

Na edificação analisada (com sua localização e tipo de ocupação) os resultados mostraram que há a necessidade de um condicionamento mecânico durante o período de verão, principalmente no horário da tarde. Se as condições favoráveis de ventilação natural ocorrerem (acima de 30 ren/h) este condicionamento mecânico pode ser reduzido e até mesmo eliminado.

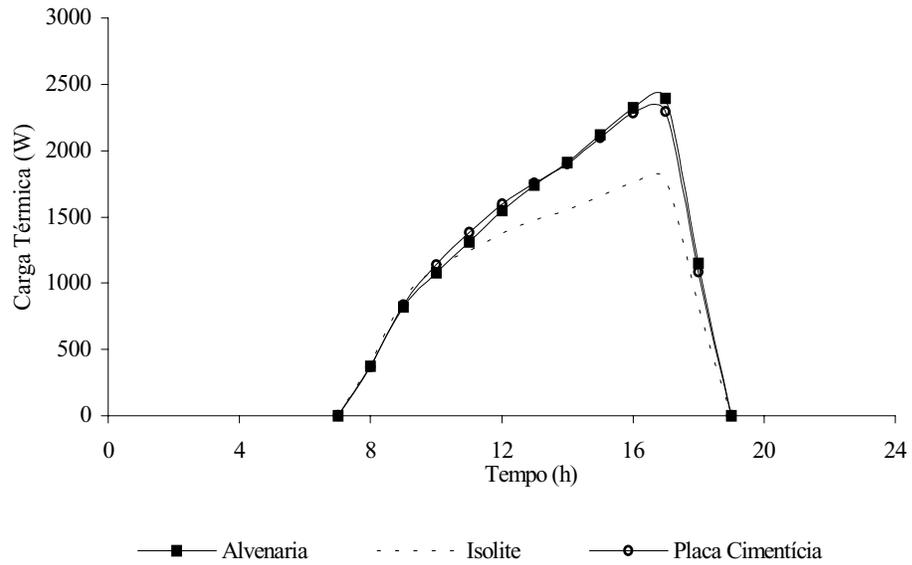


Figura 5.41 - Carga térmica interior da sala 02 no dia típico de verão.
Vedação interna com alvenaria

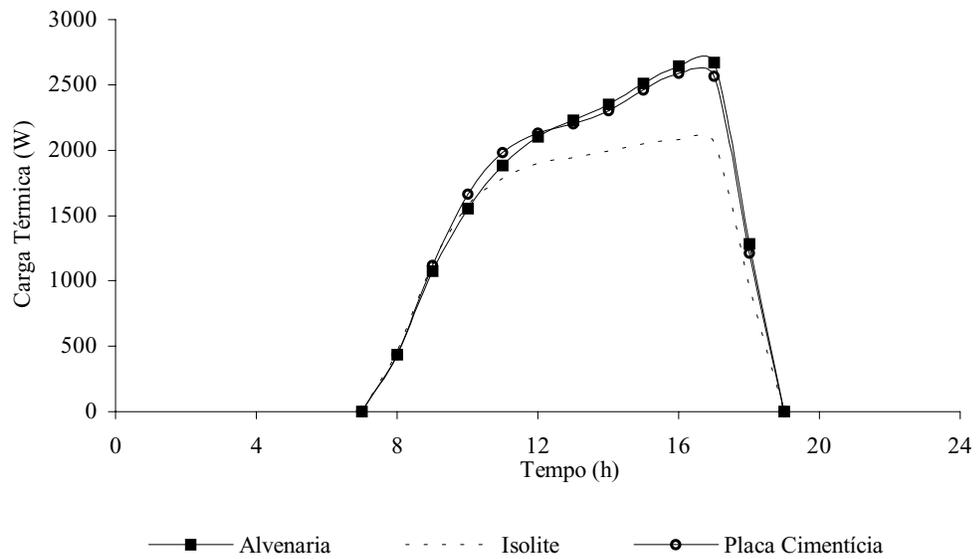


Figura 5.42 - Carga térmica interior da sala 08 no dia típico de verão.
Vedação interna com alvenaria

Para a avaliação da porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) e do voto médio estimado (PMV), no período de verão, a alvenaria é o elemento de vedação interna e externa. O percentual de pessoas insatisfeitas e o voto médio estimado, com esta nova condição de resfriamento do ambiente (temperatura do ar à 22 °C), são mostrados nas Figuras 5.43 e 5.44. A partir desses resultados, observa-se que o máximo percentual de pessoas insatisfeitas nas salas ocorre no período de início de controle. Ao longo do dia, o percentual de insatisfeitos se reduz, ficando dentro do limite estabelecido pela Norma.

