

CONFORTO E STRESS TÉRMICO

Professor Roberto Lamberts, PhD

Atualizações: Prof. Antonio Augusto Xavier
Prof. Solange Goulart
Renata De Vecchi

LabEEE Laboratório de Eficiência Energética em
Edificações | www.labeee.ufsc.br



SUMÁRIO

1	CONFORTO TÉRMICO.....	4
1.1	INTRODUÇÃO AO CONFORTO TÉRMICO.....	4
1.1.1	Definições.....	4
1.1.2	Termorregulação humana e balanço de calor no corpo.....	5
1.1.3	Zonas de respostas fisiológicas e comportamentais.....	9
1.2	Avaliação de conforto térmico	10
1.2.1	Pesquisas em câmaras climatizadas.....	10
1.2.2	Pesquisas de campo.....	11
1.2.3	Condições de conforto térmico	12
1.2.4	Variáveis que influenciam na sensação de conforto térmico	14
1.2.5	Equação do conforto térmico e carga térmica.....	14
1.2.6	Equação do PMV.....	15
1.2.7	Desconforto Localizado.....	15
1.2.8	Influência do movimento do ar no conforto térmico	19
1.2.9	Normas de conforto térmico	20
1.3	ISO 7730/2005 - Ambientes Térmicos Moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico:.....	22
1.3.1	Escopo.....	22
1.3.2	Voto Médio Estimado - PMV.....	23
1.3.3	Percentagem de pessoas insatisfeitas - PPD.....	24
1.3.4	Aceitabilidade de ambientes térmicos visando conforto	25
1.3.5	Anexos.....	26
1.3.6	Intervalo de Temperatura Operativa (Anexo A da ISO 7730/2005).....	30
1.3.7	Critérios de Projeto para diferentes tipos de espaço – Exemplos.	32
1.3.8	Desconforto Localizado.....	32
1.3.9	Exemplo de aplicação.....	34
1.4	ISO/DIS 7726/98 - Ambientes térmicos - Instrumentos e métodos para a medição dos parâmetros físicos.....	34
1.4.1	Introdução.....	34
1.4.2	Escopo e campo de aplicação	35
1.4.3	Gerais	35
1.4.4	Instrumentos de medição	37
1.4.5	Especificações relativas aos métodos de medição	42
1.4.6	Anexo A: Medição da temperatura do ar	44
1.4.7	Anexo B: Medição da temperatura radiante média	45
1.4.8	Anexo C: Medição da temperatura radiante plana.....	54
1.4.9	Anexo D: Medição da umidade absoluta e relativa do ar	59
1.4.10	Anexo E: Medição da velocidade do ar	64
1.4.11	Anexo F: Medição da temperatura superficial	67
1.4.12	Tipos de equipamentos e sensores para medições ambientais.....	68
2	ESTRESSE (STRESS) TÉRMICO.....	73
2.1	INTRODUÇÃO.....	73
2.2	AMBIENTES QUENTES	73
2.3	AMBIENTES FRIOS	74

2.4	NORMAS DE REFERÊNCIA.....	74
2.5	ISO 7243/1989 - Ambientes quentes - Estimativa do stress por calor sobre o trabalhador, baseado no IBUTG - (bulbo úmido e temperatura de globo)	75
2.5.1	Princípios gerais	75
2.5.2	Medições das características ambientais.....	76
2.5.3	Medição ou estimativa da taxa metabólica	77
2.5.4	Especificações das medições	78
2.5.5	Período e duração das medições	80
2.5.6	Valores de referência	80
2.5.7	Relatório final de avaliação.....	82
2.5.8	Exemplo de aplicação.....	82
2.6	NR 15 - Anexo 3 - Limites de tolerância de exposição ao calor	83
2.6.1	Limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente com períodos de descanso no próprio local de prestação de serviço	84
2.6.2	Limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente, com período de descanso em outro local (local de descanso).....	85
2.6.3	Exemplo de aplicação.....	86
	Analisar a situação de stress térmico pela NR -15 da mesma condição de trabalho do item 2.5.8:	86

1 CONFORTO TÉRMICO

1.1 INTRODUÇÃO AO CONFORTO TÉRMICO

Conforto térmico, tomado como uma sensação humana, situa-se no campo do subjetivo e depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Os fatores físicos determinam as trocas de calor do corpo com o meio; já os fatores fisiológicos referem-se a alterações na resposta fisiológica do organismo, resultantes da exposição contínua a determinada condição térmica; e finalmente os fatores psicológicos, que são aqueles que se relacionam às diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, frutos da experiência passada e da expectativa do indivíduo.

Os estudos em conforto térmico visam principalmente analisar e estabelecer as condições necessárias para a avaliação e concepção de um ambiente térmico adequado às atividades e ocupação humanas, bem como estabelecer métodos e princípios para uma detalhada análise térmica de um ambiente. A importância do estudo de conforto térmico está baseada principalmente em 3 fatores:

- a) A **satisfação** do homem ou seu bem-estar em se sentir termicamente confortável;
- b) A **performance humana**, muito embora os resultados de inúmeras investigações não sejam conclusivos a esse respeito, e a despeito dessa inconclusividade, os estudos mostram uma clara tendência de que o desconforto causado por calor ou frio reduz a performance humana. As atividades intelectuais, manuais e perceptivas, geralmente apresentam um melhor rendimento quando realizadas em conforto térmico.
- c) A **conservação de energia**, pois devido à crescente mecanização e industrialização da sociedade, as pessoas passam grande parte de suas vidas em ambientes condicionados artificialmente. Ao conhecer as condições e os parâmetros relativos ao conforto térmico dos ocupantes em seus ambientes, evitam-se desperdícios com calefação e refrigeração, muitas vezes desnecessários.

Convém ressaltar que devido à variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos os ocupantes do ambiente se sintam confortáveis termicamente, buscando-se sempre criar condições de conforto para um grupo, ou seja, condições nas quais a maior porcentagem das pessoas estejam em conforto térmico.

1.1.1 Definições

Para melhor entender os assuntos subsequentes a respeito de conforto térmico, é necessário apresentar alguns conceitos e definições de conforto e neutralidade térmica:

Conforto térmico

Segundo a ASHRAE Standard 55 conforto térmico é definido como “*A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico*”.

Neutralidade Térmica

Segundo o pesquisador dinamarquês Ole Fanger (1970), neutralidade térmica é “A condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente a seu redor”.

De acordo com Shin-Iche Tanabe (1984), “Neutralidade Térmica é a condição da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”.

Analisando-se dentro de uma ótica física dos mecanismos de trocas de calor, sugere-se uma definição para neutralidade térmica como sendo “O estado físico no qual todo o calor gerado pelo organismo através do metabolismo seja trocado em igual proporção com o ambiente ao seu redor, não havendo nem acúmulo de calor e nem perda excessiva do mesmo, mantendo a temperatura corporal constante”.

Considerando essas definições, pode-se dizer que a neutralidade térmica é uma condição necessária, mas não suficiente, para que uma pessoa esteja em conforto térmico. Um indivíduo que estiver exposto a um campo assimétrico de radiação pode muito bem estar em neutralidade térmica, porém não estará em conforto térmico.

Como o corpo humano é um sistema termodinâmico, que produz calor e interage continuamente com o ambiente para alcançar o balanço térmico, existe uma constante troca de calor entre o corpo e o meio, regidas pelas leis da física e influenciadas pelos mecanismos de adaptação fisiológica, condições ambientais e fatores individuais. A sensação de conforto térmico está diretamente relacionada ao esforço realizado pelo organismo para manter o balanço térmico e assim sendo, se faz necessário conhecer a termorregulação humana e o balanço térmico do corpo humano.

1.1.2 Termorregulação humana e balanço de calor no corpo

Podemos considerar o corpo humano como uma “máquina térmica” que dispõe de um mecanismo termorregulador que controla as variações térmicas do organismo. Sendo o organismo humano homotérmico, isto é, sua temperatura deve permanecer praticamente constante, o mecanismo termorregulador cria condições para que isso ocorra.

