

CAPÍTULO 3 – TÉRMICA DOS EDIFÍCIOS

3.1. CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico é reconhecido como não sendo um conceito exacto, que não implica uma temperatura exacta. O conforto térmico depende de factores quantificáveis – temperatura do ar, velocidade do ar, humidade, etc. e de factores não quantificáveis – estado mental, hábitos, educação, etc. Assim, as preferências de conforto das pessoas variam bastante consoante a sua aclimatização particular ao ambiente local (Khedari *et al*, 2000).

Com o intuito de obter um ambiente interior dos edifícios termicamente confortável para os seus ocupantes, as normas sobre conforto térmico são uma ferramenta essencial. Inicialmente estas normas tinham como principal preocupação definir as condições de conforto térmico, sem ter em conta os consumos energéticos necessários para atingir o conforto. Mas devido aos problemas ambientais que são cada vez mais evidentes e à necessidade do



desenvolvimento sustentável, estas normas de conforto térmico têm de considerar formas de o atingir com o menor consumo energético possível (Nicol e Humphreys, 2002).

Por outro lado, o aumento da utilização de equipamentos para arrefecimento do espaço na Europa é preocupante, em termos ambientais, devido ao grande aumento do consumo energético, contribuindo para o excesso das emissões de CO₂ e o conseqüente aquecimento global. Assim, até a energia vir de fontes renováveis, a climatização de espaços deverá ser reservada para as necessidades especiais de climas extremos, e não para melhorar os efeitos de um fraco design climático dos edifícios. A solução é um bom design climático, utilizando dados realísticos de conforto térmico (Humphreys e Nicol, 2002).

3.1.1. MECANISMOS DE REGULAÇÃO TÉRMICA DO CORPO HUMANO

O balanço térmico no corpo humano é função da energia produzida no interior do corpo e das perdas térmicas para o exterior. A energia produzida no interior do corpo é chamada de **Actividade Metabólica** e depende do tipo de actividade efectuada (Tabela 3.1). A unidade utilizada para caracterizar a actividade metabólica é o *met*, que corresponde ao calor libertado por uma pessoa em descanso – 100 W. Considerando que, em média, as pessoas têm uma superfície de pele de 1.8 m², 1 met corresponde a 58.2 W/m² (Dias de Castro, 2000).

Tabela 3.1 – Actividade metabólica correspondente a várias acções

ACTIVIDADE	Met
Dormir	0.7
Sentado	1
Andar (1.2 m/s)	2.6
Escrever	1.1
Conduzir	1.2
Cozinhar	1.6 a 2
Dançar	2.4 a 4.4
Desportos	3.6 a 8.6

Fonte: ASHRAE 1997

O corpo humano possui mecanismos para controlar estas trocas de calor: o **hipotálamo** é o centro de controlo que, a partir da temperatura interior, regula o caudal sanguíneo e a intensidade da transpiração, de forma a igualar a energia produzida no interior do corpo e as perdas térmicas para o exterior. Mas este mecanismo apenas funciona para um dado limite de condições exteriores, ou seja, se uma pessoa estiver exposta a temperatura muito baixas ou muito altas, por um grande período de tempo, estes mecanismos não possuem capacidade de resposta (ASHRAE, 1997).

Um factor muito importante para o conforto térmico é a roupa utilizada por cada pessoa. A unidade utilizada para caracterizar o efeito de isolamento proporcionado pela roupa, no conforto térmico, é o clo. Assim, 1 clo é o equivalente a $0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$. A Tabela 3.2 apresenta o valor de clo para algumas combinações de vestuário (Krieder e Rabl, 1994).

Tabela 3.2 – Isolamento típico de algumas combinações de vestuário

Vestuário	clo
Calções, camisa de manga curta	0.36
Calças, camisa de manga curta	0.57
Calças, camisa de manga comprida	0.61
Igual ao anterior mais casaco	0.96
Calças, camisa de manga comprida, T-Shirt, camisola	1.01
Igual ao anterior mais casaco	1.3
Saia até ao tornozelo, camisa de manga curta, meias, sandálias	0.54
Igual ao anterior mais casaco	1.1

Fonte: McCullough and Jones, 1984

Se a temperatura interior de um ser humano for inferior a $28 \text{ }^\circ\text{C}$, este pode ter sérios problemas cardíacos e de arritmia; acima de $46 \text{ }^\circ\text{C}$, pode ter danos cerebrais irreversíveis. Assim, é imperativo um bom controlo térmico. O objectivo é proporcionar condições exteriores tais, que seja reduzida ao mínimo a necessidade do corpo utilizar os seus mecanismos de regulação térmica – **Conforto Térmico** (ASHRAE, 1997).

3.1.2. BALANÇO ENERGÉTICO

A taxa de produção de energia do corpo humano (Actividade metabólica) é a soma das taxas de produção de calor (\dot{Q}) e de trabalho (\dot{W}), como se pode verificar na equação 3.1:

Equação 3.1

$$\dot{Q} + \dot{W} = M \cdot A_c \quad \text{com:}$$

M - Actividade metabólica (met);

A_c – Área superficial do corpo humana (m²).

A produção de calor é igual ao fluxo de calor instantâneo com o exterior, os seus modos de transferência de calor mais importantes são apresentados na equação 3.2:

Equação 3.2

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{con} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{res,sens} + \dot{Q}_{res,lat} \quad \text{com:}$$

\dot{Q}_{con} - perdas de calor por condução pela pele (W);

\dot{Q}_{rad} - perdas de calor por radiação pela pele (W);

\dot{Q}_{evap} - perdas de calor por evaporação pela pele (W);

$\dot{Q}_{res,sens}$ - perdas de calor sensíveis devido à respiração (W);

$\dot{Q}_{res,lat}$ - perdas de calor latentes devido à respiração (W);

Exemplificando, o balanço térmico do corpo humano pode ser observado na Figura 3.1:

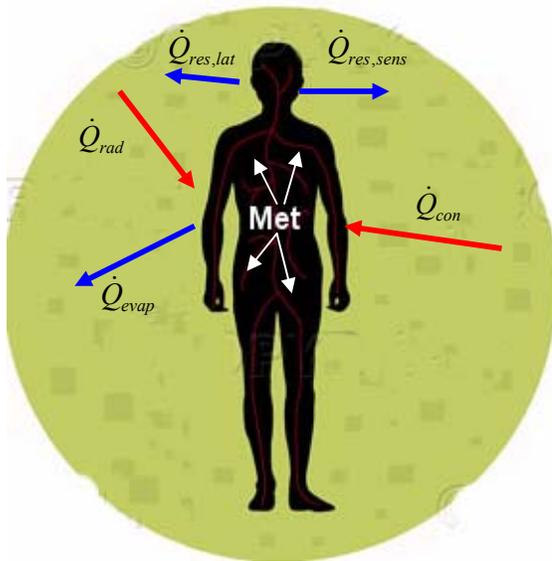


Figura 3.1 – Balanço térmico no corpo humano

3.1.3. CÁLCULO DA TEMPERATURA DE CONFORTO

Para o cálculo da temperatura de conforto, os métodos com maior aceitação são os referidos na norma ASHRAE 55 de 1992 e na ISO 7730. Para a norma ASHRAE, são apresentados vários gráficos, a partir dos quais e com a utilização de uma Temperatura Resultante (T_r), calculada a partir da equação 3.3, se obtém uma temperatura de conforto para o Verão ou Inverno:

Equação 3.3

$$T_r = \frac{\alpha_r \bar{T}_s + \alpha_c T_a}{\alpha_r + \alpha_c} \quad \text{com:}$$

α_r - Coeficiente de radiação = 4.9 W/m² °C;

α_c - Coeficiente de convecção = 2.9 W/m² °C;

T_a – Temperatura ambiente (°C).

O parâmetro \bar{T}_s pode ser calculado com recurso à equação 3.4 e refere-se à temperatura média radiante, ou seja, é a temperatura que uma pessoa sente devido à temperatura radiante das várias superfícies a que está exposto.

Equação 3.4

$$\overline{T_s}^4 = \sum_{i=1}^N T_i^4 \cdot F_{P-i} \quad \text{com:}$$

T_i – Temperatura da superfície i (°C);

F_{P-i} - Factor de forma entre a pessoa e a superfície i .

O factor de forma pode ser obtido através da utilização dos gráficos executados por Fanger e dependem da posição e orientação das pessoas. Um exemplo desses gráficos pode ser observado na figura 3.2 (Fanger, 1982).

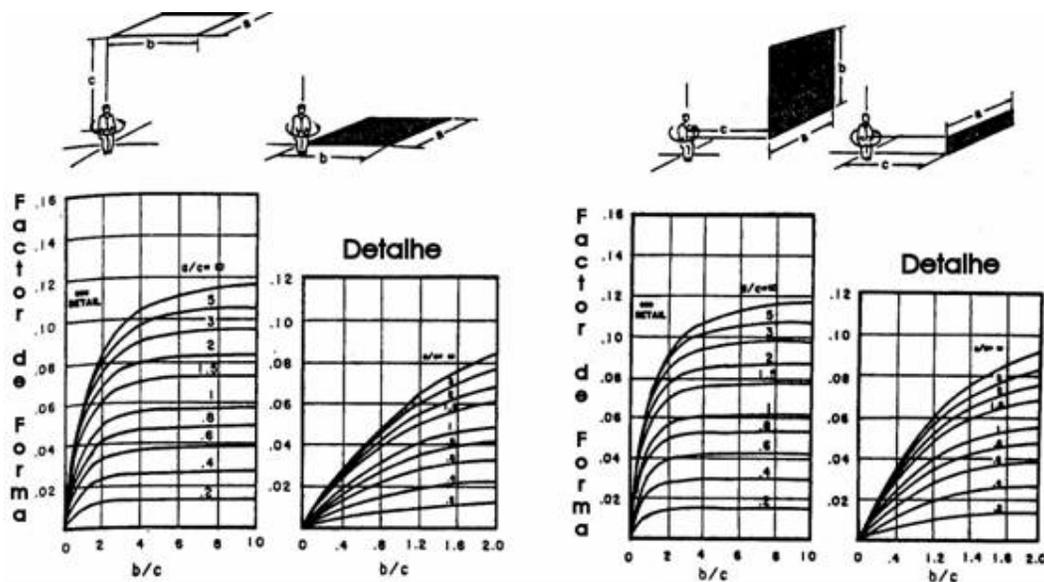


Figura 3.2 – Valor médio do factor de forma entre uma pessoa sentada e uma superfície horizontal ou vertical quando a pessoa pode ser rodada sobre um eixo vertical. Fonte: Fanger, 1982

Por último, antes de se considerar os gráficos de conforto é necessário fazer uma correcção à Temperatura Resultante, de forma a contabilizar a actividade Metabólica e o isolamento de vestuário da pessoa, como se pode verificar na equação 3.5 (Kreider et al, 1994).

Equação 3.5

$$T_{r_corr} = T_r - (1.0 + clo) \cdot (met - 1.2)$$

Com esta Temperatura Resultante é possível consultar o gráfico da Figura 3.3 de forma a conhecer a zona de conforto para o Verão e Inverno.

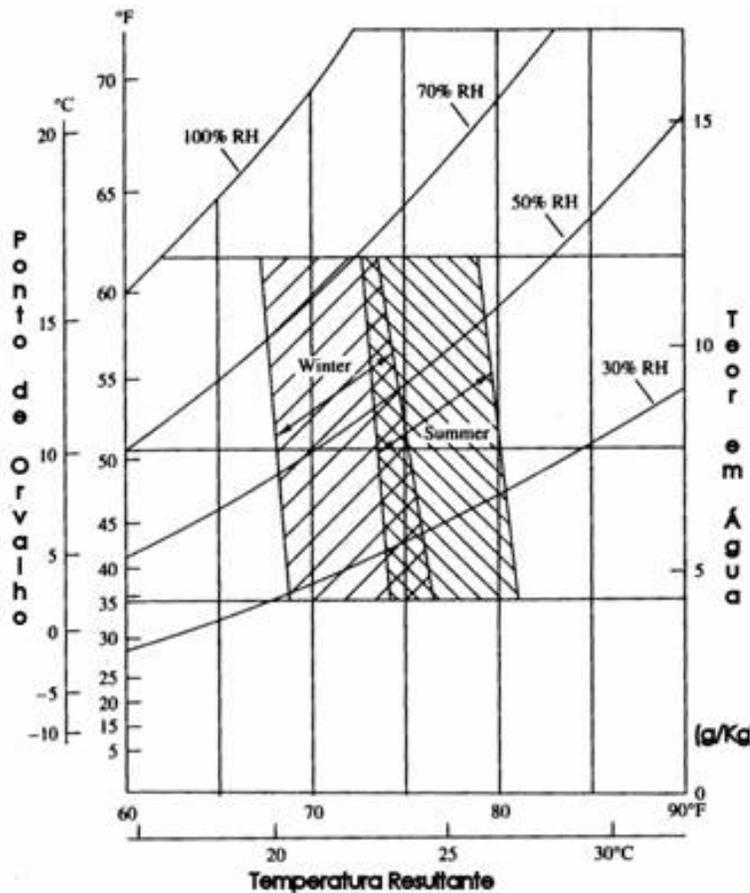


Figura 3.3 – Zonas de conforto para o Verão e Inverno. Fonte: ASHRAE, 1997

O modelo PMV (Predicted Mean Vote – voto previsto médio) apresentado na norma internacional ISO 7730 é utilizado desde 1980. Este é baseado num modelo estático de transferência de calor, calibrado a partir de um grande número de pessoas numa câmara climática. A escala vai de -3 a 3: -3 muito frio, -2 frio, -1 levemente frio, 0 neutro, +1 levemente quente, +2 quente, +3 muito quente. A partir desta norma, para estimar a temperatura óptima de conforto, é utilizado o gráfico da Figura 3.4, com a temperatura óptima para condições específicas de Actividade Metabólica e Isolamento do vestuário.