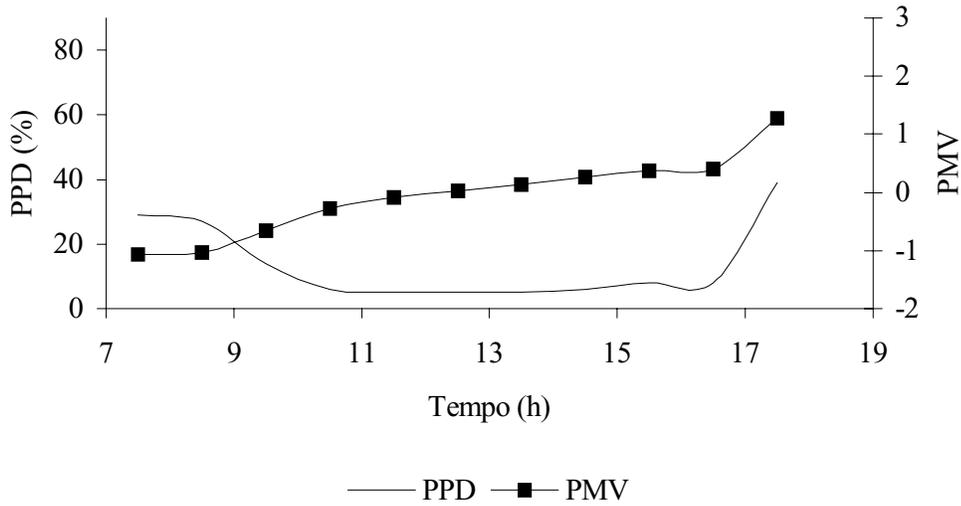


Figura 5.43 - PPD e PMV da sala 02 no dia típico de verão.

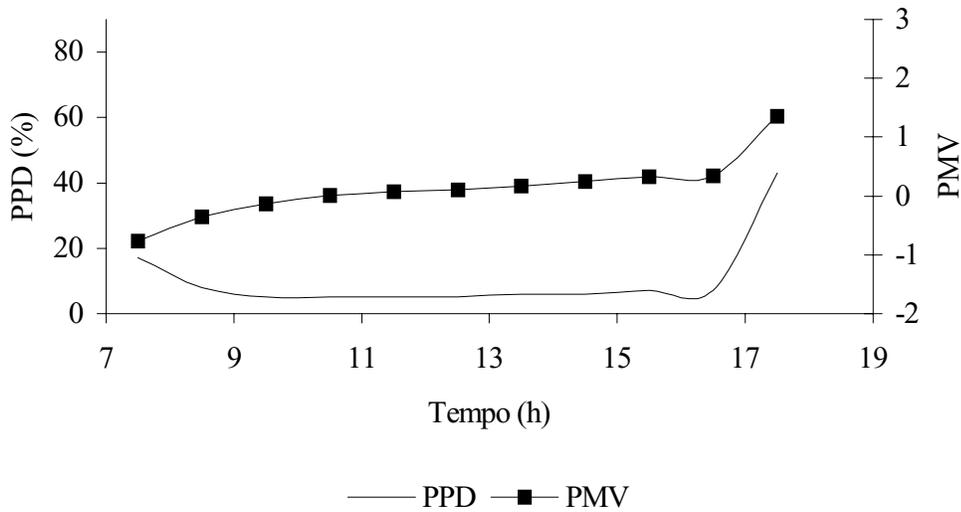


Figura 5.44 - PPD e PMV da sala 08 no dia típico de verão.

No entanto, para o período de inverno, uma temperatura de condicionamento de 22 °C provocaria uma percentagem de insatisfeitos alta no período da manhã, em função de uma maior sensação de frio, Figura 5.45.