Entende-se por “máquina térmica” aquela que necessita de certa quantidade de calor para seu funcionamento. O funcionamento do corpo humano é a condição na qual o mesmo se encontra para que esteja apto a desempenhar suas atividades, que podem ser subdivididas em 2 categorias: *Atividades basais internas*, que são aquelas independentes de nossa vontade e suficientes para fazer com que os órgãos de nosso corpo funcionem a contento, e as *atividades externas*, que são aquelas realizadas conscientemente pelo homem através de seu trabalho ou atividade desempenhada.

Para ter condições de desempenhar qualquer uma das atividades citadas, nosso organismo necessita do calor que é oriundo do metabolismo dos alimentos ingeridos e que também pode ser subdividido em 2 categorias: *Metabolismo basal*, que é a taxa de calor necessária para o desempenho das atividades basais, e *metabolismo devido às atividades externas*, que é a taxa de calor necessária para o desempenho das atividades.

O calor gerado pelo organismo pode variar de 100W a 1.000W. Uma parte desse calor gerado é necessário, como já dito, para o funcionamento fisiológico do organismo e a outra parte é gerada devido ao desempenho das atividades externas, sendo que essa geração deve ser dissipada para que não haja um superaquecimento do corpo, já que o mesmo é homotérmico. A temperatura interna do corpo humano é praticamente constante, variando aproximadamente de 35 a 37°C.

Para que uma pessoa esteja em estado de conforto térmico no desempenho das atividades, admitem-se pequenas oscilações nessa temperatura interna, sendo que em situações mais extremas admitem-se variações um pouco maiores, para se evitarem os perigos do stress térmico.

Desta maneira podemos dizer que as atividades desempenhadas pelo ser humano geram calor ao corpo, o qual deve ser dissipado ao ambiente a fim de que não se acarrete um aumento exagerado da temperatura interna e que se mantenha o equilíbrio térmico do corpo. Essa dissipação se dá através de mecanismos de trocas térmicas, que podem ser observados na Figura 1.1.

Através da pele: Perda sensível de calor, por **convecção e radiação (C e R)**;
Perda latente de calor, por **evaporação** do suor e por **dissipação** da umidade da pele (E_{sw} e E_{dif}).

Através da respiração: Perda sensível de calor: **convecção (C_{res})**;
Perda latente de calor: **evaporação (E_{res})**.

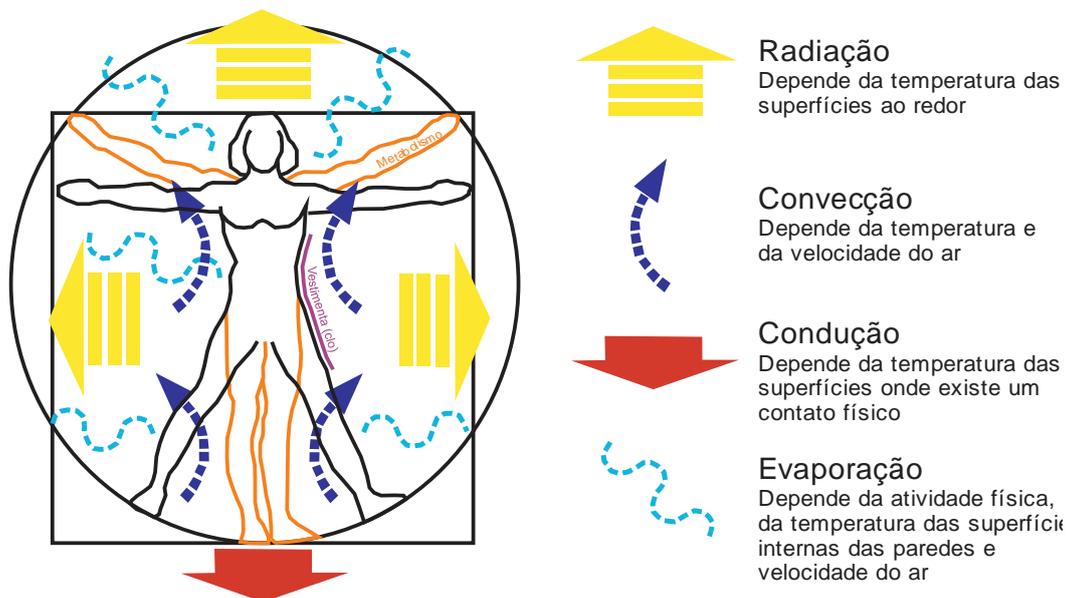


Figura 1.1- Representação esquemática da fisiologia humana e a trocas térmicas.

O mecanismo termorregulador do organismo tem como objetivo a manutenção da temperatura corporal, mantendo-a constante. Assim sendo, a teoria assume que um organismo exposto por longo tempo a um ambiente térmico constante, moderado, tenderá a um equilíbrio térmico de acordo com esse ambiente, isto é, a produção de calor pelo organismo através de seu metabolismo, será igual à perda de calor do mesmo para o ambiente, através das diversas formas de transferência de calor.

A maioria dos modelos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente, bem como as medições de sensações térmicas, está relacionada à clássica teoria de transferência de

calor, introduzindo equações empíricas que descrevem os efeitos de conhecidos controles reguladores fisiológicos.

O modelo utilizado na Norma Internacional ISO 7730 utiliza o “estado estacionário” ou “permanente” desenvolvido por Fanger, o qual assume que o corpo em determinado ambiente, encontra-se em estado de equilíbrio não ocorrendo, portanto, acúmulo de calor em seu interior. O corpo assim modelado encontra-se bem próximo à condição de neutralidade térmica.

O ganho de calor no corpo se dá através de produção de calor pelo metabolismo, e as perdas de calor se sucedem através da respiração e pela pele. As perdas de calor, de maneira sensível e latente pela pele e pela respiração, são expressas em termos de fatores ambientais. As expressões também levam em conta a resistência térmica e a permeabilidade das roupas. Variáveis tanto **ambientais** tais como a temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar e **variáveis pessoais**, como a atividade e vestimentas, são incorporadas ao modelo.

A expressão do balanço de energia entre o corpo e o ambiente pode assim ser descrita:

$$M - W = Q_{SK} + Q_{RES} \quad \text{[Equação 1]}$$

As perdas de calor pela pele (Q_{sk}) e respiração (Q_{res}) também são expressas em forma de mecanismos de perda de calor como **convecção, radiação e evaporação**, e assim atinge-se a expressão dupla que representa o balanço de calor para um corpo em estado estacionário:

$$M - W = Q_{SK} + Q_{RES} = (C + R + E_{SK}) + (C_{RES} + E_{RES}) \quad \text{[Equação 2]}$$

onde:

M = Taxa metabólica de produção de calor (W/m^2);

W = Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo (W/m^2), sendo que para a maioria das atividades humanas esse trabalho é nulo;

Q_{sk} = Taxa total de perda de calor pela pele (W/m^2). Igual à perda de calor pela evaporação pela pele mais a condução de calor da pele até a superfície externa das roupas, podendo ser escrita como: $Q_{sk} = E_{sk} + K_{Cl}$

Q_{res} = Taxa total de perda de calor pela respiração (W/m^2);

$C+R$ = Perda de calor sensível pela pele (W/m^2) - Convecção e radiação. Seu valor é igual à perda de calor por condução até a superfície externa das roupas;

E_{sk} = Perda de calor latente pela pele, através da evaporação (W/m^2);

C_{res} = Perda de calor sensível pela respiração, por convecção (W/m^2);

E_{res} = Perda de calor latente pela respiração, por evaporação (W/m^2).

Assim, a expressão do balanço térmico pode ser reescrita:

$$(M - W) - C_{RES} - E_{SK} - E_{RES} = K_{Cl} = C + R \quad \text{[Equação 3]}$$

OBS: Todos os termos da equação anterior são dados em termos de energia por unidade de área, e os mesmos referem-se à área da superfície do corpo nu. Uma expressão convencional para o cálculo dessa área é dada através da expressão da área de DuBois (A_D).

$$A_{Du} = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad \text{[Equação 4]}$$

onde:

A_{du} = área superficial do corpo, ou área de DuBois (m^2);

m = massa do corpo (kg);

l = altura do corpo (m).