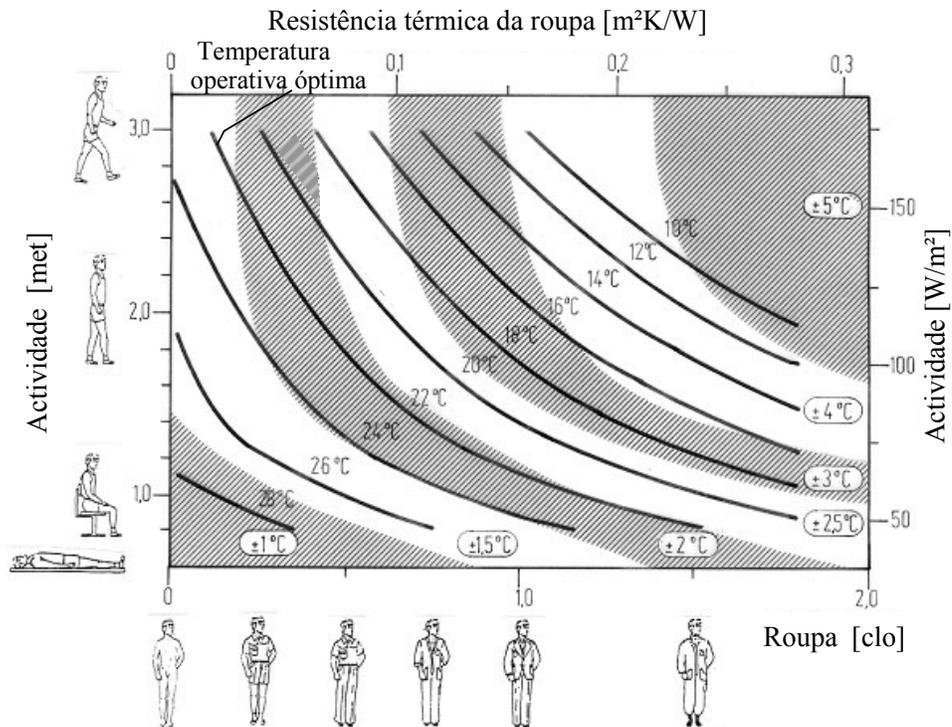


Figura 3.4 – Temperatura resultante ótima de conforto. Adaptado de: Roulet; Fanger *et al*, 1980; Fanger *et al*, 1985

3.1.4. PROPOSTAS PARA A ACTUALIZAÇÃO DAS NORMAS DE CONFORTO

Nos últimos anos têm sido efectuados vários estudos de forma a actualizar as normas de conforto térmico existentes. Vários autores verificaram que as normas ISO e ASHRAE não se aplicam a todos os locais e propuseram algumas soluções para melhorar estas normas.

Assim, num estudo efectuado por Dear, chegou-se a valores de temperatura de conforto interior entre os 23 – 28 °C para locais com temperaturas médias exteriores de 25 °C e entre 26 – 31 °C em locais com temperaturas médias exteriores de 33 °C, com uma aceitação de 90% (Dear *et al*, 2002).

Outro estudo, realizado na Tailândia, mostrou que em escritórios equipados com ar-condicionado eram aceitáveis temperaturas de 28 °C e para escritórios com ventilação natural, a temperatura poderia chegar aos 31 °C (Glicksman *et al*, 2001).

Por último, um estudo com o intuito de reduzir as cargas térmicas de arrefecimento registou votos de sensação térmica em alunos de liceu, utilizando arrefecimento por unidades ventiladoras. Este estudo concluiu que a temperatura neutra era de 30.6 °C com velocidade do ar de 1.0 m/s e humidade relativa entre 50 a 60%, mas que poderia chegar aos 33.5 °C se a humidade fosse entre 50 – 80% com velocidade do ar de 2.0 m/s (Khedari et al, 2000).

Na biologia, a teoria da adaptação define que um ambiente óptimo não é constante, antes deverá providenciar uma variação óptima a uma frequência óptima. A estabilidade aparente de um organismo apenas existe porque esta é modificável. A ligeira instabilidade é a condição necessária para a verdadeira estabilidade do organismo. Como tal, os edifícios podem oferecer diferentes tipos de condições térmicas aceitáveis, devido à capacidade de se adaptarem dentro de variedade óptima de condições. Foi introduzido o conceito de "erro adaptativo" de forma a explicar a diferença entre a estreita zona de conforto prevista e a larga zona de conforto medida por observações. Como resposta a esta teoria, surge uma nova tendência, com aplicação nas normas de conforto térmico – **o modelo adaptativo**. Este conceito explica as discrepâncias existentes entre os índices de conforto térmico racionais (física e fisiologia da transferência de calor) e os valores obtidos "in-situ" – PMV: votos previstos médios de conforto (Kindangen, 1997).

O princípio adaptativo pode ser caracterizado como: "se ocorre uma mudança tal que provoque desconforto, as pessoas reagem de forma que tende a restaurar o seu conforto" – Nicol e Humphreys, 2002.

Os modelos de conforto adaptativo são pensados para situações onde as pessoas têm a possibilidade de se adaptar ao ambiente (ajustar as roupas, abrir janelas para aumento da velocidade do ar), e assim, têm zonas de conforto térmico substancialmente maiores do que as normas racionais, possibilitando o dimensionamento de equipamentos de aquecimento / arrefecimento com menor potência, originando menores consumos

energéticos. No modelo adaptativo, é proposto uma equação de regressão que relaciona a temperatura interior de conforto com a temperatura média mensal exterior. Uma das aplicações destas normas adaptativas é a possibilidade de preverem a temperatura interior de conforto através da temperatura exterior, sendo muito útil para avaliar se soluções passivas de aquecimento / arrefecimento são viáveis para o edifício.

A partir de um estudo em 160 edifícios, tentou verificar-se o estado térmico dos ocupantes e compará-lo com as previsões dos modelos PMV e adaptativo, como mostram as Figuras 3.5 e 3.6 (Dear *et al*, 2002).

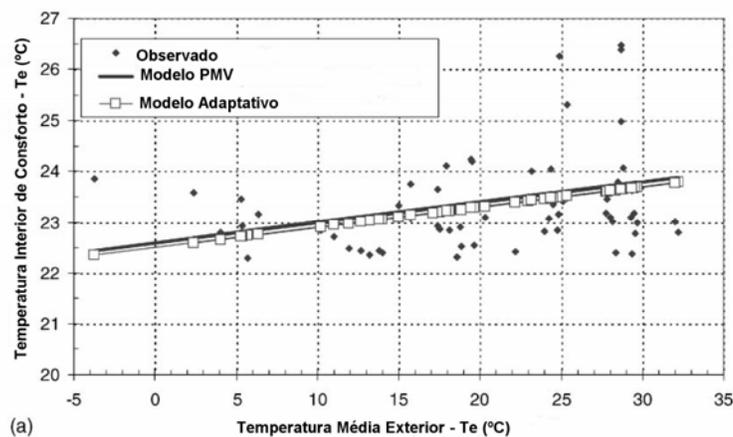


Figura 3.5 - Temperatura de conforto em edifícios climatizados. Fonte: Dear *et al*, 2002

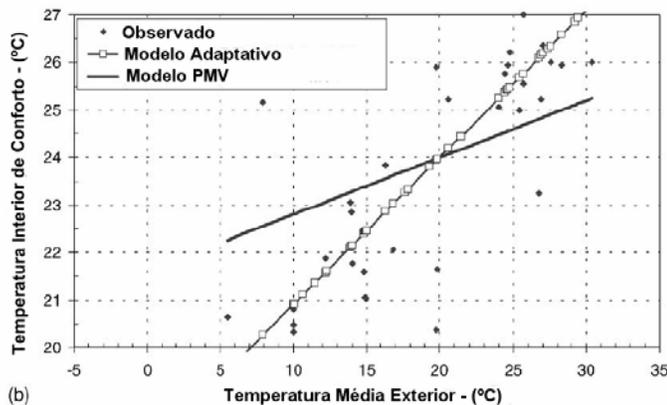


Figura 3.6 - Temperatura de conforto em edifícios não-climatizados. Fonte: Dear *et al*, 2002

Depois deste estudo, foi proposta uma revisão à norma ASHRAE 55: em edifícios não ventilados é aconselhada a utilização do modelo adaptativo, em vez do PMV, para obter a temperatura interior de conforto, onde se relaciona o conforto térmico com a temperatura exterior (Dear *et al*, 2002).

O modelo PMV apresenta resultados muito bons para edifícios com AVAC, porém, para edifícios sem AVAC prevê-se uma sensação térmica mais quente que os ocupantes realmente sentem. O modelo adaptativo prevê bastante bem a sensação térmica em edifícios não-climatizados em climas quentes, mesmo não considerando a actividade e vestuário, possuindo erros grandes noutros tipos de climas. Assim, a precisão do modelo adaptativo deve-se apenas às expectativas dos ocupantes, ou seja, o facto de o edifício não ser climatizado e a habituação a altas temperaturas, levam os ocupantes a ter baixas expectativas quanto ao comportamento térmico do edifício. Como tal, é possível corrigir o modelo PMV, a partir de um factor de expectativa (e), que pode variar entre 0.5 a 1 – para edifícios climatizados $e=1$. Para edifícios não-climatizados este factor depende da duração da estação quente, assim como da existência de edifícios climatizados na vizinhança e seu número.

Outro factor que contribuía para a diferença entre a sensação térmica calculada pelo modelo PMV e a realmente sentida, era a taxa metabólica. Esta era estimada através de questionários onde se identificavam as actividades, mas as pessoas, ao sentirem-se quentes, tendem a abrandarem a sua actividade e consequentemente reduzem a taxa metabólica. Assim para os períodos quentes terá de se reduzir a taxa metabólica prevista no modelo PMV. Com a implementação destas duas correcções no modelo PMV, este consegue prever com bastante precisão a sensação térmica em edifícios não climatizados (Fanger *et al*, 2002).

Outra proposta de alteração do modelo PMV é um ajuste ao índice PMV a partir de um estudo estatístico entre as diferenças do modelo PMV e as medidas *in-situ*. Assim, através da equação 3.6, é calculado o factor de ajuste ($D_{PMV-ASHRAE}$) e seguidamente aplica-se a equação 3.7 para obter o valor do PMV ajustado (Humphreys *et al*, 2002).

Equação 3.6

$$D_{PMV-ASHRAE} = -4.03 + 0.0949T_r + 0.00584(HR\%) + 1.201(met \cdot clo) + 0.000838T_a^2$$

Com:

$HR\%$ – Humidade Relativa (%).

Equação 3.7

$$PMV_{Ajustado} = 0.8(PMV - D_{PMV-ASHRAE})$$

Observando todos os pontos de vista referidos anteriormente, é possível concluir que a escolha do melhor método de previsão do conforto térmico ainda não é consensual, ou seja, existem defensores da aplicação do modelo adaptativo mais extensamente, enquanto que outros acham preferível a revisão do modelo PMV.

3.2. BALANÇO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS

Os edifícios filtram a passagem de luz, ar, ruído e energia, entre os ambientes interior e exterior, ou seja, providenciam o contraste entre o exterior e o interior. A Envolvente (exterior) do edifício é toda a construção, tomada como um todo ou uma parte, que separa o interior de um edifício do exterior. Os elementos da envolvente são as porções da envolvente do edifício que têm uma construção consistente, tais como uma parede, cobertura, pavimento, janela ou porta. Assim, para o cálculo do balanço térmico dos edifícios é necessário contabilizar as trocas de **calor** da envolvente do edifício (ASTM, 1999).