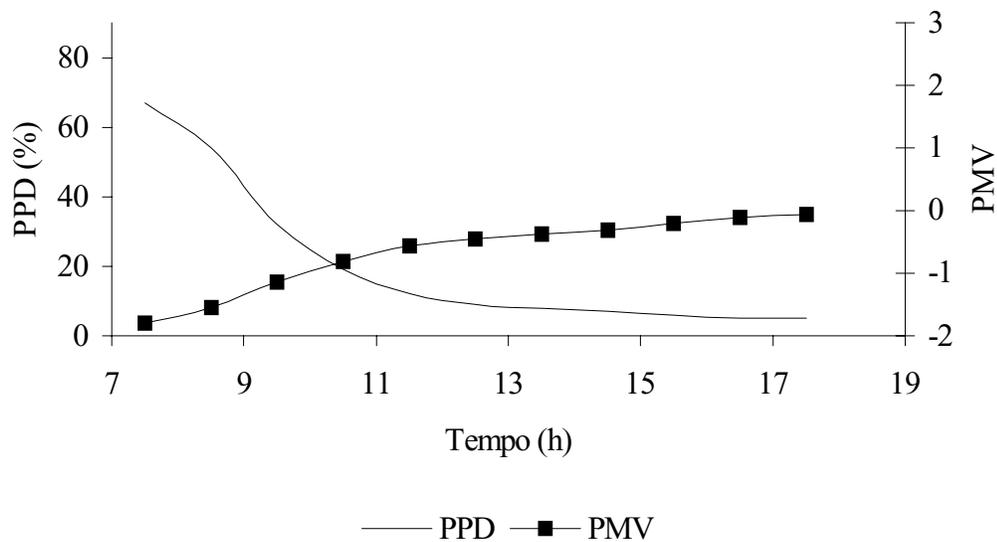


Figura 5.45 - PPD e PMV da sala 02 no dia típico de inverno.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta o desempenho térmico dos elementos de vedação utilizados em edificações em estrutura metálica. Além dos elementos de vedação já compondo a edificação estudada, outros elementos também disponíveis no mercado foram avaliados. O estudo é feito para uma edificação comercial em estrutura metálica da região de Belo Horizonte. As respostas de cada elemento de vedação em relação às trocas térmicas entre os ambientes externo e interno encontram-se com mais detalhes no capítulo de resultados. Através dos resultados obtidos observa-se que do ponto de vista térmico não há uma diferença acentuada entre o desempenho dos elementos de vedação externa e interna utilizados e os elementos alternativos estudados. A escolha entre qualquer um destes materiais vai depender além da eficiência térmica do mesmo quanto ao isolamento térmico, do custo, da facilidade construtiva, da estética, etc..

Os painéis de vedação para edificações em estrutura metálica constituem uma mudança e atualização da construção do país. Estes novos elementos de vedação são importantes no processo de industrialização da construção brasileira, além de traduzirem uma maior racionalização do processo construtivo, minimização do desperdício nos canteiros de obras, entre outros. Como muito deles resultaram de tecnologias importadas ou simplesmente foram adaptadas é imperativo uma análise do desempenho térmico dos mesmos nas condições climáticas brasileiras.

O estudo realizado neste trabalho, através de uma simulação computacional, leva em consideração a resposta global do ambiente construído e não somente o comportamento térmico das componentes (elementos de vedação externa e interna). Desta forma é investigado a influência dos elementos de vedação e também das posições e dimensões das aberturas existentes, da posição geográfica da edificação (radiação solar, direção e velocidade do vento), do tipo de ocupação da edificação e das fontes internas de calor (ocupantes e equipamentos) sobre o ambiente interno.

Procura-se também neste capítulo, focalizar as necessidades futuras associadas à avaliação da eficiência dos elementos de vedação, utilizadas em edificações em estrutura metálica, quanto à sua capacidade de isolamento térmico ou não. No seguimento deste trabalho, ou seja, na avaliação do desempenho térmico de uma

edificação, percebe-se a necessidade da continuidade do ataque ao problema, tanto na simulação computacional quanto na parte experimental. Como a questão de um ambiente ser confortável ou não, depende de outros fatores tais como a presença ou não de ruído, boa iluminação, além da temperatura e umidade do ambiente, a escolha de um tipo de vedação e divisória deve levar em conta um maior número de fatores relevantes, simultaneamente.