As perdas parciais de calor pela pele pela respiração e por condução através das roupas podem ser expressas pelas equações empíricas seguintes, numeradas de 5 a 10.

$$E_{sk} = 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] + 0,42[(M - W) - 58,15] \quad \text{[Equação 5]}$$

$$E_{res} = 0,0173M(5,87 - p_a) \quad \text{[Equação 6]}$$

$$C_{res} = 0,0014M(34 - t_a) \quad \text{[Equação 7]}$$

$$K_{cl} = \frac{[35,7 - 0,028(M - W)] - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} \quad \text{[Equação 8]}$$

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \quad \text{[Equação 9]}$$

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad \text{[Equação 10]}$$

Ao substituírmos essas expressões na equação dupla do balanço térmico, o mesmo pode ser expresso em função das variáveis ambientais e pessoais, conforme a equação a seguir:

$$(M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) =$$

$$= \frac{[35,7 - 0,028(M - W)] - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} =$$

$$= 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad \text{[Equação 11]}$$

onde:

M = taxa metabólica, produção orgânica de calor (W/m^2);

W = Trabalho ou eficiência mecânica (W/m^2);

p_a = Pressão de vapor no ar (kPa);

t_a = Temperatura do ar ($^{\circ}C$);

t_{cl} = temperatura superficial das roupas ($^{\circ}C$);

I_{cl} = Isolamento térmico das roupas (Clo);

f_{cl} = Razão de área do corpo vestido e corpo nú (adimensional);

t_r = Temperatura radiante média ($^{\circ}C$);

h_c = Coeficiente de convecção entre ar e roupas ($W/m^2.^{\circ}C$).

A equação apresentada acima representa o balanço de calor entre o corpo e o ambiente. Nessa equação a temperatura superficial das roupas é dada ao compararmos a parte central com a direita da equação dupla, ou seja:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028.M - 0,155.I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$$

[Equação 12]

onde:

$h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25}$ ou $h_c = 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}}$ (utiliza o maior)

sendo v_{ar} = velocidade relativa do ar, em m/s, dado por: $v_{ar} = v_a + 0,0052(M-58)$

$f_{cl} = 1,00 + 0,2 \cdot I_{cl}$ para $I_{cl} \leq 0,5$ Clo

e

$f_{cl} = 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl}$ para $I_{cl} > 0,5$ Clo.

* A Equação acima é calculada iterativamente.

1.1.3 Zonas de respostas fisiológicas e comportamentais

As pessoas apresentam zonas de respostas fisiológicas e comportamentais de acordo com as condições a que estiverem submetidas e, de acordo com a atividade que estiverem desempenhando. Como na maioria dos estudos de conforto térmico, as atividades desempenhadas são do tipo sedentárias, e o fator humano de influência sobre a determinação da zona de conforto é a vestimenta utilizada. Pode-se então apresentar 2 zonas de conforto, para pessoas vestidas e pessoas nuas, em função da temperatura do ar:

Para pessoas nuas: Zona de conforto para que se mantenha o equilíbrio térmico situa-se entre $29^{\circ}C$ e $31^{\circ}C$;

Para pessoas vestidas com vestimenta normal de trabalho (Isolamento = 0,6 clo): Zona de conforto para que se mantenha o equilíbrio térmico situa-se entre 23° e $27^{\circ}C$.

Cada indivíduo possui uma temperatura corporal neutra, descrita como aquela em que o mesmo não prefira sentir nem mais frio e nem mais calor no ambiente (neutralidade térmica) e nem necessite utilizar seu mecanismo de termorregulação. Ao

compararmos a temperatura interna corporal com essa temperatura neutra, podemos apresentar as seguintes zonas de respostas fisiológicas e comportamentais:

* $t_{corpo} < t_{neutra}$	Ocorre neste caso o mecanismo de vaso constrição;
* $t_{corpo} < 35^{\circ}C$	Ocorre a perda de eficiência (habilidade);
* $t_{corpo} < 31^{\circ}C$	Esta situação de temperatura corporal é letal.

Da mesma forma:

* $t_{corpo} > t_{neutra}$	Ocorre neste caso o mecanismo de vaso dilatação;
* $t_{corpo} > 37^{\circ}C$	Inicia-se o fenômeno do suor;
* $t_{corpo} > 39^{\circ}C$	Inicia-se a perda de eficiência;
* $t_{corpo} > 43^{\circ}C$	Esta situação de temperatura corporal é letal.

1.2 AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

Ao estudar os aspectos relativos ao conforto térmico, são encontradas duas abordagens diferentes e com prescrições distintas de como as condições microclimáticas das edificações podem ser administradas. A primeira, mais conhecida como estática, representa uma linha analítica, ou racional, da avaliação das sensações térmicas humanas e considera o homem como um simples receptor passivo do ambiente térmico. Já a segunda abordagem, conhecida como adaptativa, considera o homem como um agente ativo, que interage com o ambiente em resposta às suas sensações e preferências térmicas. Tais abordagens são resultados de dois grandes grupos de pesquisas normalmente utilizados nos estudos de conforto térmico, sendo a primeira realizada em câmaras climatizadas e chamada de modelo estático, e a segunda, proveniente de estudos de campo, é conhecida como modelo adaptativo.

1.2.1 Pesquisas em câmaras climatizadas

Os estudos em câmaras climatizadas deram origem ao método mais conhecido para avaliação de conforto térmico e são aqueles realizados no interior de ambientes totalmente controlados pelo pesquisador, onde tanto as variáveis ambientais como as variáveis pessoais ou subjetivas são manipuladas, a fim de se encontrar a melhor combinação possível entre elas, resultando em uma situação confortável.

Ole Fanger (1970), que realizou diversos experimentos na Dinamarca sobre conforto térmico, é o principal representante da linha analítica de avaliação das sensações térmicas humanas. Suas equações e métodos têm sido utilizados mundialmente e serviram de base para a elaboração de Normas Internacionais importantes, fornecendo subsídios para o equacionamento e cálculos analíticos de conforto térmico e conhecidos hoje como PMV (*Predicted Mean Vote*) e o PPD (*Percentage of Dissatisfied*).

Posteriormente, a utilização do modelo estático desenvolvido por O. Fanger como um modelo universal se tornou discutível, já que a mesma analisa os limites confortáveis de temperatura como sendo “limites universais”, e os efeitos de um determinado ambiente térmico acontecem exclusivamente pelas trocas físicas de calor com a superfície do corpo, enquanto que a manutenção da temperatura interna de um indivíduo necessita de certa resposta fisiológica.

“... Para dado nível de atividade, a temperatura média da pele (t_{sk}) e a taxa de secreção do suor (E_{sw}) podem ser consideradas como as únicas variáveis fisiológicas que influem sobre o equilíbrio de calor na equação do conforto térmico...”

(Fanger, 1970)

1.2.2 Pesquisas de campo

Com o avanço das pesquisas, muitos estudos foram realizados não só em câmaras climatizadas, mas também em situações reais do cotidiano, com pessoas desempenhando suas atividades rotineiras. Nestas pesquisas de campo o pesquisador não interfere nas variáveis ambientais e pessoais, e as pessoas expressam suas sensações e preferências térmicas de acordo com escalas apropriadas.

A partir desta avaliação da sensação térmica em ambientes reais, Michael Humphreys (1979) propôs o modelo adaptativo, supondo que as pessoas adaptam-se diferentemente ao lugar onde estão sendo as ações adaptativas uma forma de ajuste do corpo ao meio térmico.

“... A temperatura de conforto não é uma constante, e sim varia de acordo com a estação, e temperatura a que as pessoas estão acostumadas...”

(Humphreys, 1979)

De acordo com Humphreys, o interesse pelo modelo adaptativo pode ser identificado por duas razões principais. A primeira por ter sido identificado que os resultados obtidos em câmaras climatizadas divergem dos valores conseguidos nos ambientes climatizados naturalmente (Figura 1.2), e a segunda pela constatação de que a população parece aceitar um intervalo de temperaturas muito maior do que a proposta pelos métodos racionais, já que o indivíduo se adapta ao lugar em que vive.