3.2.1. MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

O calor pode ser definido como *energia em trânsito* devido à diferença de temperatura. A transmissão de calor pode ocorrer segundo três mecanismos, como se pode observar na Figura 3.7:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

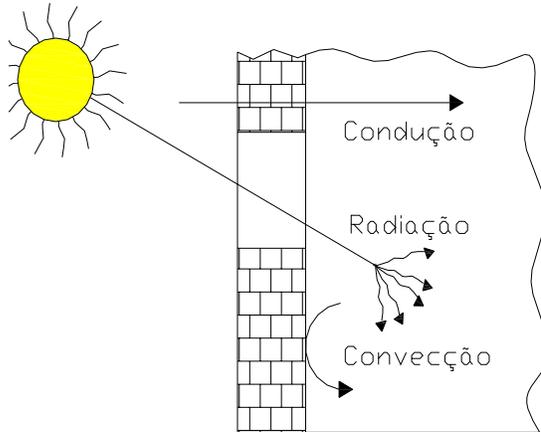


Figura 3.7 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios

Condução – este mecanismo de transmissão de calor tem base na transferência de energia cinética a nível molecular em sólidos, líquidos ou gases. Nos líquidos e sólidos não condutores eléctricos, a condução térmica dá-se devido às oscilações longitudinais da estrutura. Em metais a condução é semelhante à condução eléctrica, ou seja, devido ao movimento de electrões livres; e nos gases é devido à colisão elástica das moléculas. O fluxo de calor é sempre na direcção da redução da temperatura, como deduzido da segunda lei da Termodinâmica. Nos edifícios, o processo de transmissão de calor mais significativo é a condução e depende da condutividade térmica dos materiais - λ [W/m.°C] e da espessura do elemento da envolvente - e [m], como se pode verificar na Lei de Fourier para a condução - equação 3.8.

Equação 3.8

$$\dot{Q} = -(\lambda \cdot A) \cdot \frac{dT}{de} \quad \text{com:}$$

A – área do elemento (m²);

dT/de – gradiente de temperatura (°C/m).

Convecção – este mecanismo de transmissão de calor tem base na transferência de energia por movimento dos fluidos, líquidos ou gasosos, e condução molecular. Assim, este mecanismo ocorre na transmissão de calor de um sólido para o ar adjacente, ou entre duas superfícies a diferentes temperaturas. A transmissão de calor por convecção aumenta na medida que aumenta a velocidade do fluxo do fluido. A convecção pode ser **Natural** – gerada internamente devido à não-homogeneidade da densidade por diferenças de temperatura – ou **Forçada** – quando o fluxo é produzido por fontes externas.

Radiação – este mecanismo de transmissão de calor tem base na transferência de energia por ondas electromagnéticas. Para ocorrer este tipo de transmissão de calor, apenas é necessária a existência de duas superfícies a diferentes temperaturas, em que, devido à vibração das moléculas superficiais é emitida energia radiante através do espaço até atingir uma superfície opaca, a qual absorve parte desta energia e reflecte a restante (ISQ, 2000).

3.2.2. TROCAS DE CALOR NOS EDIFÍCIOS

A contabilização das trocas de calor (Q) pelos elementos da envolvente dos edifícios pode ser executada da seguinte forma (equações 3.9):

Equação 3.9

$$Q_{Cond} = \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i \cdot (T_i - T_e) \quad \text{com:}$$

U_i - Coeficiente de condutibilidade térmica do elemento i ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

A_i - Área do elemento i (m^2);

T_i - Temperatura interior ($^\circ C$);

T_e - Temperatura exterior (m^2);

De forma a obter o Coeficiente de condutibilidade térmica (U) de cada elemento da envolvente, serão contabilizadas a parcela por convecção (h_i e

h_e) e a parcela por condução, a partir da resistência térmica ($R = e/\lambda$), como é possível observar na equação 3.10:

Equação 3.10

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \left(\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{h_i} \quad \text{com:}$$

$1/h_i$ – Resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$);

$1/h_e$ – Resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$).

No caso do elemento em estudo pertencer à envolvente interior do edifício, mas separando o espaço útil de um espaço não útil (diferenças térmicas relativamente elevadas), já se podem verificar trocas de calor importantes para o balanço térmico dos edifícios. Assim, a contabilização das trocas de calor (Q) dum elemento da envolvente interior tem o procedimento semelhante ao enunciado anteriormente, mas com a particularidade de ao calcular o coeficiente U não se contabilizar o $1/h_e$ mas sim duas vezes o $1/h_i$.

O balanço energético de um edifício tem de ser dividido em dois períodos – Verão e Inverno, pois o sentido dos fluxos de calor vai ser diferente em cada um destes períodos. Para o Verão, o parâmetro a calcular são as necessidades de arrefecimento (Q_{Nec_Arref}), enquanto que para o Inverno são as necessidades de aquecimento (Q_{Nec_Aquec}). Assim o balanço energético pode ser representado pela equação 3.11 – Verão e a equação 3.12 – Inverno.

Equação 3.11

$$Q_{Nec_Arref} = Q_{Cond} + Q_{Vent} + Q_{GI} + Q_{Rad_Sol}$$

Equação 3.12

$$Q_{Nec_Aquec} = Q_{Cond} + Q_{Vent} - Q_{GI} - Q_{Rad_Sol} \quad \text{com:}$$

Q_{Vent} - Trocas de calor devido à ventilação do espaço:

Q_{Rad_Sol} - Ganhos térmicos devido à radiação solar:

Q_{GI} - Ganhos térmicos devido aos equipamentos interiores.



Um método de cálculo das três parcelas referidas anteriormente (Q_{Vent} ; Q_{GI} ; Q_{Rad_Sol}), será apresentado no Capítulo 5. Na Figura 3.9 apresenta-se um desenho esquemático exemplificando o balanço energético num edifício para o período de Verão e de Inverno.

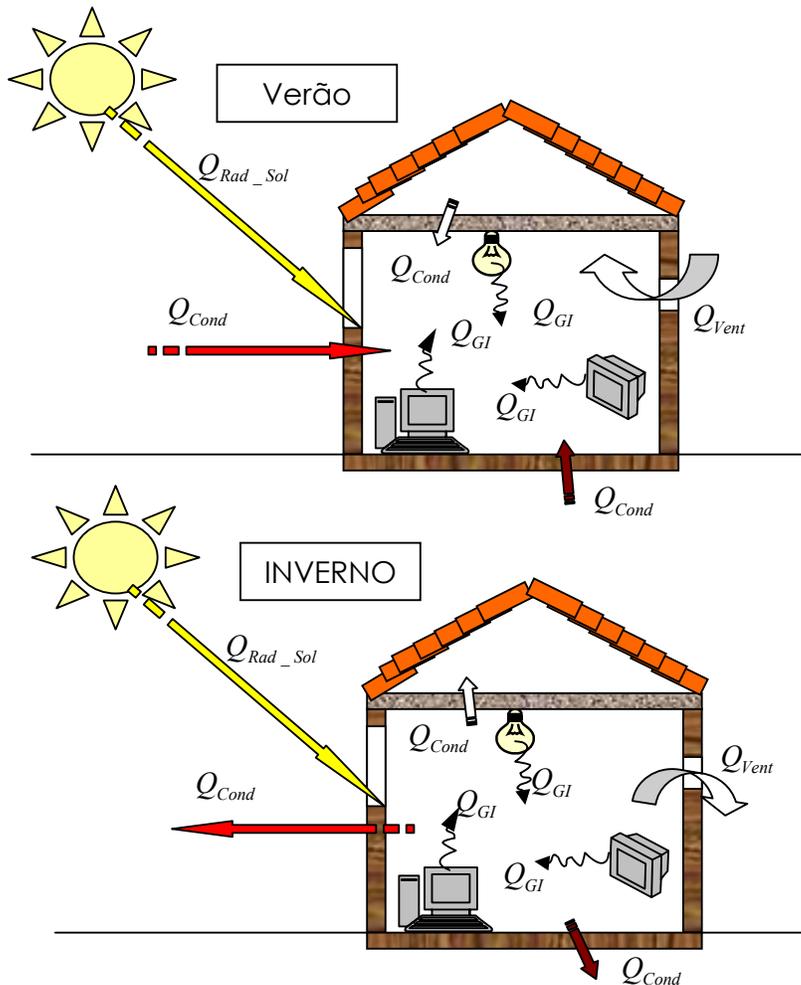


Figura 3.8 – Balanço energético no edifício

3.2.3. NOVOS MÉTODOS PARA ESTIMAR O COEFICIENTE “U”

Com o aumento da necessidade da eficiência energética dos edifícios, o nível de conhecimento dos parâmetros que condicionam a sua performance também precisa de aumentar. O coeficiente global de perdas de calor e a capacidade calorífica são dois parâmetros fundamentais para o

conhecimento da performance térmica da envolvente dos edifícios. Como tal Lundin sugere um método dinâmico para estimar o coeficiente de condutibilidade térmica (U) a partir da equação 3.13 (Lundin *et al*, 2005):

Equação 3.13

$$U_{tot} * \theta = P_{calor} + \alpha * P_{dom} + C_{tot} \frac{d\theta}{dt} \quad \text{com:}$$

θ – diferença entre a temperatura exterior e a interior;

P_{calor} – calor fornecido ao sistema de aquecimento;

α – factor de ganho;

P_{dom} – carga de calor doméstica;

C_{tot} – capacidade calorífica total.

3.3. ISOLAMENTO TÉRMICO

O isolamento térmico tem como função principal o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício, de forma a reduzir as trocas de calor entre o edifício e o exterior, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento, assim como o risco de condensações (ver ponto 3.4). São considerados isolantes térmicos materiais com $\lambda \leq 0.065 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e $R > 0.5 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$, de forma a garantir que a espessura do material é suficiente para reduzir o fluxo de calor (Freitas, 2002).

3.3.1. FUNÇÕES DOS ISOLANTES TÉRMICOS

Ao retardar o fluxo de calor pela envolvente do edifício, os isolamentos térmicos possuem várias funções (ASHRAE, 1997):

- Conservam a energia devida à redução das perdas de calor;
- Controlam a temperatura superficial de equipamentos e estruturas;

- Ajudam a controlar a temperatura de um processo químico, equipamentos e estruturas;
- Previnem as condensações em superfícies com a temperatura inferior ao ponto de orvalho;
- Reduzem as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico.

3.3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ISOLANTES TÉRMICOS

Os isolantes térmicos podem ser classificados quanto a: natureza – mineral, vegetal ou sintética; estrutura – fibrosa, celular ou mista; modo de Produção – pré-fabricados ou formados “in-situ”; apresentação – rígidos, semi-rígidos ou granulares. Na Tabela 3.3 são apresentados vários isolantes térmicos com a respectiva classificação (Freitas, 2000).

Tabela 3.3 – Classificação de alguns isolamentos térmicos

Produto	Natureza	Estrutura	Produção	Condutibilidade térmica (W/m.°C)
Lã de rocha	Mineral	Fibrosa	Placas; Mantas	0.04
Lã de vidro	Mineral	Fibrosa	Placas; Mantas	0.04
Vidro celular	Mineral	Celular	Placas	0.05
Aglomerado negro de cortiça	Vegetal	Celular	Placas; Granel	0.045
Fibra de coco	Vegetal	Celular	Placas; Mantas	0.044
Poliestireno expandido	Sintético	Celular	Placas	0.04
Poliestireno expandido extrudido	Sintético	Celular	Placas	0.035
Poliuretano	Sintético	Celular	in-situ	0.03

Fonte: Freitas, 2000

3.3.3. ESPESSURA ÓPTIMA DOS ISOLANTES TÉRMICOS

Durante o projecto é necessário decidir qual a espessura de isolamento térmico a aplicar na envolvente. Para tal, é fundamental executar um estudo económico de custo/benefício da aplicação do isolamento. A espessura

óptima do isolamento pode ser encontrada comparando a diminuição das necessidades de aquecimento / arrefecimento com o aumento de custo devido ao isolamento. A ASHRAE apresenta um método de escolha da espessura óptima de isolamento representado pelas equações 3.14 e 3.15, onde se encontra o valor máximo das poupanças económicas (P_{ec}).