A princípio nenhum material pode ser eliminado, pois a condição de se obter um ambiente confortável termicamente vai depender do tipo de ocupação a que se destinará a edificação, além dos fatores citados anteriormente. É imperativo que ao analisar o desempenho térmico de um dado elemento de vedação em uma edificação a condição de ruído e de iluminação seja também avaliada. A minimização do consumo de energia no condicionamento de ambientes construídos vai depender de um projeto adequado para funções que a edificação exercerá. Este êxito está associado à uma boa seleção dos materiais componentes e a um bom projeto arquitetônico. Isto só será possível se houver uma interação entre arquitetos e engenheiros na fase de pré-projeto. Nesta etapa a análise computacional vai permitir que arquitetos e engenheiros busquem as alternativas mais econômicas na construção de um ambiente construtivo confortável.

Uma sugestão de trabalho é com o cálculo das cargas térmicas de resfriamento do ambiente interno. No cálculo destas cargas, fazer um controle da umidade relativa do ambiente interno, juntamente com a temperatura do ar interno insuflada controlada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akutsu, M., (1983).Aplicação do método dos fatores de resposta para a determinação da resposta térmica de edificações. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.
- Akutsu, M., (1998). Método para a avaliação do desempenho térmico de edificações no brasil, tese de doutoramento, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Appleby, P., (1990), Assuring indoor air quality, heating and air conditioning journal, , abril, v. 60, n°.694, p. 27-29.
- ASHRAE, (1993). Handbook of fundamentals., ASHRAE, New York.
- Balaras, C. A., (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An onverview of computational methods, Energy and Buildings v. 24, p.1-10.
- Barbosa, T. V., (1992). Arquitetura climática em zona tropical: edifícios de escritórios, tese de mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Birdsall, B. E. et al., (1994). DOE-2 basics, Lawrence Berkeley Laboratory, Califórnia, EUA.
- Carvalho Filho, C. de O., Negrão, C. O. R., Melo, C., (1997). Análise das condições climáticas de recintos ocupados, IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – VI ENCAC, p. 240-245, Salvador - Brasil.
- Clarke, J., (1985). Energy simulation in building design, Adam Hilger Ltd, Bristol, U. K., p. 387.

- Clarke, J. et al., (1993). ESP-r a program for building energy simulation, version 9 Series, ESRU Manual U93/1, Glasgow, Scotland.
- Codeme (1998): Catálogo de produtos.
- Cox, J. E., Miro, C. R., (1991). Nasa releases atmospheric assessment, Ashrae Journal, Atlanta, EUA, v. 33, p. 16.
- Diniz, João (1996). Projeto arquitetônico: site www.joaodiniz.com.br.
- Eidinger, M., (1999). Painéis de fechamento de gesso acartonado. Knauf Do Brasil. II Seminário Internacional da Construção Metálica, Belo Horizonte (anais em CD-ROM).
- Engestrom, M. F., (1999). Steel construction in the United States of America. II Seminário Internacional da Construção Metálica, Belo Horizonte (anais em CD-ROM).
- Fanger, P. O., (1972). Analysis and applications in environmental engineering, thermal comfort, McGraw – Hill Book Company.
- Gan, Guohui, (1995). Numerical Investigation of local thermal Discomfort in Offices with Displacement Ventilation, Energy and Buildings v. 23, p. 73-81.
- Gonçalves, W. de B., (2000). Adaptabilidade de índices de conforto térmico para Belo Horizonte, com base em pesquisa de população universitária, tese de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

- Hernandez, A. et al. (1999a). Análise comparativa de cálculos de carga térmica, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP.
- Hernandez, A. et al. (1993). Análise de métodos de cálculo de carga térmica através de paredes e tetos, Dissertação de mestrado, EPUSP, SP.
- Hernandez, A. et al. (1999b). The effects of indoor conditions on the reduction of energy consumption in commercial buildings in Rio de Janeiro. Sixth International IBPSA Conference (Building Simulation'99), Kyoto, vol. II, p. 723 – 728.
- Inaba, R., (1999). Estruturas Metálicas – O futuro mora aqui, II seminário internacional da construção metálica, Belo Horizonte (anais em CD-ROM).
- INFRAERO, (1999). Site www.infraero.gov.br.
- INMET, (1999). Site www.inmet.gov.br.
- ISO, International Organization for Standardization. Standard 7730, (1994). Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genebre: International Standardization Organization, p. 40.
- ISO, International Organization for Standardization. Standard 7726, (1985). Thermal environments – Instruments and methods for measuring physical quantities, Genebra, Iso, p.
- Janot Pacheco, G. M., (1999). Perspectiva da construção metálica no Brasil, Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCCEM). II Seminário Internacional da Construção Metálica, Belo Horizonte (anais em CD-ROM).