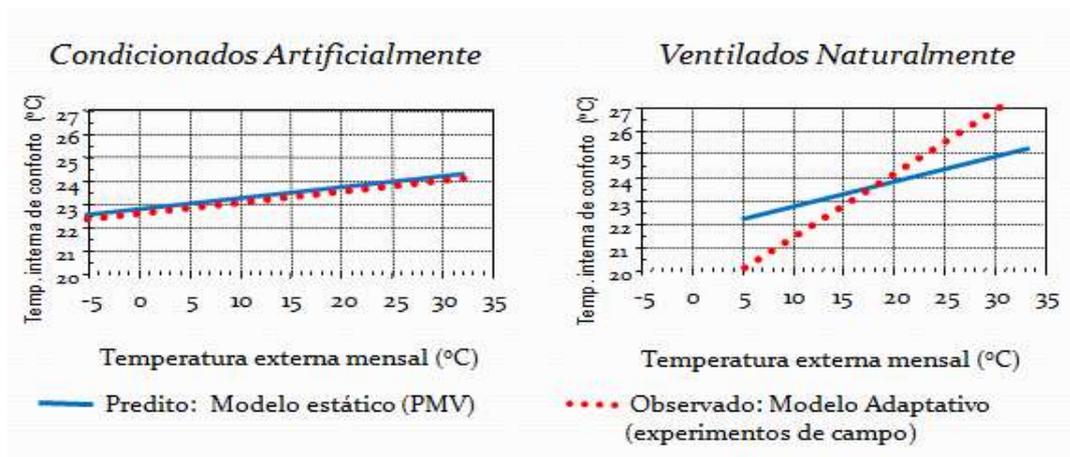


Figura 1.2 - Método adaptativo derivado do banco de dados da ASHRAE.

Pode-se afirmar que a abordagem adaptativa considera fatores além dos físicos e psicológicos que interagem na percepção térmica. Estes estudos têm como base os conceitos de aclimação, e os fatores considerados podem incluir características inerentes à demografia (gênero, idade, classe social), contexto (composição da edificação, estação, clima) e cognição (atitudes, preferências e expectativas). São três os mecanismos de adaptação utilizados pelo corpo humano para se defender dos efeitos do clima:

- Ajustes comportamentais: são as modificações conscientes ou inconscientes das pessoas; podem modificar o fluxo de calor e massas que governam as trocas térmicas do corpo. Estes ajustes podem ainda ser divididos em subcategorias, conhecidos como os ajustes pessoais (roupa, atividade, postura), ajustes tecnológicos ou ambientais (abrir/fechar janelas, ligar ventiladores, usar óculos escuros) e os ajustes culturais.
- Ajustes Fisiológicos: são aqueles que incluem todas as mudanças nas respostas fisiológicas das pessoas, que são resultado da exposição a fatores ambientais e térmicos, conduzindo a uma diminuição gradual na tensão criada por tal exposição. As mudanças fisiológicas podem ser divididas em: adaptação genética, que são aquelas que se tornaram parte da herança genética de um indivíduo ou grupo de pessoas; e a aclimação, que são as mudanças inerentes ao sistema termo-regulador.
- Ajustes Psicológicos: percepções e reações das informações sensoriais. A percepção térmica é diretamente atenuada por sensações e expectativas ao clima interno. Esta forma de adaptação pode ser comparada à noção de hábito, exposição repetida ou crônica, que conduz a uma diminuição da intensidade da sensação evocada anteriormente.

É importante frisar que para esta abordagem, a sensação de conforto térmico não deveria ser originada apenas pela temperatura do ambiente interno, mas também originada de um valor médio mensal de temperatura externa, pois o desconforto térmico surge principalmente da contradição entre os ambientes que as pessoas esperam e os ambientes que elas encontram. Este processo pressupõe uma adaptação para cada lugar, delimitando um tipo de projeto que leva em consideração a questão social, o clima e a temperatura externa. O desconforto pode ser causado pelo desgaste excessivo do corpo nos processos de escolha e ajuste da temperatura própria ao clima exterior. Segundo Humphreys, “... *O desconforto é causado pela excessiva regulação necessária nos processos de ajuste ao lugar, pela temperatura corporal...*”.

Embora vários estudos defendam a abordagem adaptativa como uma ferramenta ideal para a avaliação precisa do conforto humano em relação à temperatura, as duas correntes de pesquisa acabam por possuir o mesmo objetivo final: buscar as condições que mais satisfazam o homem com relação às suas sensações térmicas.

1.2.3 Condições de conforto térmico

Conforme já comentado anteriormente, a condição de neutralidade térmica, ou seja, a verificação do balanço térmico apresentado, é condição **necessária**, mas **não suficiente** para que uma pessoa encontre-se em conforto térmico, pois a mesma pode encontrar-se em neutralidade térmica e estar sujeito a algum tipo de desconforto localizado, isto é, sujeita à uma assimetria de radiação significativa, sujeita a alguma corrente de ar localizada, ou ainda estar sobre algum tipo de piso frio ou aquecido, e assim sendo, não estar em condição de conforto térmico.

Além disso, segundo estudos empíricos desenvolvidos por Fanger, a Atividade desempenhada pela pessoa, regulará a temperatura de sua pele, bem como sua taxa de secreção de suor. Isso equivale a dizer que se uma pessoa estiver desempenhando determinada atividade, e estiver suando muito acima do que os estudos realizados mostraram que deveria estar, ou a temperatura de sua pele estiver acima ou abaixo de

valores que esses mesmos estudos demonstraram, a pessoa não estará certamente em conforto térmico, mesmo que ela esteja em neutralidade térmica e não esteja sujeita a algum tipo de desconforto localizado. Esses estudos então realizados mostraram que:

$$a < t_{skm} < b$$

$$c < E_{sw} < d$$

onde:

t_{skm} = temperatura da pele, (°C)

E_{sw} = taxa de evaporação do suor, (W/m²)

a, b, c, d = parâmetros empíricos extraídos em função da atividade da pessoa.

Segundo a ASHRAE Fundamentals, cap. 8, as correlações estatísticas utilizadas por Rohles e Nevins em aproximadamente 1600 estudantes, apresentaram expressões para t_{skm} e E_{sw} , em função da atividade, que forneciam conforto térmico, quando as outras condições estivessem estabelecidas, as quais são apresentadas abaixo:

$$t_{skm} = 35,7 - 0,0275.M \quad \text{[Equação 13]}$$

$$E_{sw} = 0,42.(M - 58,15) \quad \text{[Equação 14]}$$

Podemos então desta forma dizer que existem 3 condições para que se possa atingir o conforto térmico:

- a) *Que a pessoa se encontre em neutralidade térmica;*
- b) *Que a temperatura de sua pele, e sua taxa de secreção de suor, estejam dentro de certos limites compatíveis com sua atividade;*
- c) *Que a pessoa não esteja sujeita a desconforto localizado.*

Podemos representar esquematicamente as condições necessárias para a obtenção de conforto térmico, conforme a figura 1.3.2.

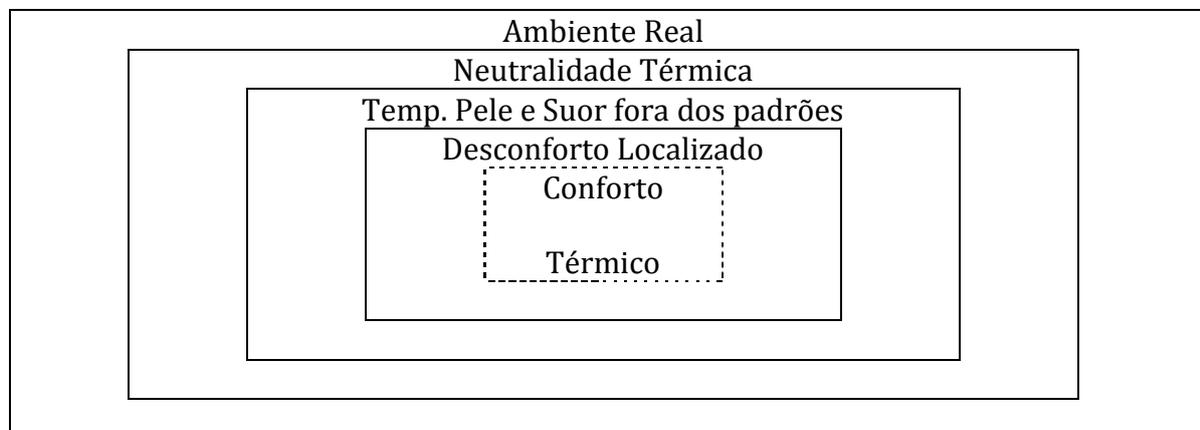


Figura 1.3 - Representação esquemática das condições necessárias a obtenção de conforto térmico.