Equação 3.14

$$P_{ec} = \frac{\Delta N a q_{i,j} \cdot (C_{aq}) \cdot (FAE_{aq})}{\eta_{aq}} + \frac{\Delta N a r_{i,j} \cdot (C_{ar}) \cdot (FAE_{ar})}{\eta_{ar}} \quad \text{com:}$$

$\Delta N a q_{i,j}$, $\Delta N a r_{i,j}$ - Variação das necessidades de aquecimento / arrefecimento;

C_{aq} , C_{ar} - Custo da energia para aquecimento / arrefecimento;

FAE_{aq} , FAE_{ar} - Factor de actualização da energia para aquecimento / arrefecimento;

η_{aq} , η_{ar} - Rendimento dos equipamentos de aquecimento / arrefecimento.

Equação 3.15

$$FAE = \frac{1 + T_{AAE}}{T_J - T_{AAE}} \cdot \left[1 + \left(\frac{1 + T_{AAE}}{1 + T_J} \right)^{CV} \right] \quad \text{com:}$$

T_{AAE} - Taxa de aumento anual do custo da energia;

T_J - Taxa de juros;

CV - Ciclo de vida do isolamento.

Com a aplicação destas expressões é possível identificar a espessura óptima do isolamento a aplicar, como se mostra na Figura 3.9 (ASHRAE, 1997).

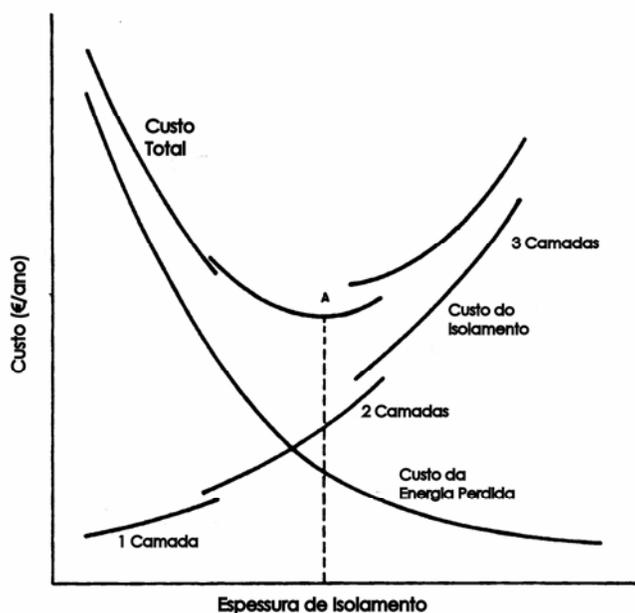


Figura 3.9 – Determinação da espessura óptima de isolamento. Fonte: ASHRAE (1997)

3.4. HUMIDADE NOS EDIFÍCIOS

A humidade nos edifícios é muito problemática, originando a redução da eficiência energética, gastos em manutenção, problemas de durabilidade e redução do conforto. A degradação dos edifícios devido à acção da humidade é o factor com maior peso na limitação da vida útil dos edifícios. A humidade nos edifícios pode ter origem em (ASHRAE, 1997):

- humidade de construção – é a humidade que se manifesta numa fase imediatamente posterior à construção, ou seja, durante a maturação do betão.
- Humidade do terreno – é a humidade proveniente do solo, que atinge a habitação devido à ascensão capilar, através das fundações ou paredes.
- Humidade de precipitação – infiltração de água provocada pela chuva, devido a problemas de estanqueidade da envolvente. Muitos vezes este problema agrava-se devido à acção combinada da chuva e do vento.

- Humidade de condensação – humidade devido à saturação do vapor de água. Pode ocorrer no interior ou na superfície dos paramentos.
- Humidade devida a fenómenos de higroscopicidade – diversos materiais de construção têm na sua constituição sais solúveis em água, sendo estes materiais higroscópicos, isto é, com a capacidade de absorverem a humidade do ar, dissolvendo os sais e devolvendo ao ambiente, em função da variação da pressão parcial e temperatura, podendo voltar a cristalizar os sais, com significativo aumento de volume.
- Humidade devida a causas fortuitas – como o nome indica, a humidade aparece devido a causas acidentais, tais como inundações, algerozes entupidos, tubos de água e de esgoto partidos, etc.

De entre todas as causas de humidade referidas anteriormente, a mais frequente nos edifícios é a humidade de condensação. De forma a evitar a ocorrência das condensações é necessário **ventilar** – diminuir os níveis de humidade interiores e **isolar** – aumento da temperatura das paredes e consequentemente diminuição do grau de saturação (Figura 3.10)

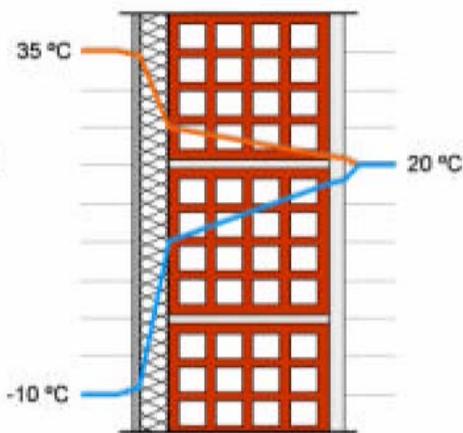


Figura 3.10 – Temperatura interior de uma parede com isolamento térmico. Fonte: Freitas, 2002

3.4.1. CÁLCULO DAS CONDENSAÇÕES NOS EDIFÍCIOS

As condensações ocorrem quase exclusivamente no Inverno, pelo que apenas é necessário verificar se ocorrem neste período. Nas superfícies exteriores da envolvente não ocorrem condensações neste período, pois estas superfícies estão a temperaturas mais elevadas que o ar em contacto, como tal possuem um menor grau de saturação. Assim, é necessário verificar a ocorrência de condensações superficiais interiores (1) e as condensações interiores (2).

Em ambos os casos as variáveis necessárias para o cálculo são: a medição da humidade relativa (HR) interior e exterior, a temperatura interior e exterior. Seguidamente é necessário calcular a temperatura superficial interior e exterior – T_x , a partir da equação 3.16:

Equação 3.16

$$T_x = T_i - \frac{R_{Tot}}{R_x} \cdot (T_i - T_e) \quad \text{com:}$$

R_{Tot} - Resistência térmica total do elemento da envolvente ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

R_x - Resistência térmica do elemento da envolvente, no ponto onde é necessário calcular a temperatura ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

1. Condensações superficiais

Para verificar a ocorrência de condensações superficiais, apenas é necessário verificar se a temperatura superficial é superior ou inferior ao Ponto de Orvalho – temperatura à qual, para uma dada humidade, o ar atinge o ponto de saturação. Assim, se a temperatura superficial for superior ao ponto de orvalho, não ocorrem condensações. Na Figura 3.11 é apresentado um exemplo de verificação de condensação superficial pelo método gráfico:

Definindo as condições a que está o ar interior – $T_i = 20 \text{ } ^\circ C$; $HR_i = 70\%$

É possível verificar que apenas ocorrem condensações se a temperatura superficial for inferior ao ponto de Orvalho, ou seja, inferior a $14 \text{ } ^\circ C$.

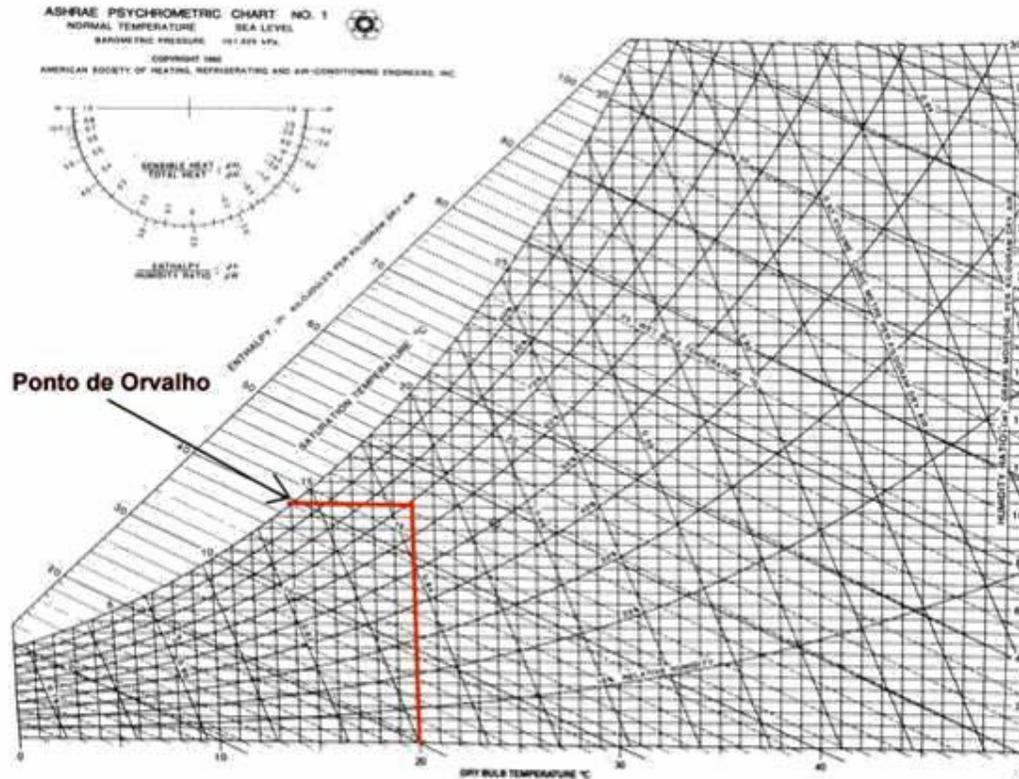


Figura 3.11 – Verificação de condensações superficiais. Fonte: ASHRAE, 1997

2. Condensações interiores

Para este caso, é necessário calcular a temperatura ao longo do elemento da envolvente, ou seja, em cada material constituinte do elemento, através da equação 3.16. Seguidamente, é necessário calcular a pressão de saturação (P_s) e a pressão do vapor ao longo de elemento, a partir das equações 3.17 e 3.18. No caso da pressão de vapor ultrapassar a pressão de saturação, ocorre a condensação. A partir da Tabela 3.4 e da Figura 3.12 é apresentado um perfil de humidade numa parede dupla de tijolo.

Equação 3.17

$$P_s = K_1 / T + K_2 + K_3 \cdot T + K_4 \cdot T^2 + K_5 \cdot T^3 + K_6 \cdot \ln(T) \quad \text{com:}$$

$$K_1 = -5.8002206; K_2 = 1.3914993; K_3 = -4.8640239e-2; K_4 = 4.1764768e-5; K_5 = -1.4452093e-8; K_6 = 6.5459673.$$

Equação 3.18

$$\frac{\Delta P_{Material}}{\Delta P_{Parede}} = \frac{Pe_{Parede}}{Pe_{Material}} \text{ com:}$$

$\Delta P_{Material}$ - variação da pressão de vapor até ao material;

ΔP_{Parede} - Pressão do vapor interior – pressão de vapor exterior;

$Pe_{Material}$ - Permeância ao vapor de água até ao material;

Pe_{Parede} - Permeância ao vapor de água interior – Permeância ao vapor de água exterior.

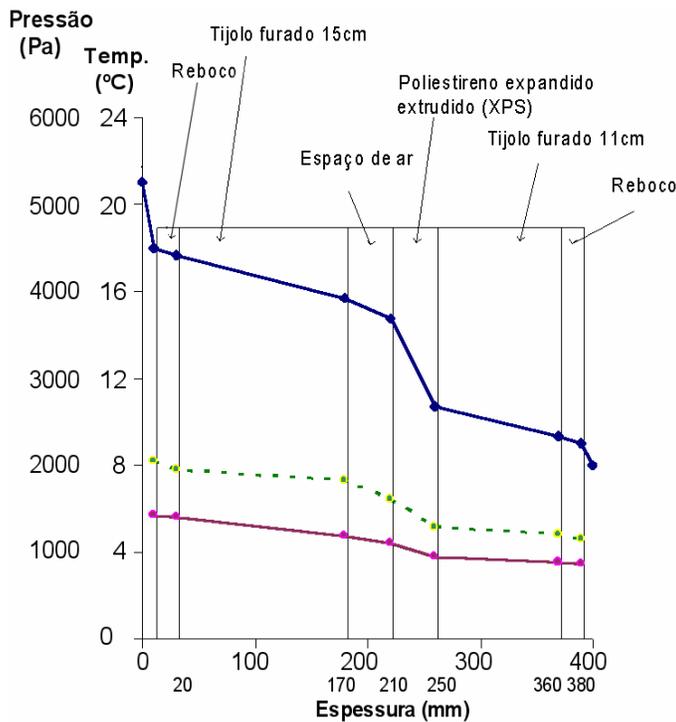


Figura 3.12 – Perfil de umidade para uma parede dupla

Tabela 3.4 – Variação da pressão de vapor ao longo de uma parede

Ponto	Temperatura (°C)	Ps (Pa)	Pvapor (Pa)
Tsup_i	17.98	2050	1420
Tp1	17.62	1950	1246
Tp2	15.70	1830	1156
Tp3	14.71	1600	1135
Tp4	10.66	1280	1134
Tp5	9.36	1200	1044
Tsup_e	9.01	1150	870

3.5. PONTES TÉRMICAS

O fluxo de calor, em termos gerais, dá-se perpendicularmente à superfície, através da condução térmica e do diferencial de temperatura. Mas considerando que o fluxo de calor segue a trajectória com menor dissipação de trabalho, ou seja que o fluxo de calor procura o “caminho mais curto”, se o “comprimento” é medido em resistência térmica - Figura 3.13 (Ecobuild, 2001).