- Kelly, S. W., (1990). Global phase-out of fully halogenated chlorofluorocarbons under the terms of the montreal protocol – potential replacements and their currents status, Proc. ASHRAE – FRIGAIR’99, p.15, CSIR, Pretoria, RSA.
- Knauf (1999): Catálogo de produtos.
- Kusuda, T., (1976). NBSLD, The computer program for heating and cooling loads in buildings. Washington, DC, National Bureau of Standards, (Building Science Series 69).
- Lafarge (1999): Catálogo de produtos.
- McArdle, W. D. et al, (1985). Fisiologia do exercício – energia, nutrição e desempenho humano. Trad. Giuseppe Taranto. Rio de Janeiro, Guanabara-Koogan.
- Michalka Jr., C., (2000). Ambiente construído a busca pela integração total. VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC 2000 (anais em CD-ROM).
- Monteiro, R. C., (1999). Sistemas estruturais em aço com steel deck. Metform S/A. II Seminário internacional da construção metálica, Belo Horizonte (anais em CD-ROM).
- NBR 6401 (1978). Instalações centrais de ar condicionado para conforto – parâmetros básicos de projeto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 18, Rio de Janeiro.
- Negrão, C. O. R., (1995). Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation, Phd thesis, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit, Energy Systems Division, University of Strathclyde, Glasgow, UK.

- Negrão, C.O.R., (1996). Simulação térmica de edificações e equipamentos de climatização: O Potencial de modelação do programa ESP-r, VII Congresso Brasileiro de Energia CBE, vol. IV, p. 2230-2243, Rio de Janeiro.
- Perdesen, C. O. et al., (1993). BLAST 1.0 – Building load analysis and system thermodynamics, University of Illinois, Champaign, Urbana, EUA.
- PROCEL, (1998). Manual de conservação de energia elétrica em edifícios comerciais e públicos. Eletrobrás.
- Ribeiro, J. P. C., (1999). Atlas geográfico Minas Gerais e Belo Horizonte. Belo Horizonte, Gráfica e Editora 101.
- Rousseau, P.G., Mathews, E. H., Grobler, L. J., (1993), Integrated thermal simulation of buildings and regenerative evaporative coolers, Building and Environment, v. 29, n° 1.
- Souza, C. G., Grimme, F. W. E Laar, M., (2000). Avaliação do consumo de energia da edificação em função dos materiais de fachada – Estudo de caso no Rio de Janeiro. VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC 2000. (anais em CD-ROM).
- Souza, U. E. L., Paliari, J. C., Agopyan, V. O., (1999). Custo do desperdício de materiais nos canteiros de obras. Qualidade na construção, SindusCon-SP, n°. 21, p.64-66.
- Stoecher, W. F., Jones, J. W., (1985). Refrigeração e ar condicionado, Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, p. 481.

- Toledo, Eustáquio, (1999). Ventilação Natural das Habitações. Maceió, EDUFAL, p. 170.
- Tribess, A., et. al., (1997). Aspectos de conservação de energia em ambientes condicionados, Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Salvador, p. 413-417 – Bahia.
- Vittorino, F., (1994). Estudo teórico-experimental de método de cálculo para a determinação de cargas térmicas, da temperatura e da umidade do ar de ambientes condicionados. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.
- Yamane, E., Saito, H., (1986). Tecnologia de condicionamento de ar, Edgard Blücher Ltda, São Paulo, p. 360.

APÊNDICE I

Programa ESP-r

I.1 - História do desenvolvimento do programa de simulação ESP-r

O ESP-r é um código de simulação térmica e dinâmica para análise de energia e fluxos de massa para um controle ambiental dentro de sistemas de ambiente construído.