1.2.4 Variáveis que influenciam na sensação de conforto térmico

Os cálculos analíticos do conforto térmico baseados em estudos realizados em câmaras climatizadas, apresentam 6 variáveis que influenciam o conforto térmico:

Atividade desempenhada, M , (W/m^2);
Isolamento térmico das roupas utilizadas, I_{cl} , (clo);
Temperatura do ar ($^{\circ}C$);
Temperatura radiante média, t_{rm} , ($^{\circ}C$);
Velocidade do ar, v_a , (m/s);
Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente, p_a , (kPa).

As duas primeiras variáveis são chamadas “*personais ou subjetivas*”, por não dependerem do ambiente, enquanto as outras são denominadas de variáveis “*ambientais*”. As respectivas caracterizações das variáveis ambientais, métodos e instrumentos de medição estão contidos na ISO/DIS 7726/98.

A atividade desempenhada pela pessoa determina a quantidade de calor gerado pelo organismo. As tabelas de taxas metabólicas em função da atividade e do isolamento das roupas estão na ISO 7730/2005, ASHRAE Fundamentals cap.8 - 2005 e ISO 8996/2004.

O isolamento térmico das roupas é determinado através de medições em manequins aquecidos ou determinados diretamente pelas tabelas constantes da ISO 7730/2005, ASHRAE Fundamentals cap.8 - 2005 e ISO 9920/2007.

1.2.5 Equação do conforto térmico e carga térmica

Também oriunda da equação do balanço térmico [Equação 11], ao compararmos a parte da esquerda da equação com sua parte da direita, temos a “*equação de conforto térmico*” conforme conceituação de Fanger, contida na ISO 7730/94 e ASHRAE Fundamentals cap. 8. Ao nosso entender, o termo mais apropriado seria “*equação de neutralidade térmica*”, uma vez que essa equação apresenta um rearranjo da expressão do balanço térmico, e não uma sensação psicofisiológica do conforto. Também ao nosso entender, o termo de “*equação do conforto térmico*” seria mais apropriado ao que as normas citadas denominam de “*equação do PMV*”, conforme será apresentado no item 1.2.6. De acordo com as normas, então a equação de conforto térmico é assim representada:

$$M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

[Equação 15]

Em casos em que não se verifique a expressão de balanço térmico, isto é, em casos em que a geração de calor orgânico não seja igual à dissipação desse calor ao ambiente, existirá um gradiente de calor, e a essa diferença entre o calor gerado pelo corpo e o trocado com o meio ambiente é denominada de “*carga térmica sobre o corpo*”, (L). Escrevendo sua expressão em linguagem matemática, a carga térmica é expressa por:

$$L = M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

[Equação 16]

1.2.6 Equação do PMV

A equação de conforto térmico [Equação 15], apresentada anteriormente, foi expandida para englobar uma grande gama de sensações térmicas, para o que foi utilizado o índice PMV ou voto médio estimado, através de análises estatísticas de acordo com resultados obtidos por Fanger em estudos na Dinamarca em câmaras climatizadas, onde as pessoas registravam seus votos sobre a escala sétima da ASHRAE, que aponta desde muito frio até muito quente. A sensação real sentida pela pessoa é representada pela “*equação do PMV*” ou equação do voto médio estimado, que pode assim ser representada.

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L$$

[Equação 17]

onde:

PMV = voto médio estimado, ou voto de sensação de conforto térmico

M = Atividade desempenhada pelo indivíduo

L = Carga Térmica atuante sobre o corpo.

A escala sétima da ASHRAE, ou escala de sete pontos, utilizada nos estudos de Fanger e utilizada até hoje para determinação real das sensações térmicas das pessoas, é assim representada:

+3		Muito Quente
+2		Quente
+1		Levemente Quente
0		Neutro
-1		Levemente Frio
-2		Frio
-3		Muito Frio

1.2.7 Desconforto Localizado

Vários fatores podem causar desconforto localizado em indivíduos, estejam eles desempenhando quaisquer atividades. Esses fatores, como diz o próprio nome, não atingem o corpo como um todo, apenas uma parte e, embora a pessoa possa estar

satisfeita com a temperatura do corpo como um todo, normalmente está se sentindo incomodada, não estando dessa forma em conforto. Dentre os principais fatores que causam esse desconforto, podemos citar os 4 mais comuns:

1.2.7.1 Assimetria de Radiação Térmica

A assimetria de radiação térmica ou radiação não uniforme pode ser causada por janelas frias, superfícies não isoladas, bocas de fornos, calor gerado por máquinas e outros. A pessoa dessa maneira tem uma parte do seu corpo atingida por radiação diferenciada das demais, e dessa forma quanto maior for esse diferencial, mais desgostosa com a situação ficará a pessoa conforme mostraram estudos realizados com esse intuito. Os estudos realizados tiveram a preocupação de fazer com que as pessoas se mantivessem em neutralidade térmica, para assim analisassem apenas o fenômeno em questão.

Observou-se que quanto mais acentuada era a assimetria, mais pessoas encontravam-se insatisfeitas com o ambiente. Observou-se também que as pessoas respondem de maneira diferenciada com relação ao que está causando essa assimetria, conforme Figura 1.1. A análise da assimetria de radiação é particularmente importante quando se buscam alternativas térmicas baseadas principalmente em painéis resfriados ou aquecidos para se buscar o conforto térmico. A figura ilustra ainda situações diferenciadas de assimetria de radiação que são fatores de insatisfação com o ambiente térmico (Fonte ISO 7730-2005)

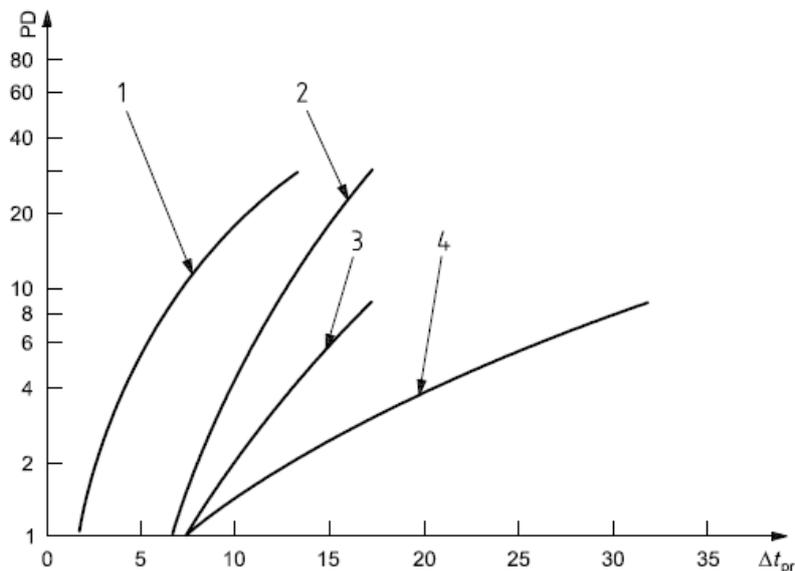


Figura 1.4 - Percentagem de pessoas expressando desconforto devido à assimetria de radiação.

Onde:

Δt = assimetria de temperatura radiante

1 - Teto quente

2 - Parede Fria

3 - Teto frio

4 - Parede quente

1.2.7.2 Correntes de ar

Essa situação que acarreta um resfriamento localizado em alguma parte do corpo humano é causada pelo ar em movimento. É um problema bastante comum de ser observado não apenas em ambientes ventilados, mas também em automóveis, e outros. Essas correntes de ar têm sido identificadas como um dos fatores mais incômodos em escritórios. Normalmente quando isso ocorre, a reação natural das pessoas é aumentar a temperatura interna ou parar o sistema de ventilação, sendo que às vezes essas reações podem tender a deixar o local ainda mais desconfortável.