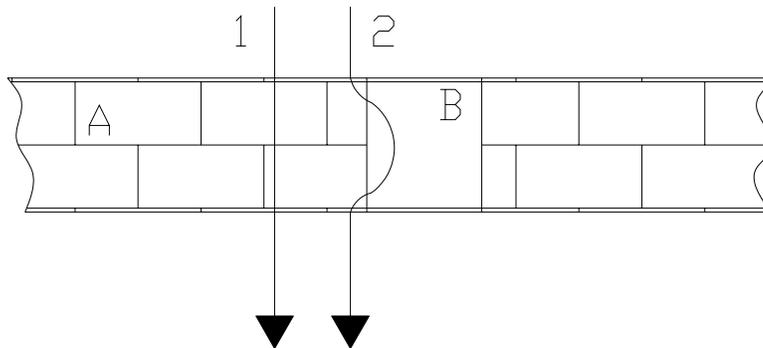


Figura 3.13 – Fluxo de calor ao longo de um elemento de construção

Devido às pontes térmicas, o fluxo de calor pode ter uma componente lateral muito elevada, podendo atingir os 50%, reduzindo assim, de forma significativa, a resistência térmica da envolvente do edifício. Adicionalmente, as pontes térmicas reduzem a temperatura superficial dos elementos, o que pode aumentar o risco de condensações e crescimento de bolor, além de originarem a heterogeneidade de temperaturas superficiais. As pontes térmicas podem ocorrer devido a (Ben-Nakhi, 2003):

- Alterações nas propriedades térmicas da envolvente do edifício na direcção lateral – interface entre as vigas de betão e as paredes de alvenaria;
- Alterações de espessura da construção – um envidraçado inserido numa parede;
- Diferença entre a área superficial interior e exterior – cantos;
- Geração de calor dentro de um elemento de construção do edifício – tubagem de água quente.

O tratamento das pontes térmicas é executado essencialmente a partir do reforço da resistência térmica da zona da ponte térmica. Assim, este tratamento pode ser local – aplicação de isolamento apenas na zona da ponte térmica – ou geral – aplicação de materiais, isolantes ou não, para aumentar a resistência global da envolvente.

3.5.1. AVALIAÇÃO DAS PONTES TÉRMICAS

A avaliação das pontes térmicas é, normalmente, executada de duas formas: consulta de manuais com exemplos de pontes térmicas ou através de ferramentas de simulação. O problema é que os manuais podem não representar a ponte térmica em estudo e as ferramentas de simulação, além de muito demoradas, podem não possibilitar a modelação de fronteiras múltiplas heterogéneas dinâmicas. Actualmente, este problema tem vindo a ser ultrapassado devido à implementação de catálogos e manuais computadorizados "on-line", com mais de 3000 representações de pontes térmicas, a implementação de procedimentos nas ferramentas de simulação, que possibilitam a modelação da condução a 3D (através de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos).

Ben-Nakhi testou a implementação de um módulo para estimação das pontes térmicas, numa ferramenta de simulação, através da condução dinâmica em 3D, comparando os resultados obtidos com este módulo, com os resultados analíticos, concluindo que os resultados são muito próximos. Assim, estes módulos são indispensáveis nas ferramentas de simulação térmica dos edifícios, de forma a aumentar cada vez mais a precisão dos resultados obtidos com estas ferramentas. Neste caso, devido ao peso que as pontes térmicas podem ter nos edifícios, este módulo poderá ser muito importante. Mas devido à consciencialização dos problemas resultantes das pontes térmicas, estas estão, cada vez mais, a ser evitadas e tratadas. As pontes térmicas mais comuns vêm muitas vezes referenciadas nos regulamentos térmicos dos diversos países de forma a serem sistematicamente corrigidas, logo na fase inicial do projecto (Ben-Nakhi, 2003).

3.6. INÉRCIA TÉRMICA

A inércia térmica dos edifícios é um parâmetro muito importante para o balanço térmico do edifício. A inércia térmica é o fenómeno pelo qual o edifício amortece as acções térmicas exteriores e interiores do edifício, proporcionando uma menor variação da temperatura interior. Tendo em conta que as acções térmicas exteriores (temperatura exterior, radiação solar) variam periodicamente, o efeito da inércia térmica é essencial para o conforto térmico. A inércia térmica é função da massa térmica do edifício, ou seja, do calor armazenado e pode ser representado pela equação 3.19 (Ecobuild, 2001):

Equação 3.19

$$\Delta q = m \cdot c_e \cdot \Delta T \quad \text{com:}$$

m – massa do elemento (Kg);

C_e – calor específico (KJ/Kg.°C)

Como tal, um corpo maior, de maior massa e/ou com maior calor específico, acumula ou liberta a mesma quantidade de energia com menor variação de temperatura. Para a maioria dos materiais dos edifícios o calor específico está situado entre 0.85 a 0.95 KJ/Kg.°C, o que explica o facto de apenas se mencionar a massa. Uma importante excepção é a madeira, cujo calor específico está situado entre 1.7 a 3.0 KJ/Kg.°C.

3.6.1. AVALIAÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA

O cálculo do efeito da inércia térmica no comportamento térmico do edifício é bastante complexo, pois é necessário a utilização de sistemas de equações dinâmicos, de forma a conseguir contabilizar todos os fluxos energéticos ao longo do tempo. Mas com recurso a algumas simplificações, Mitjá (1986) apresenta uma forma de avaliar a inércia térmica, decompondo a sua acção em dois princípios – o **Atraso térmico** (Φ) e o **Amortecimento térmico** (μ). Estes

parâmetros podem ser calculados a partir das equações 3.20 a 3.22 (Krieder e Rabl, 1994):

Equação 3.20

$$\Phi = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{\sum_n \alpha_i \cdot \pi}} \quad \text{com:}$$

x – espessura da parede (m);

T – período temporal (h);

n – número de elementos;

α - difusibilidade térmica (m²/h).

Equação 3.21

$$\alpha = \frac{\lambda}{d \cdot C_e} \quad \text{com:}$$

d – peso específico do elemento (Kg/m³);

λ - condutibilidade térmica (Kcal/h.m.°C);

C_e - calor específico (Kcal/Kg.°C).

$$\mu = e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{T \cdot \sum_n \alpha_i}}}$$

A partir deste método, é apresentado um exemplo do cálculo da temperatura superficial da envolvente interior de um compartimento, patente na Tabela 3.5 e na Figura 3.14.

Tabela 3.5 – Cálculo do amortecimento e atraso térmico para uma parede

Parede	Área (m ²)	X (m)	T (h)	α_{tot} (m ² /h)	μ	Φ (h)
1	10.15	0.17	24	0.003	0.31	4.48

Materiais	C_e (Kcal/Kg°C)	d (Kg/m ³)	λ (Kcal/h.m°C)	α (m ² /h)
Reboco	0.24	1800	0.6	0.0014
Tijolo furado (15cm)	0.2	1300	0.35	0.0013
			$\Sigma=$	0.0027

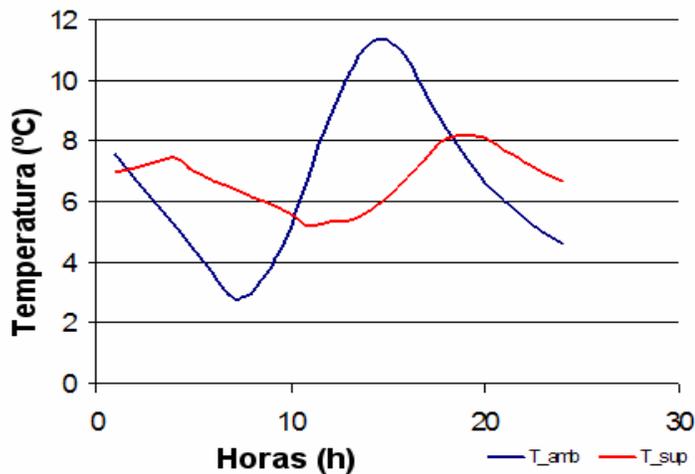


Figura 3.14 – Variação da temperatura superficial de uma parede ao longo de um dia

3.7. VENTILAÇÃO

As trocas de ar entre o edifício e o exterior podem ser divididas em dois mecanismos – **Ventilação** e **Infiltração**. A ventilação é a entrada de ar intencional, entre o edifício e o exterior, através de janelas, grelhas, etc., enquanto que a infiltração é a entrada de ar fortuito, através de fendas ou aberturas não intencionais. A ventilação pode ser dividida em **Natural** ou **Forçada**. A ventilação natural ocorre através da produção de diferenças de pressão naturais ou artificiais, e a ventilação forçada, também chamada de ventilação mecânica, ocorre através da introdução de ventiladores e condutas de admissão e exaustão (ASHRAE, 1997).

A ventilação dos edifícios é, cada vez mais, um factor com enorme importância na performance energética das habitações. Principalmente com a mudança das técnicas de construção, em que, para reduzir as perdas de calor, foi aumentada a estanqueidade da envolvente dos edifícios, reduzindo assim a taxa de infiltração de ar nas habitações. Como tal, ao projectar uma habitação, é sempre necessário prever uma dada taxa de ventilação, com vista à supressão de três tipos de necessidades: 1. qualidade do ar interior; 2. conforto térmico; 3. prevenção de riscos de condensação. A utilização da

ventilação para atingir os três objectivos referidos é esquematizada na Figura 3.15.

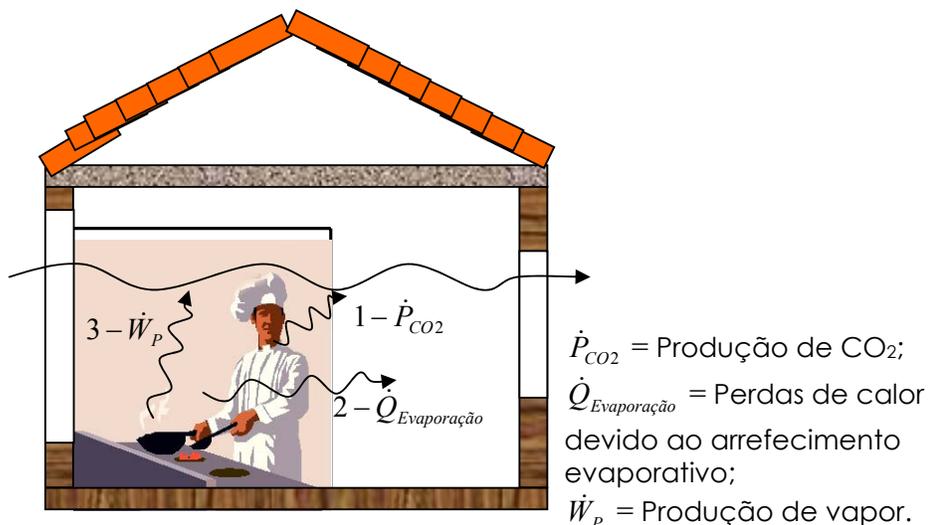


Figura 3.15 – Ventilação nos edifícios

3.7.1. VENTILAÇÃO PARA A QUALIDADE DO AR INTERIOR

A qualidade do ar interior é um parâmetro essencial tanto para a saúde dos ocupantes, assim como para o seu bem-estar e produtividade. Assim, a ventilação tem de ser projectada em função das fontes de poluentes interiores e exteriores, fornecimento de ar puro, remoção das cargas poluentes, actividade dos ocupantes e operação e manutenção apropriada do sistema de ventilação. Uma qualidade do ar interior pode ser definida como ar livre de poluentes que causam irritação, desconforto ou doenças nos ocupantes. Para o fornecimento de ar puro existe uma grande variedade de métodos, mas o mais comum é a utilização de filtros, sendo estes muito eficazes para poeiras. Resumindo, é necessário remover o ar interior viciado, substituindo-o por ar fresco exterior.

De forma a calcular a taxa de ventilação necessária para a qualidade do ar interior, é necessário conhecer os níveis de poluente admissíveis (Tabela 3.6) e a taxa de produção do poluente em questão. Seguidamente, utiliza-se a equação 3.22. Esta equação admite que o ar interior está perfeitamente

misturado, o que é uma aproximação bastante aceitável para a maioria dos edifícios (Givoni, 1998).