O sistema ESP-r evoluiu em um período de 18 anos. Entre 1974 a 1977, o pesquisador Joe Clarke, da Universidade de Strathclyde, na Escócia, desenvolveu o protótipo inicial como parte da pesquisa, em sua tese de doutorado (Clarke, 1983). No período de 1977 a 1980, com a fundação da UK Science and Engineering Reserach Council (SERC), o ESP-r foi refinado nas seguintes formas: o sistema foi reorganizado e documentado, houve a comprovação da validade das soluções dadas pelo programa, o processo multizonal foi implementado e processado e foi estabelecida a interface gráfica para facilitar a utilização do usuário. Em 1981 o Professor Clarke associou-se com o Dr. Don McLeany , promovendo a consolidação do SERC e SEC. A capacidade do programa ESP-r foi ampliada com a adição da simulação dinâmica da planta de condicionadores de ar, e com a inclusão do modelo de fluxo de ar, removendo, a um pequeno custo, o sistema da estação de trabalho Unix e instalando um sistema mais rápido.

Em 1987, a Energy Simulation Research Unit (ESRU) foi formada para endereçar os problemas encontrados para a evolução do programa de simulação ambiental e de energia em edifícios.

O ESP-r continua a ser implementado para apoiar as necessidades de alguns pesquisadores, organizações educacionais e comerciais em sua aplicação. Durante esses 18 anos, muitos pesquisadores fizeram valiosas contribuições para o desenvolvimento do programa ESP-r, sendo que os mais importantes vieram de pesquisadores da Universidade de Strathclyde, na Escócia, pois contribuíram nos métodos computacionais e apoio técnico.

A simulação com o programa ESP-r, permite:

- a) a utilização de modelos mais sofisticados, pois o nível de detalhes da simulação pode ser aumentado de acordo com o nível de informações disponíveis e as necessidades do usuário. Caso ocorra erros na entrada de dados, tais como as propriedades físicas dos materiais, a temperatura externa e a velocidade e a direção do vento podem levar à resultados bastante inconsistentes;
- b) a simulação com diferentes números de zonas, onde são calculadas as temperaturas no interior e superfície das paredes;
- c) os fluxos de calor de natureza convectiva, radiativa e condutiva, através das paredes;
- d) parâmetros de conforto térmico baseados na teoria de Fanger, tais como a porcentagem de pessoas insatisfeitas e voto médio estimado;
- e) cálculo da carga térmica dinâmica, baseados no valor de uma temperatura desejada;
- f) simular de forma integrada serpentinas de resfriamento, tubulações de ar e etc. com a edificação.

I.2 - Estrutura do Programa ESP-r

A estrutura do programa pode ser subdividida em dois domínios: o do usuário e o de técnico. Sob o domínio do usuário, existem três módulos que são essenciais: o gerenciador de projetos (*prj*), o simulador (*bps*) e o analisador de resultados (*res*).

Através do gerenciador de projetos (*prj*), na parte de composições de zonas, o analisador pode definir a configuração do edifício estudado, tais como a área de piso, o nível do piso, o pé direito da edificação, a área constituída de vidros das fachadas e os materiais constituintes da edificação. Nesta parte também se define os ganhos de calor devido ao número de ocupantes, perfil dos equipamentos e o nível de iluminação, bem como o período de ocupação, a utilização destes equipamentos e das lâmpadas acesas. Outros dados relevantes como a taxa de ventilação forçada e natural são acrescentados nesta parte do programa. Com estes arquivos gerados, é necessário fazer o controle das zonas estudadas. É aí que se controla a velocidade da ventilação do condicionador de ar,

durante o período desejado. Quando a edificação é constituída de várias zonas, pode-se fazer um tipo de controle diferente para cada uma.

O *bps* é a parte do programa onde se faz a simulação do edifício que prevê o fluxo do fluido e energia por um rigoroso método numérico. A malha do edifício/planta é dividida em um grande número de volumes finitos. Para cada espaço/tempo como procedimento de simulação, o balanço de energia e massa é aplicado para todos os volumes, surgindo uma matriz diferencial para o sistema completo.