Notou-se por estudos realizados que as pessoas suportam esses golpes de maneira diferenciada, conforme a temperatura que se encontra o ambiente. A Figura 1.5 mostra o aumento das pessoas insatisfeitas com o ambiente à medida que se aumenta a velocidade média do ar sobre a região da cabeça. A figura apresenta ainda as situações de desconforto devido às correntes de ar para diferentes temperaturas do ar.

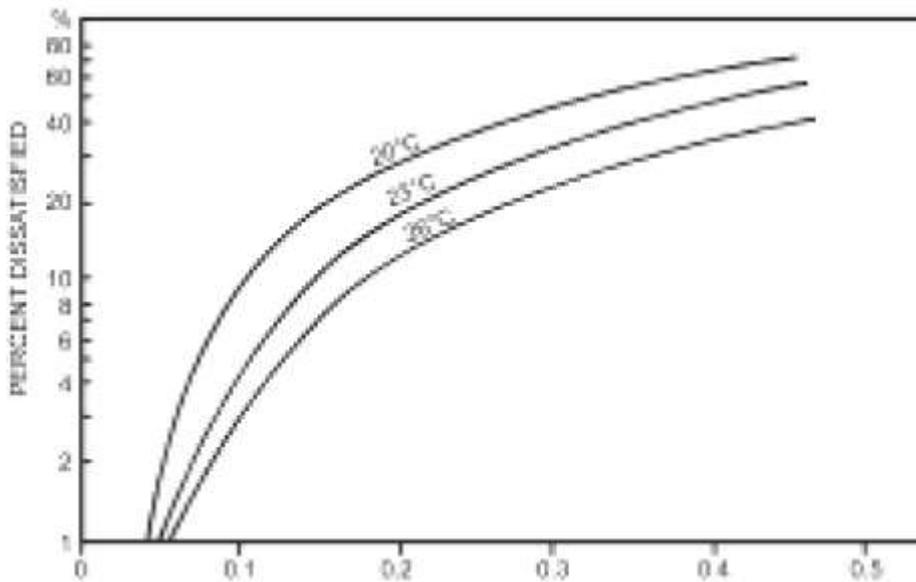


Figura 1.5 - Percentagem de pessoas insatisfeitas, devido às correntes de ar.

1.2.7.3 Diferença na temperatura do ar no sentido vertical

Na maioria dos ambientes das edificações, a temperatura do ar normalmente aumenta com a altura em relação ao piso. Se o gradiente de temperatura é suficientemente grande entre a temperatura do ar ao nível da cabeça e a temperatura do tornozelo, ocorre desconforto por calor na altura da cabeça ou um desconforto por frio ao nível dos pés, estando o corpo como um todo em neutralidade térmica.

Embora tenham poucos estudos sobre esse desconforto, algumas situações foram relatadas por Olesen, McNair e Erikson, conforme mostra a figura 1.3.5. Se a temperatura ao nível da cabeça for inferior ao do tornozelo, essa situação não causará desconforto às pessoas. Erikson mostrou que as pessoas são mais tolerantes quando a cabeça estiver mais fria.

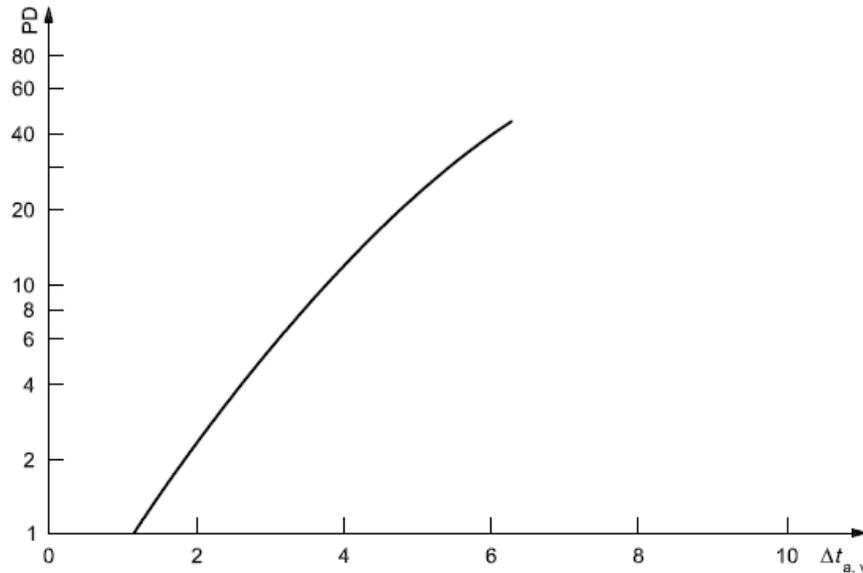


Figura 1.6 - Percentagem de pessoas insatisfeitas devido à diferença de temperatura entre a cabeça e pés. (Fonte ISO 7730-2005)

1.2.7.4 Pisos aquecidos ou resfriados

Devido ao contato direto dos pés com o piso, o desconforto local nos pés pode ser verificado quando o piso estiver aquecido ou resfriado. A temperatura do piso é muito influenciada por características construtivas dos prédios (isolamento do piso, camada de contrapiso, materiais de construção etc.). Uma reação normal das pessoas em contato com piso muito frio, é aumentar a temperatura interna do ambiente, geralmente utilizando-se sistemas de calefação, o que possibilita o aumento do desconforto térmico e contribui para o aumento do consumo de energia.

Em alguns estudos referentes à resposta das pessoas com relação à temperatura do piso, Olesen encontrou que quando as pessoas encontram-se calçadas normalmente, o material de acabamento do piso não é importante, porém em locais onde normalmente as pessoas encontram-se descalças, esse item já se torna significativo. Desses estudos empíricos se extraíram as seguintes faixas recomendadas de temperaturas:

Faixas de temperatura recomendadas para pisos onde circulam pessoas descalças, conforme o revestimento do piso:

- * Acabamento têxtil (carpetes ou tapetes) 21 a 28°C
- * Acabamento em madeira: 24 a 28°C
- * Acabamento em concreto: 26 a 28,5°C

Faixas de temperatura recomendadas para o piso, onde circulam pessoas calçadas normalmente, em função da atividade desempenhada:

- * Pessoas em atividade sedentária: 25°C
- * Pessoas caminhando (circulações): 23°C

A Figura 1.7 exemplifica o descontentamento das pessoas devido à temperatura do piso.

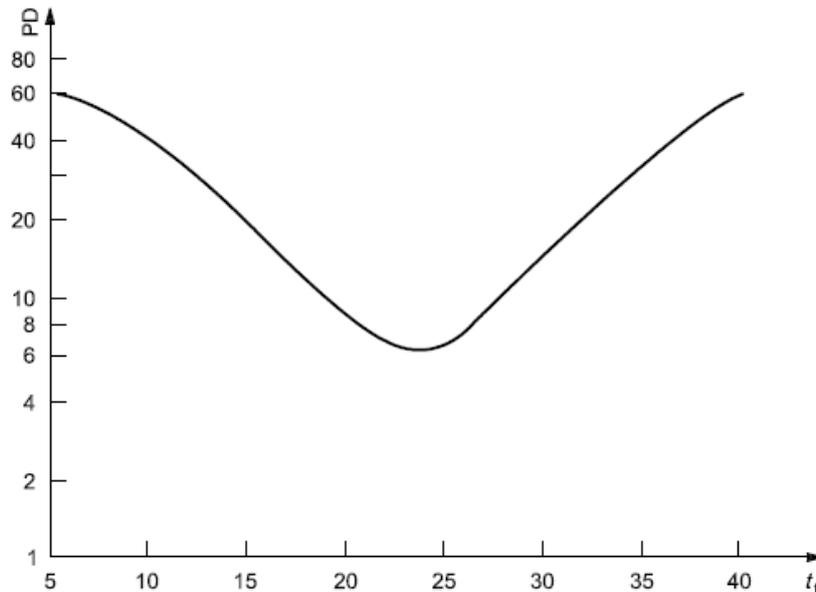


Figura 1.7 - Percentagem de pessoas insatisfeitas em função da temperatura do piso.
(Fonte ISO 7730-2005)

1.2.8 Influência do movimento do ar no conforto térmico

O movimento do ar num ambiente interfere no conforto térmico das pessoas devido a sua influência nos processos de troca de calor do corpo com o meio por convecção e por evaporação. Essa influência pode ser benéfica, quando o aumento da velocidade do ar provoca uma desejável aceleração nos processos de perda de calor do corpo, ou prejudicial, quando a perda de calor é indesejável e provoca o resfriamento excessivo do corpo com um todo, ou de uma de suas partes, efeito internacionalmente conhecido como *draught*. Assim, diz-se que a sensação térmica é influenciada diretamente pela intensidade da ventilação, especialmente em climas úmidos, onde a ventilação representa um fator necessário para diminuir o desconforto causado pelo calor através do processo de evaporação do suor. A contribuição da ventilação na remoção de calor varia de acordo com a temperatura do ar e também com a umidade relativa.