Tabela 3.6 – Concentração admissível de alguns poluentes

Poluente	Concentração	Exposição
Dióxido de Carbono	1.8 g/m ³	Contínua
Compostos Orgânicos Voláteis totais	600 µg/m ³	Contínua
Ozono	200 µg/m ³	Contínua
Partículas Suspensas no Ar (PM10)	150 µg/m ³	Contínua
Formaldeído	100 µg/m ³	Contínua
Pesticida C ₁₀ H ₆ Cl ₈	5 µg/m ³	Contínua

Fonte: ASHRAE, 1989; RSECE, 2005.

Equação 3.22

$$C_i = C_0 + \frac{\dot{P}}{\dot{V}} \quad \text{com:}$$

C_i – concentração interior do poluente admissível (µg/m³);

C_0 – concentração exterior do poluente (µg/m³);

\dot{P} – taxa de produção do poluente (µg/s);

\dot{V} – taxa de ventilação (m³/s).

Normalmente este método de cálculo para previsão da taxa de ventilação necessária apenas é utilizado uma vez, ou seja, identificando o poluente dominante e calculando a taxa de ventilação necessária para o manter abaixo da concentração admissível, os restantes poluentes também vão estar em concentrações abaixo das admissíveis (Allard, 1998).

3.7.2. VENTILAÇÃO PARA O CONFORTO TÉRMICO

A utilização da ventilação para promover um maior conforto térmico é adequada para o Verão. Podendo ser aproveitada de duas formas: 1. aumento da velocidade do ar – resulta num aumento das perdas de calor por convecção pelo corpo humano e aumentam a taxa de evaporação ao

nível da pele; 2. arrefecimento da massa estrutural do edifício durante a noite, aproveitando a massa estrutural arrefecida durante o dia de forma a diminuir a temperatura interior (esta técnica é chamada ventilação nocturna e será abordada mais extensivamente no Capítulo 4).

De forma a calcular a taxa de ventilação necessária para promover o conforto térmico, é utilizada a Equação 3.23, onde a partir da temperatura interior de conforto (T_i) e da carga térmica interior, é executado um balanço energético entre a carga térmica que entra no edifício e a carga térmica que sai, calculando assim a taxa de ventilação necessária para remover uma certa quantidade de calor (Q) do edifícios.

Equação 3.23

$$\dot{V} = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot (T_i - T_e)} \quad \text{com:}$$

ρ - densidade do ar (Kg/m^3);

C_p - calor específico do ar ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$).

3.7.3. VENTILAÇÃO PARA A PREVENÇÃO DE CONDENSAÇÕES

Em compartimentos que possuem fontes de produção de vapor muito intensas, é necessário a utilização da ventilação, de forma a reduzir os níveis de humidade presente e assim prevenir a ocorrência de condensações. Por exemplo, em cozinhas, as taxas de produção de vapor costumam ser muito altas, sendo necessário ao projectar este compartimento calcular a taxa de ventilação necessária para não ocorrerem condensações. Para tal é possível aplicar a equação 3.24 e encontrar a taxa de ventilação necessária para remover a produção de vapor interior.

Equação 3.24

$$\dot{V} = \frac{\dot{W}_p}{\rho_{wi} - \rho_{we}} \quad \text{com:}$$

ρ_{we} - densidade do vapor de ar exterior (Kg/m³);

ρ_{wi} - densidade do vapor de ar interior (Kg/m³);

\dot{W}_p - taxa de produção de vapor (Kg/h).

3.7.4. MECANISMOS IMPULSIONADORES DA VENTILAÇÃO

A ventilação dos edifícios pode ser obtida através de três mecanismos distintos: 1. diferenciais de pressão devido ao vento; 2. diferenciais de densidade do ar devido à diferença de temperatura entre o exterior e o interior; 3. sistemas de ventilação mecânicos.

Para o caso 1 e 2, o fluxo de ar é obtido através de aberturas na envolvente dos edifícios, normalmente obtidos com a abertura das janelas. Ultimamente, é normal a introdução de orifícios de ventilação (grelhas de ventilação) acoplados aos envidraçados. Assim, para calcular o caudal que atravessa as aberturas dos edifícios é utilizada a equação 3.25 e 3.26 (ASHRAE, 1997).

Equação 3.25

$$\dot{V} = C_D \cdot A \cdot \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad \text{com:}$$

C_D – coeficiente de descarga;

A – área da aberturas (m²);

ΔP - variação da pressão (Pa).

Equação 3.26

$$C_D = 0.4 + 0.0045 \cdot |T_i - T_e| \quad \text{com:}$$

O diferencial de pressão (ΔP) pode ser obtido utilizando as expressões 3.27 ou 3.28 consoante sejam devido ao vento ou à temperatura, respectivamente.

Equação 3.27

$$\Delta P = P_e + C_{P_V} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} - P_i \quad \text{com:}$$



P_e – pressão estática exterior (Pa);

P_i – pressão interior (Pa);

C_{P_V} – coeficiente de pressão superficial devido ao vento;

V – velocidade do vento (m/s).

O valor do C_{P_V} , para várias situações, pode ser obtido através da consulta do Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA, 1983).

Equação 3.28

$$\Delta P = \rho_i \cdot g \cdot (H - H_{NPN}) \cdot \frac{(T_i - T_e)}{\bar{T}} \quad \text{com:}$$

g – constante gravitacional (9.81 m/s²);

H – altura da abertura (m);

H_{NPN} – altura do nível de pressão neutra (m);

\bar{T} – média entre a temperatura interior e exterior (°K).

O nível de pressão neutra é a altura do edifício, onde o nível de pressão exterior é igual ao nível de pressão interior. Este pode ser aproximado a metade do pé direito da habitação, como se pode observar na Figura 3.16.

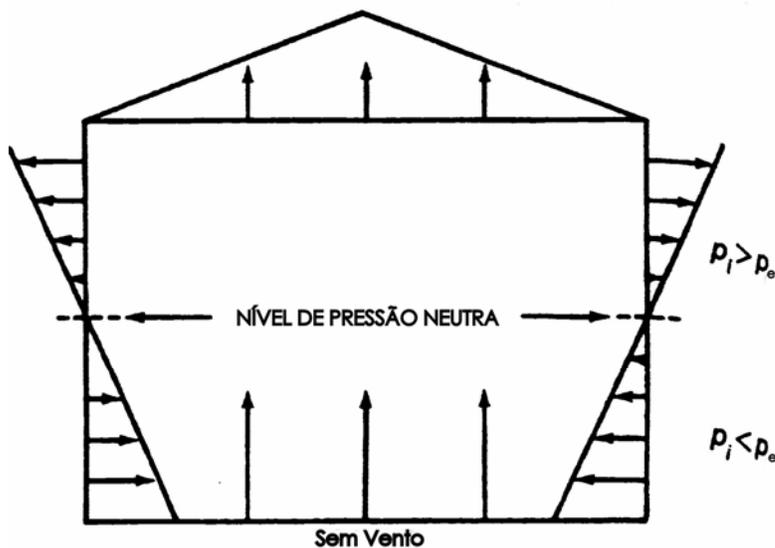


Figura 3.16 – Altura do nível de pressão neutra

Mas na maior parte das situações o diferencial de pressão pode ser atribuído tanto ao efeito do vento, como ao diferencial de temperaturas. Assim, o caudal de ar devido à combinação destes dois efeitos é obtido através da equação 3.29.

Equação 3.29

$$\dot{V} = \sqrt{\dot{V}_V^2 + \dot{V}_T^2} \quad \text{com:}$$

\dot{V}_V - caudal de ar devido ao vento (m³/s);

\dot{V}_T - caudal de ar devido à diferença de temperatura (m³/s).

Em relação à ventilação mecânica, a obtenção da diferença de pressão apenas pode ser calculada se for conhecida a localização de todas as aberturas na envolvente e a relação entre a diferença de pressão e o fluxo de ar em cada abertura. Mas a taxa de ventilação é, naturalmente, controlada pelo sistema mecânico, pelo que apenas é necessário calcular as necessidades de ventilação, de forma a programar o sistema mecânico de ventilação para fornecer a taxa de ventilação calculada. Os sistemas de ventilação mecânicos podem funcionar de três formas: por insuflação, por extracção ou misto. Mas o sistema por insuflação deve ser evitado, pois o ar de extracção sai do edifício por exfiltração, não sendo possível a recuperação do calor (A Green Vitruvius, 1999).

3.7.5. INFILTRAÇÕES

Para suprimir as necessidades de ventilação, em alguns casos, as infiltrações pela envolvente do edifício podem ser suficientes. Mas a determinação analítica da taxa de renovações de ar por infiltração é dependente de factores muito variáveis, tais como o clima, a operação dos equipamentos e as actividades dos ocupantes. Assim, em fase de projecto, uma das únicas formas de ter uma ideia da taxa de infiltração é a utilização de valores tabelados do caudal de ar de escape através de vários componentes padronizados, como caixilho de porta calafetado, lareira com porta de vidro, etc (Exemplo no livro ASHRAE, 1997, Tabela 3, Página 28.18). Calculando o

somatório do caudal de ar que atravessa cada componente, é possível prever a taxa de infiltração do compartimento. Por outro lado, se a avaliação da taxa de infiltração for em edifícios existentes, a forma mais fiável é a utilização de métodos experimentais, tais como:

- Porta-Ventiladora – este método consiste na pressurização e despressurização mecânica, a partir de uma porta ajustável com um ventilador acoplado, de um compartimento e respectiva medição do fluxo de ar do ventilador a uma dada pressão. Existem dois tipos de testes neste método, o mais simples – *método de um ponto* – é utilizado quando o único propósito é a quantificação da taxa de infiltração, enquanto que o outro – *método de dois pontos* – quando o propósito é quantificar a taxa de infiltração além de permitir estimar o coeficiente e o expoente do fluxo de ar do edifícios. Para mais informações sobre este método pode-se consultar a ASTM Standard E 1827.
- Gases Traçadores – neste método, é insuflado um gás no compartimento (que não exista antes da insuflação) e seguidamente é medida a sua concentração, de forma a determinar a taxa de infiltração. Para a medição das taxas de troca de ar, podem ser utilizadas três técnicas: decaimento ou aumento da concentração; concentração constante; e injeção constante. Para mais informações sobre este método pode-se consultar a ASTM Standard E 741.

3.6.6. A VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural é um método muito eficiente para providenciar as necessidades de ventilação dos edifícios, pois não apresenta consumos de energia, ao contrário da ventilação mecânica. Como tal, a ventilação natural é uma forma de aumentar a eficiência energética dos edifícios. Por outro lado, estudos sugerem que o síndrome dos edifícios doentes é observado, quase exclusivamente, em edifícios com ventilação mecânica (Baker, 1993). Relativamente à ventilação para a qualidade do ar e prevenção das condensações, as taxas de renovação necessárias são facilmente atingidas pela ventilação natural, sendo apenas necessário precaver os problemas do

ambiente exterior, como o ruído e poluição. Para o caso das necessidades para o conforto térmico, as taxas de ventilação necessárias podem ser difíceis de obter, mas como estão bem identificadas, é possível conhecer em quais a ventilação natural é suficiente. Mas mesmo que a ventilação natural não seja suficiente para atingir o conforto térmico, esta pode sempre reduzir as cargas térmicas a retirar pelo sistema de arrefecimento mecânico, aumentando também a eficiência energética.

A ventilação natural é maioritariamente induzida devido ao efeito do vento. Por exemplo, para um caso corrente onde existe uma diferença de 5 °C entre a temperatura interior e exterior, com uma velocidade do vento de 2 m/s, a taxa de renovação horária por efeito de vento seria 5.4 vezes superior à induzida pela diferença de temperaturas (Givoni, 1998). Como tal, devido à grande aleatoriedade do vento, a ventilação natural pode ter uma eficiência reduzida, comparativamente à ventilação mecânica. Mas, com um estudo adequado das características locais do vento, é possível otimizar a ventilação natural, de forma a obter uma solução muito vantajosa. Para tal, é imprescindível estudar o clima, numa escala global, regional, local e ao nível do microclima. Adicionalmente, no ambiente urbano é necessário atentar à diminuição da velocidade do vento até 30%, para o caso de ventos fortes ou moderados, comparativamente ao ambiente rural, devido à grande rugosidade e número de obstáculos. Outro efeito do ambiente urbano é o aumento da turbulência, até 100%, assim como, para ventos fortes, a criação de fluxos de ar com rotação ciclónica (Allard, 1998).