O *res* é o módulo de análise dos resultados que opera com a simulação dos resultados locais pelo banco de dados de entrada. As várias opções de dados de saída são avaliadas: visualizações em perspectivas, questionamentos dos resultados, análise estatística, exibição gráfica, tabelas, frequência binária e visualização em três dimensões.

Sob o domínio técnico, o programa é visto como uma estrutura modular. A estrutura do programa pode ser relacionada entre o programa e os módulos de dados de entrada que contém o pacote do mesmo.

Através do gerenciador de projetos (*prj*), o analisador poderá definir a configuração do edifício estudado, observando a influência do clima e o tempo de simulação. Todos os dados são checados para se fazer o cálculo. Existem modelos de entrada de materiais de construção, componentes de equipamentos, propriedades ópticas, perfis de eventos, tais como ocupação, iluminação, equipamentos, coeficientes de pressão e de variáveis climáticas.

O *prj* também controla outros componentes do programa ESP-r tais como o *bps* para a simulação e o *res* para análise dos resultados. Os eventos de contorno do programa gerenciador de entrada (*pro*) contém um número de modelos ou projetos específicos quando define o tempo dependente das variações das zonas de ocupação, iluminação, controle da planta.

O *pdb* é um gerenciador de programa de dados de entrada dos componentes do projeto. Para cada componente da planta de um sistema de climatização, uma descrição sumária é feita de acordo com os dados requeridos pelo *bps* para o tempo. Isto é, dependente da geração dos coeficientes das equações diferenciais que representa os componentes de calor e balanço de massa. Os componentes de dados são arquivados temporariamente na forma matricial formando um sistema matricial completo do

edifício. Os dados de entrada são acessados através do *prj* para a captação da malha de projetos pelo componente de interconecção.

O *win* é um programa para executar a análise espectral com alguns sistemas de janelas, com vários tipos de vidros, camadas de ar e filme protetor. O ângulo de incidência depende integralmente da transmitância espectral, absortância e reflectância, que podem ser transferidos para os dados de entrada .

O *clm* são os dados climáticos de entrada do gerenciador e análise do programa. O conjunto *climate* abrange o estudo por um período de um dia ou um ano e contém valores horários de temperatura de bulbo seco, direção normal ou intensidade horizontal solar total, intensidade horizontal difusa solar, velocidade do vento, direção do vento e umidade relativa. O *clm* oferece a previsão da radiação solar, curva fictícia para dados máximos e mínimos diariamente, análise estatística, gráfica e de tabelas, e dados gerais do gerenciador.

O *ish* é um módulo utilitário do tempo e espaço que prevê o sombreamento das zonas do lado externo (opaco e transparente) causado pela fachada e/ou obstruções locais da insolação em função do tempo e espaço, da superfície das zonas internas (opaca e transparente) provocada pela radiação solar através das janelas. A previsão para qualquer superfície, opcionalmente, são arquivadas em bancos de dados de insolação/sombreamento que serve para uso e acesso na simulação.

O *mrt* computa fatores de visão do corpo negro situado entre cada zona de superfície, unindo-os para uso através do *bps* para a avaliação das trocas de radiação interna de onda longa. Isto também é válido para variações ao nível das zonas de conforto.

A simulação do edifício/planta pode ser representado pelo *bps* através do cálculo do balanço de energia. O primeiro banco de dados contém as propriedades térmicas (condutividade térmica, densidade, calor específico, absortividade solar e emissividade) para elementos homogêneos. Um segundo relatório de projeto de bancos de dados podem ser criados para formar muitas camadas de elementos extraídos do primeiro banco. Cada banco de dados pode ser acessado pelo *prj* como requerido.

A utilização do módulo *dbm* permite a transformação de arquivos binários do ESP-r para o formato ASCII e vice-versa.

De modo geral, os módulos mais usados para a investigação da performance do edifício/planta são *prj*, *bps* e *res*. Os módulos de bancos de dados (*con*, *pro*, *pdb*, *win* e *clm*) ajudam na execução dos dados de entrada e os módulos *ish*, *mrt* e *mfs* servem para permitir o tratamento e execução dos dados de forma bastante refinada (Clarke, 1993). Assim, os especialistas de um determinado assunto podem se envolver somente com o módulo de seus interesses, sendo que não há a necessidade de conhecer todo o sistema.