A referência mais tradicional para os limites da velocidade do ar advém do conceito de desconforto por correntes de ar (*i.e. draught* ou *draft*). Tal conceito pode ser definido como um resfriamento indesejado no corpo, causado pela movimentação do ar e sendo considerado um problema comum em ambientes com baixa atividade metabólica. Para avaliar o risco de desconforto causado pelas correntes de ar, o modelo mais comum utilizado é o de Fanger, que foi desenvolvido com base em experimentos laboratoriais. O modelo combina três parâmetros físicos: temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência do ar (Equação 16), e é utilizado para prever a porcentagem de indivíduos insatisfeitos com o movimento do ar.

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_m - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_m \cdot t_u + 3,14)(\%)$$

[Equação 18]

Onde:

DR: Percentual de pessoas desconfortáveis pela movimentação do ar;

v_m : Velocidade média do ar (m/s);

t_a : Temperatura do ar (°C);

t_u : Intensidade de turbulência do ar (%).

Tais valores aceitáveis de velocidade do ar têm sido constantemente objeto de estudo de vários pesquisadores. Os valores considerados como aceitáveis para um ambiente de atividades sedentárias podem variar entre 0,5 e 2,5 m/s, de acordo com diferentes autores. O limite máximo é baseado em problemas práticos, tais como voo de papéis sobre a mesa e desarranjo de penteados, ao invés de exigências fisiológicas de conforto. Alguns pesquisadores notaram que a maioria dos estudos realizados a respeito da velocidade do ar estava focada nos efeitos negativos causados pelo desconforto proveniente da movimentação indesejada do ar. No entanto, inúmeras constatações sugerem que a movimentação do ar é desejada quando a temperatura é considerada alta.

Assim, para obterem-se ambientes climatizados de maneira sustentável, é necessário incrementar o valor da velocidade do ar ao invés de reduzir a temperatura e umidade relativa do ar, alcançando equivalentes níveis de conforto. O incremento da velocidade do ar pode ser uma solução bastante eficiente, desde que antes sejam analisadas todas as condicionantes de influência, de maneira que seus efeitos sejam exponenciados. Dentre estas condicionantes estão: o clima, as necessidades, a finalidade dos edifícios, dentre outras.

1.2.9 Normas de conforto térmico

Os estudos de conforto térmico tiveram nos últimos anos um aumento de interesse por parte dos pesquisadores, sendo que as normas existentes nesta área englobam estudos sobre todas as variáveis que influenciam no conforto térmico, quer sejam em ambientes condicionados ou não. As principais normas e guias de referência aos estudos são:

ISO 7730 Versão anterior:

ISO 7730/94 - Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico. Título original: Moderate thermal environments -- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.

Esta norma propõe um método de determinação da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas expostas a ambientes térmicos moderados e especifica condições térmicas aceitáveis para o conforto.

ISO 7730 Versão Atual – título original:

ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

Nesta nova versão, foi adicionado um método para avaliação de períodos longos, bem como informações sobre desconforto térmico localizado, condições em estado não estacionário e adaptação. Além disso, foi adicionado um anexo estipulando como os requisitos de conforto térmico podem ser expressos em diferentes categorias.

ISO 7726 Versão anterior:

ISO/DIS 7726/96 - Ambientes Térmicos - Instrumentos e Métodos para medições das quantidades físicas. Esta norma internacional especifica as características mínimas dos instrumentos de medição das variáveis físicas, assim como apresenta métodos de medição desses parâmetros.

ISO 7726 Versão Atual – título original:

ISO 7726/1998-Ergonomics of the thermal environment -- Instruments for measuring physical quantities.

ASHRAE Standard 55 Versão anterior:

ASHRAE Standard 55-1992: Ambientes Térmicos - Condições para ocupação humana. Esta norma americana especifica condições ambientais aceitáveis para a saúde das pessoas sujeitas a pressões atmosféricas equivalentes a altitudes superiores a 3,00m, em ambientes internos projetados para ocupação humana por períodos não inferiores a 15 minutos.

ASHRAE Standard 55 Versão Atual:

ASHRAE Standard 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. A nova versão da norma também contém um método opcional para determinar condições térmicas aceitáveis em espaços naturalmente ventilados, considerando a possibilidade ou não de controle das variáveis ambientais por parte do usuário. A Norma incorpora ainda inovações encontradas nas pesquisas mais recentes tais como a utilização de valores elevados de velocidade do ar, o que faz com que se aumente o intervalo aceitável das condições térmicas em um ambiente. Na nova versão os limites de Temperatura Operativa, além do PMV e PPD, foram revistos em função da velocidade do ar e intensidade de turbulência do ar.

A Norma incorpora ainda em um dos seus anexos um novo método para determinar o efeito do resfriamento corporal através da velocidade do ar para valores acima de 0,15m/s, permitindo a utilização de ventiladores de teto e outros meios para incremento da velocidade do ar durante os meses mais quentes.

ASHRAE Fundamentals Handbook - cap. 8 Thermal Comfort - 2005:

Este guia normativo da sociedade americana de aquecimento, refrigeração e ar condicionado, apresenta os fundamentos de termo-regulação humana e conforto em termos úteis aos engenheiros para a operação de sistemas e preparação de projetos e aplicações para o conforto dos ocupantes de edificações. Apresenta, de maneira sumarizada todos os dizeres das normas ISO aqui referidas.

ISO 8996 Versão anterior:

ISO 8996/90 - Ergonomia - Determinação da produção de calor metabólico.

Esta norma internacional especifica diferentes métodos para a determinação e medição da taxa de calor metabólico, no contexto da ergonomia do ambiente de trabalho. Esta norma também pode ser utilizada para outras aplicações, como por exemplo a verificação da prática de atividades, o custo energético de atividades específicas ou atividades físicas, bem como o custo total energético das atividades.

ISO 8996 Versão Atual – título original:

ISO 8996/2004 - Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate.

ISO 9920 Versão anterior:

ISO 9920/95 - Ergonomia de ambientes térmicos - Estimativa de isolamento térmico e resistência evaporativa de um traje de roupas.

Esta norma internacional especifica métodos para a estimativa das características térmicas, resistência à perdas de calor seco e à perda por evaporação, em condições de estado estacionário para um traje de roupa, baseado em valores de vestimentas conhecidas, trajes e tecidos.

ISO 9920 Versão Atual – título original:

ISO 9920/2007 – Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.

1.3 ISO 7730/2005 - AMBIENTES TÉRMICOS MODERADOS - DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES PMV E PPD E ESPECIFICAÇÕES DAS CONDIÇÕES PARA CONFORTO TÉRMICO:

Esta Norma Internacional se aplica à avaliação de ambientes térmicos moderados. A versão atual foi desenvolvida em paralelo com a norma ASHRAE 55 na antiga revisão de 2004.

Quando os parâmetros físicos de um ambiente (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar) bem como os parâmetros pessoais como atividade desempenhada e vestimenta utilizada pelas pessoas são conhecidos ou medidos, a sensação térmica para o corpo como um todo pode ser estimada pelo cálculo do índice do voto médio estimado, PMV, descrito nesta Norma.

A Norma também descreve como calcular o índice da percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente (PPD), que é a percentagem de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio.

O desconforto térmico também pode ser causado por aquecimento ou resfriamento localizado do corpo. Os fatores de desconforto localizado mais comuns são assimetria radiante de temperatura (superfícies frias ou quentes), correntes de ar, diferença vertical de temperatura, e pisos frios ou quentes. A versão anterior da norma fornecia um método para o cálculo da percentagem de pessoas insatisfeitas somente devido às correntes de ar. Na versão atual, a norma especifica como predizer o PPD para os demais parâmetros de desconforto localizado.