Concluindo, a ventilação natural pode ser uma solução bastante eficiente, mas apenas com um adequado estudo de todas as condicionantes – clima, dimensão e orientação das aberturas, forma do edifício, necessidades, etc. – é possível utilizar a ventilação natural como uma solução óptima, ou seja, é necessário desde o projecto do edifício considerar as especificidades da inclusão da ventilação natural, de forma a exponenciar o efeito deste, como é possível observar na Figura 3.17.

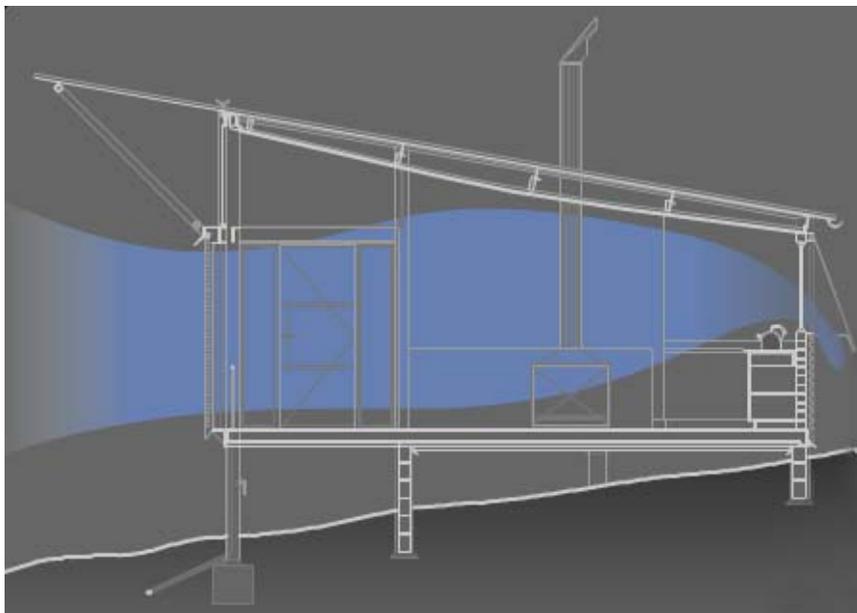


Figura 3.17 – Design para a ventilação natural. Fonte: Habitação Simpsons-Lee, desenho de Craines

3.8. ILUMINAÇÃO

A função da iluminação é tornar o ambiente visual **visível** e **adequado**, ou seja, permitir a execução das tarefas visuais necessárias, além de proporcionar conforto visual. Tal é conseguido com a Luz – parte visível do espectro electromagnético, com comprimento de onda entre os 380 a 780 nm. A luz pode ser fornecida de forma natural – luz solar – de forma artificial – lâmpadas – ou através da combinação de ambas. O ambiente visual pode ser dividido em duas componentes:

- Componente passiva – usualmente pode ser definido como o compartimento composto pelas várias superfícies e mobiliário, que reflectem a luz com maior ou menor intensidade;
- Componente activa – a luz que torna o compartimento visível.

Assim, o ambiente visual é a multiplicação destas duas componentes, como é apresentado na Figura 3.18. Como tal, é necessário atentar que para um dado ambiente, pode haver um ambiente visual diferente, dependendo da luz incidente. Uma boa iluminação, só por si, não proporciona um ambiente visual

agradável. A fraca iluminação pode causar a tensão ocular, fadiga, dor de cabeça e irritabilidade. Como tal, a avaliação da iluminação é muito importante e deve ser executada de forma *quantitativa* e *qualitativa*. Os aspectos quantitativos são relacionados com a determinação da quantidade de iluminação necessária para executar as tarefas requeridas. Os aspectos qualitativos estão relacionados com o conforto visual e podem ser avaliados em termos de encadeamento e atenção / distração dos ocupantes (Santos, 2004).

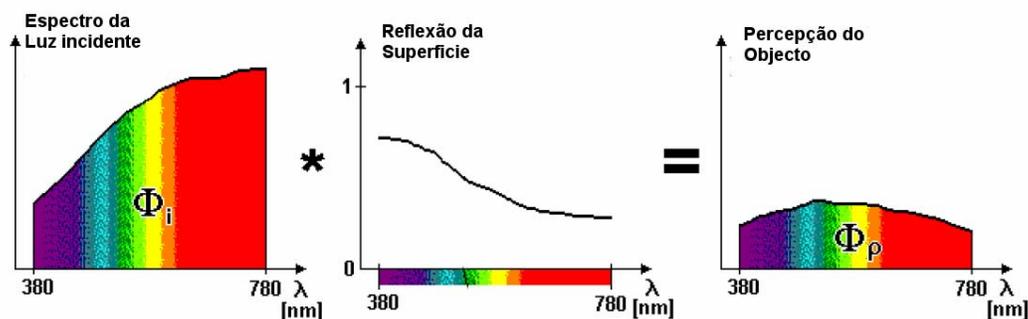


Figura 3.18 – Combinação dos componentes do ambiente visual. Fonte: Majoros, 1997

A iluminação é um assunto com grande peso no bem-estar diário das pessoas pois que o ambiente visual está intimamente ligado à vivência humana. A visão engloba cerca de 90% de toda a informação sensorial dos seres humanos. Qualquer actividade está, em maior ou menor parte, ligada à visão. Como tal, é essencial um bom projecto de iluminação para qualquer edifício.

3.7.1. PRINCÍPIOS DA ILUMINAÇÃO

A quantidade de radiação visível emitida por uma fonte de radiação é definida como **fluxo luminoso** e a sua unidade é o Lúmens (*lm*). Este é definido em termos da potência radiativa pela sensibilidade espectral do olho humano. Assim, para definir a eficiência de uma fonte luminosa, deve dividir-se o fluxo luminoso pela potência necessária. O limite teórico desta eficiência é de 683 lm/W, o que corresponde à conversão de uma luz monocromática com o comprimento de onda de 555 nm. Um dos parâmetros mais importantes é a

iluminação ou **iluminância** da superfície a ser iluminada, que se exprime em *lux* e corresponde a lm/m^2 . As iluminâncias recomendadas podem ser divididas por tarefas ou por zonas do edifício e são apresentadas na Tabela 3.7 e 3.8, respectivamente.

Tabela 3.7 – Iluminância recomendada por tarefa visual

	Iluminância Recomendada (<i>lux</i>)	Exemplos de actividades
Tarefas com poucas exigências visuais	300 - 500	máquinas de pouca precisão;
Tarefas com exigências visuais normais	500 -1000	salas de aula; gabinetes
Tarefas com exigências visuais Especiais	1000 - 2000	salas de desenho; inspecção de materiais
Tarefas com exigências visuais de elevada exactidão	3000 - 5000	fabrico de relógios; indústria electrónica;
Tarefas com exigências visuais de excepcional exactidão	5000 - 7500	micro-electrónica;
Tarefas com exigências visuais muito especiais	10000 - 20000	cirurgias;

Fonte: Santos, 2000

Tabela 3.8 – Iluminância recomendada por zona do edifício

Zona do Edifício	Iluminância recomendada (<i>lux</i>)
Zonas de passagem	50 - 100
Salas de jantar	100
Salas de estar; Cozinhas	200
Zonas de estudo	300 - 500

Fonte: Santos, 2000

Como já referido, a combinação da iluminação com as características das superfícies determina a resposta visual humana. Assim, é necessário definir um parâmetro para quantificar esta combinação de efeitos, ou seja, o fluxo luminoso emitido. Este é definido pela sua distribuição angular, em ângulo

sólido, sendo denominado por **intensidade luminosa** e a sua unidade é a *candela* (cd). O fluxo luminoso emitido por um objecto é chamado de **brilho** e a sua unidade é a *luminância*, que corresponde a:

$$\frac{\text{Iluminância (lux)} * \text{reflectância}}{\pi} \text{ (cd/m}^2\text{)}.$$

Para uma melhor avaliação do *brilho* dos objectos foi definido o **contraste**, o que representa a razão entre o brilho de uma superfície e o seu fundo imediato. O *contraste* pode ser quantificado pela razão de luminâncias ou de reflectâncias das superfícies em estudo. Para a definição de um espaço visualmente confortável nos edifícios, podem ser definidos tipos de *contraste*: um entre as superfícies da envolvente do compartimento, outro entre a superfície e o observador. Os valores recomendados do contraste são apresentados na Tabela 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 – Reflectância das superfícies recomendada

Superfícies	Reflectância Recomendada
Tectos	0.70 - 0.85
Paredes (adjacentes a fontes luminosas)	0.6 - 0.7
Paredes (restantes)	0.4 - 0.5
Pavimentos	0.15 - 0.3

Fonte: Santos, 2000

Tabela 3.10 – Razão de luminâncias recomendada

Tipo de razão	Razão de Luminâncias
Tarefa visual / ambiente	0.70 - 0.85
Tarefa visual / campo periférico	0.6 - 0.7
Fonte luminosa / espaço adjacente	0.4 - 0.5
Observados / interior em geral	0.15 - 0.3

Fonte: Santos, 2000

Um parâmetro muito utilizado na avaliação da iluminação de um compartimento (principalmente para a iluminação natural) é o **Factor Luz do Dia** (FLD). Este pode ser definido como a razão entre a luminância de um

certo ponto do espaço interior, num plano de trabalho horizontal, e a iluminância proveniente do exterior, para um céu encoberto padrão¹. Alguns valores recomendados para este parâmetro são apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – FLD recomendado para alguns tipos de espaços

Espaço	FLD (%)	
	Médio	Mínimo
Igreja	5	1
Escritório	5	22
Sala de aula	5	2
Sala de estar	1.5	0.5
Quarto de dormir	1	0.3
Cozinha	2	0.6

Fonte: A Green Vitruvius, 1999

Por último, um outro factor a controlar para um bom conforto visual é o **encadeamento**, ou seja, fontes luminosas com um *brilho* extremo que atingem o campo visual. O encadeamento é muito difícil de quantificar, sendo que pode resultar na distração dos ocupantes, e até no impedimento da realização das tarefas visuais. De forma a evitar ou reduzir o encadeamento, é necessário um adequado posicionamento das fontes de luz artificial, luminâncias adequadas das superfícies e acautelar a incidência da radiação solar directa nos olhos dos ocupantes.

3.7.2. ILUMINAÇÃO NATURAL VS ARTIFICIAL

A iluminação pode ser obtida de forma natural (luz solar), artificial (lâmpadas) ou uma combinação de ambas. Com vista à redução dos consumos energéticos dos edifícios, a iluminação natural é a melhor opção. A iluminação natural é a forma mas antiga de iluminação, mas na actualidade apenas ganhou popularidade desde a crise petrolífera. Em termos energéticos, a iluminação natural promove poupanças uma vez que não tem custos de operação, além de reduzir as necessidades de arrefecimento, devido a uma maior eficiência luminosa. Em edifícios comerciais a iluminação

¹ Céu Encoberto Padrão é definido pela *Commission International de L'Éclairage* (CIE) como um céu completamente coberto de nuvens, três vezes mais brilhante no zénite do que no horizonte e com uma iluminância mínima de 5000 lux, proporcionada por um hemisfério.

artificial pode chegar aos 33.3% da factura energética total, enquanto que em edifícios residenciais pode atingir os 25%.

Como tal, a iluminação natural pode ser um factor essencial para a eficiência energética dos edifícios. É certo que a iluminação natural, devido à sua aleatoriedade e inexistência durante a noite, não pode satisfazer todas as necessidades de iluminação, mas nos períodos que está disponível pode reduzir substancialmente os consumos energéticos subjacentes à iluminação artificial (West, 2001).

Por outro lado, a ausência de luz natural pode levar à depressão, problemas nos ossos devido à falta de vitamina D e distúrbios de sono e concentração. Em termos mais subjectivos, existem também várias razões para a preferência da iluminação natural. Em primeiro lugar, é fácil perceber que a visão humana foi desenvolvida para a luz solar. Como tal, o facto da luz natural variar ao longo do dia é um factor que proporciona conforto. Finalmente, a obtenção da iluminação natural requer, quase sempre, a inclusão de envidraçados, o que proporciona a visão para o exterior, proporcionando também conforto. Em termos profissionais, a desconcentração que pode advir do exterior, normalmente é diluída no aumento da motivação que advém da visão para o exterior.

3.7.3. PRINCÍPIOS DA ILUMINAÇÃO NATURAL

O principal elemento para fornecer a iluminação natural é o envidraçado, pelo que é necessária uma cuidadosa escolha do tamanho e forma destes, de modo a promoverem uma iluminação natural conveniente, em função da profundidade do compartimento, orientação do envidraçado, etc. Também se pode dividir os envidraçados para suprir diferentes necessidades, como por exemplo, colocar uma janela a maior altura para proporcionar a iluminação natural a maiores profundidades. Para proporcionar a vista para o exterior, pode ser colocada uma janela a uma altura mais baixa. Com o avanço científico foram criados envidraçados que permitem um maior controlo da

intensidade e propriedades ópticas da luz solar, assim como o fluxo de calor que os atravessa. Neste campo podemos inserir os envidraçados crómicos, que podem alterar a sua cor, desde transparentes até escuros, como se pode observar na Figura 3.19, controlando assim a radiação que os atravessa e prevenindo o sobreaquecimento e o encadeamento. Estes envidraçados podem dividir-se em 3 tipo: *fotocrómicos* – alteram a sua cor em função da luz incidente; *termocrómicos* - alteram a sua cor em função da temperatura; *electrocrómicos* - alteram a sua cor em função de impulsos eléctricos (A Green Vitruvius, 1999).



Figura 3.19 – Funcionamento de envidraçados electrocrómicos

Adicionalmente, existem sistemas de distribuição da iluminação natural, utilizados para proporcionar uma melhor distribuição da luz solar, ao longo do compartimento. Actualmente existem várias soluções para receber e redireccionar a luz solar, de forma a alcançar maiores profundidades no compartimento e reduzir o excesso de luminosidade perto dos envidraçados (Figura 3.20). De entre estas soluções, existem algumas que requerem mudanças arquitecturais profundas – átrios, clarabóias, poços de luz, etc; enquanto que outras podem ser aplicadas facilmente – envidraçados reflectores prismáticos, sistemas de sombreamento, etc.

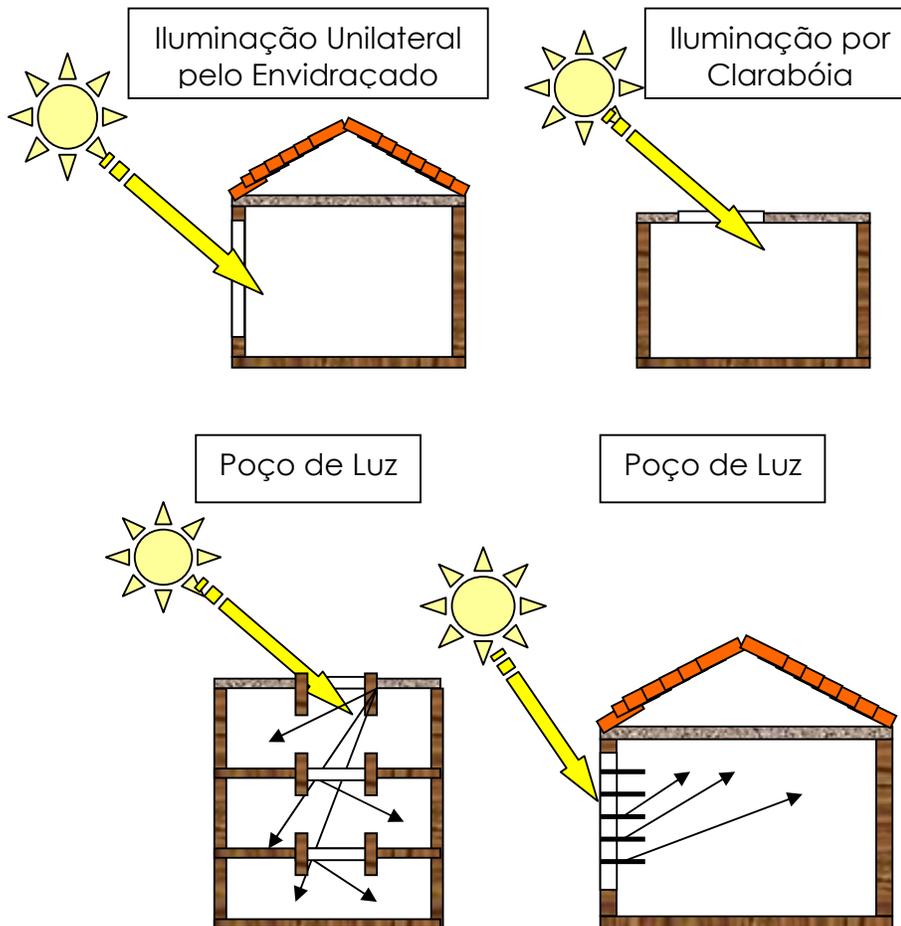


Figura 3.20 – Algumas soluções para a iluminação natural

3.7.4. PRINCÍPIOS DA ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

A iluminação artificial é obtida pela utilização de lâmpadas – aparelhos que transformam a energia eléctrica em radiação, em que parte da radiação é luz. Dependendo da forma como produzem a luz, as lâmpadas podem ser:

- *Incandescentes* – produzem a luz através da radiação produzida por um filamento aquecido pela passagem de corrente eléctrica; O material do filamento mais corrente é o tungsténio, mas actualmente o halogéneo é muito utilizado devido à sua maior eficiência. Na Figura 3.21 está representado o ciclo de conversão deste tipo de lâmpadas.

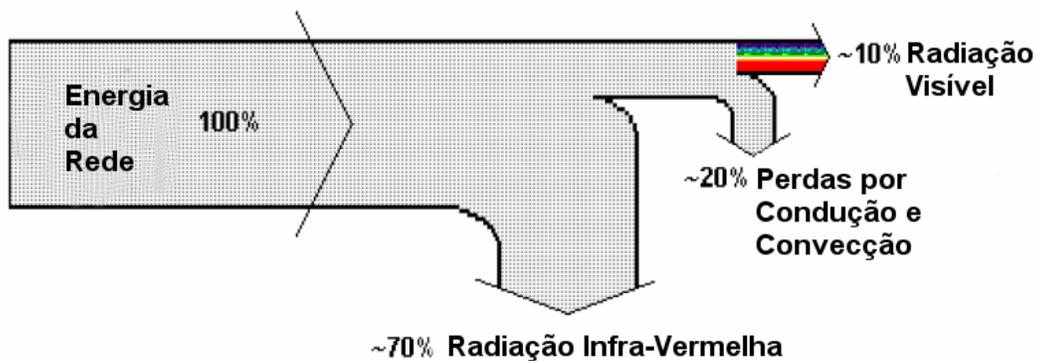


Figura 3.21 – Fluxo energético em lâmpadas incandescentes. Fonte: Majoros, 1997

- *Descarga gasosa* – é baseada em transições quânticas entre níveis energéticos discretos. Os comprimentos de onda resultantes desta transição não costumam cair nos visíveis, pelo que são utilizados revestimentos especiais para converter os comprimentos de onda. Por exemplo, os revestimentos de fósforo utilizados em lâmpadas de descarga gasosa – as chamadas lâmpadas fluorescentes. Na Figura 3.22 está representado o ciclo de conversão deste tipo de lâmpadas.

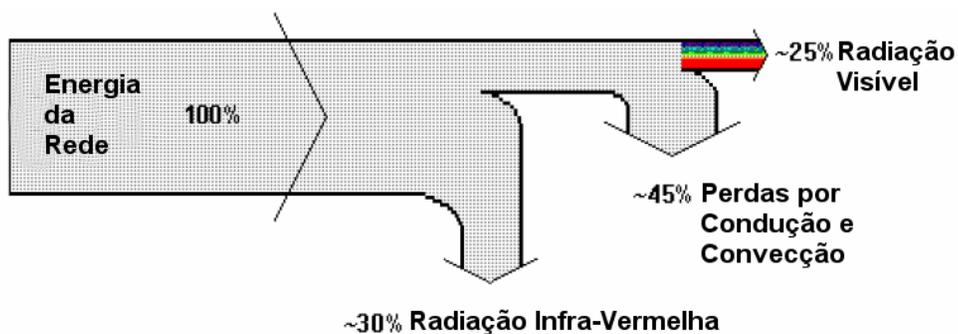


Figura 3.22 - Fluxo energético em lâmpadas de descarga gasosa. Fonte: Majoros, 1997

De forma a promover a eficiência energética, o tipo de lâmpadas a utilizar deve ser escolhido em função do tipo de requerimentos e espaços. Também é necessário ter em conta que a energia consumida na iluminação depende da potência dos equipamentos de iluminação, assim como do tempo durante o qual estão ligados. Na Tabela 3.12 são apresentadas as eficiências e utilizações de alguns tipos de lâmpadas (Majoros e Dr. Habil, 1997).

Tabela 3.12 – Propriedades de algumas fontes luminosas artificiais

Fonte Luminosa	Eficácia (lm/W)	Vida útil (h)	Utilização
Vela	0.15	+/- 24	Decorativos
Lâmpada Incandescente	tungsténio	10 - 20	Espaços de utilização eventual
	halogénio	15 - 25	Tarefas que requerem condições luminosas especiais; efeitos especiais
Lâmpada de Descarga Gasosa	Fluorescente	50 - 90	Escritórios; espaços comerciais
	Vapor de Mercúrio	50 - 60	Espaços interiores comerciais; exterior
	Sódio a alta pressão	100 - 150	Espaços interiores comerciais; exterior
	Sódio a baixa pressão	200	Exterior, especialmente em estradas

Fonte: Khedari, 2000

3.7.5. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EFICIENTE

Para um sistema de iluminação eficiente, é necessário um cuidadoso projecto, que avalie as potencialidades da iluminação natural, a escolha adequada do tipo de envidraçado, tamanho e orientação. Importa ainda aplicar lâmpadas eficientes e com a potência adequada para o espaço e para as tarefas a executar. Os critérios a seguir são a maximização da iluminação natural e utilização de um sistema de iluminação artificial de reserva com potência adequada.

Para analisarmos a iluminação natural, é necessário definir um índice de forma (K) do compartimento, como por exemplo:

Equação 3.30

$$K = \frac{W \cdot D}{(W + D) \cdot h} \text{ com;}$$

W – largura do compartimento (m);

D – profundidade do compartimento (m);

h – altura entre a superfície de trabalho e o tecto (m).

Outro factor importante é a avaliação da radiação visível que atinge a superfície de trabalho, que compreende a soma de três factores:

- Componente céu – radiação que atinge a superfície de trabalho emitida directamente pelo céu;
- Componente exterior reflectida - radiação que atinge a superfície de trabalho devido a reflexões exteriores ao compartimento;
- Componente exterior reflectida - radiação que atinge a superfície de trabalho devido a reflexões interiores ao compartimento.

Ghisi efectuou um estudo onde determina a área ideal de janela em Florianópolis (Brasil), considerando a iluminação natural e os consumos energéticos resultantes da variação da dimensão da janela. Os resultados obtidos por este estudo não podem ser directamente extrapolados para outras localizações, pois os resultados dependem da integração de vários factores (sombreador, tipo de envidraçado, etc.) e do tipo de clima. No entanto, o estudo apresenta uma metodologia para o cálculo da área de envidraçado ideal, como se pode observar na Figura 3.23, que pode ser aplicado em qualquer clima, através da modelação de um compartimento e aplicação numa ferramenta de simulação. Para o caso específico onde foi aplicada esta metodologia, atingiram-se reduções do consumo energético que chegariam aos 44% (Ghisi e Tinkerb, 2005).

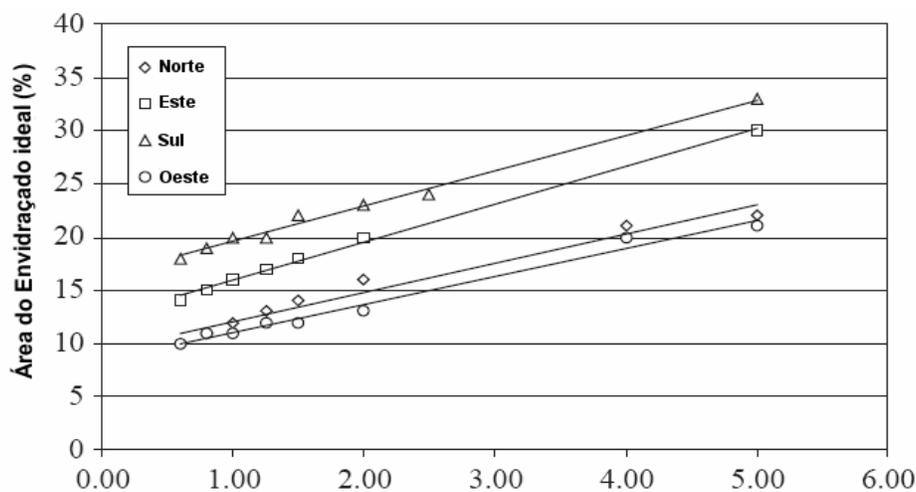


Figura 3.23 – Área de envidraçado ideal em relação à área da fachada. Fonte: Ghisi e Tinkerb, 2005.