Na nova versão também são apresentados métodos de avaliação para condições em estado não estacionário. O ambiente térmico em edifícios ou em locais de trabalho muda com o tempo e pode não ser sempre possível manter as condições dentro de limites recomendados. Um método para avaliação de conforto térmico para períodos longos também é apresentado.

Por fim, a norma fornece recomendações de como levar em conta a adaptação de pessoas ao se avaliar e projetar edifícios e sistemas.

1.3.1 Escopo

Os propósitos dessa norma internacional são:

- a) Apresentar um método de cálculo da sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas expostas a um ambiente térmico moderado;
- b) Especificar as condições de aceitabilidade térmica de um ambiente para conforto.

Esta norma se aplica para homens e mulheres saudáveis e foi originalmente baseada em estudos realizados na América do Norte e Europa, principalmente nos

estudos de Fanger. Porém, a versão de 1994 contém conclusões retiradas de recentes estudos realizados no Japão.

1.3.2 Voto Médio Estimado - PMV

O PMV é um índice que prevê o valor médio de um grande grupo de pessoas segundo uma escala de sensações de 7 pontos, apresentada anteriormente.

1.3.2.1 Determinação

Esse índice pode ser determinado quando a Atividade (taxa metabólica) e as Vestimentas (resistência térmica) são conhecidas, e os parâmetros físicos são medidos, tais como: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar, conforme previsto na Norma ISO 7726/85, apresentada no capítulo adiante.

É importante ressaltar que esse índice está baseado no balanço de calor do corpo humano com o ambiente. Para o equacionamento do índice do PMV, foram consideradas as respostas fisiológicas do sistema termorregulador de mais de 1300 pessoas, respostas estas que foram tratadas estatisticamente, atingindo-se a equação abaixo, que é obtida através da substituição do valor (L) na Equação 17, pela sua respectiva expressão conforme a Equação 19.

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 19}$$

onde:

t_{cl} é calculada iterativamente através da equação 8.

sendo:

PMV = Voto médio estimado, ou sensação de conforto,

M = Taxa metabólica, em W/m^2 ,

W = Trabalho mecânico, em W/m^2 , sendo nulo para a maioria das atividades,

I_{cl} = Resistência térmica das roupas, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$,

f_{cl} = Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nú,

t_a = Temperatura do ar, em $^\circ C$,

t_r = Temperatura radiante média, em $^\circ C$,

v_{ar} = Velocidade relativa do ar, em m/s,

p_a = Pressão parcial do vapor de água, em Pa,

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$,

t_{cl} = Temperatura superficial das roupas, em $^\circ C$.

A fim da utilização da Equação 19, deve-se levar em conta as seguintes relações: $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ e $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ C/W$

É recomendado o uso do índice do PMV apenas para valores de PMV entre **+2** e **-2**. Recomenda-se também que só se use o índice do PMV, quando:

M = 46 W/m^2 a 232 W/m^2 (0,8 met a 4 met)

I_{cl} = 0 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ a 0,310 $m^2 \cdot ^\circ C/W$ (0 clo a 2 clo)

$t_{ar} = 10$ a 30°C

$t_r = 10$ a 40°C

$v_{ar} = 0$ m/s a 1 m/s

$p_a = 0$ Pa a 2700 Pa

Assim sendo, o PMV pode ser determinado pelas seguintes maneiras:

a) Utilizando a Equação 19;

b) Utilizando as tabelas constantes do anexo C da Norma, em função de diferentes combinações de atividade, vestimenta, velocidade relativa do ar e “temperatura operativa”. A *temperatura operativa* é a temperatura uniforme de um ambiente radiante negro hipotético, onde um ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real.

$$T_o = A.t_a + (1-A).t_r$$

[Equação 20]

sendo:

$A=0,5$ para $v_{ar}<0,2$ m/s

$A=0,6$ para v_{ar} de 0,2 a 0,6 m/s

$A=0,7$ para v_{ar} de 0,6 a 1,0 m/s

A temperatura operativa pode ser calculada com suficiente aproximação como sendo o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante.

c) Diretamente, utilizando um sensor integrador.

1.3.2.2 Aplicações

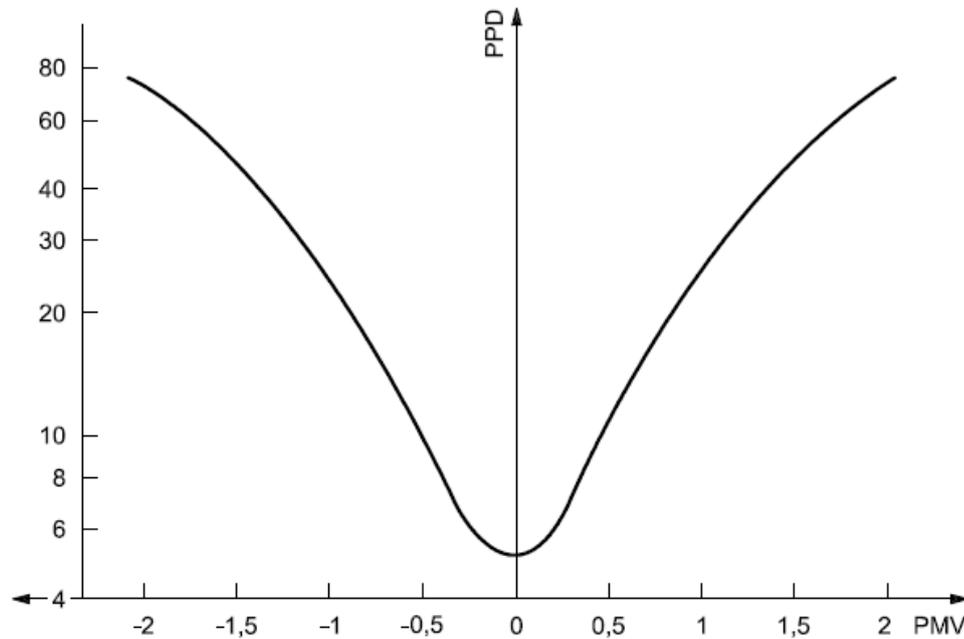
- Verificar se determinado ambiente encontra-se em condições de aceitabilidade térmica, conforme os critérios constantes no anexo D desta Norma.
- Estabelecer maiores limites de aceitabilidade térmica em espaços com requerimentos de conforto menores do que os estabelecidos no anexo D.
- Fixando-se o $PMV=0$, estabelecer as melhores combinações das variáveis que fornecem a sensação de neutralidade térmica.

1.3.3 Percentagem de pessoas insatisfeitas - PPD

O índice PPD estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente. Ele se baseia na percentagem de um grande grupo de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio, votando +3, +2 ou -3 e -2, na escala sétima de sensações. O PPD pode ser determinado analiticamente conforme a Equação 21, em função do PMV ou extraído da Figura 1.8, apresentada a seguir.

$$PPD = 100 - 95.e^{-[0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2]}$$

[Equação 21]

**Key**

PMV predicted mean vote

PPD predicted percentage dissatisfied, %

Figura 1.8 - Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV).

1.3.4 Aceitabilidade de ambientes térmicos visando conforto

Devido às diferenças individuais, é impossível se projetar um ambiente que satisfaça a todo mundo. Sempre haverá uma percentagem de pessoas que estarão insatisfeitas termicamente. É possível, porém, se especificar ambientes que sejam aceitáveis termicamente, ou seja, satisfaçam a maioria de seus ocupantes.

O requisito de conforto térmico da versão anterior da Norma especificava somente uma aceitabilidade térmica para 90% de seus ocupantes (10% de insatisfeitos), e prevendo que 85% dos ocupantes não estariam insatisfeitos devido a correntes de ar (Ambientes aceitáveis termicamente: $-0,5 < PMV < +0,5$).

Devido a prioridades locais e nacionais, desenvolvimento técnico e regiões climáticas, uma qualidade térmica mais alta (poucos insatisfeitos) ou qualidade mais baixa (mais insatisfeitos) em alguns casos pode ser aceito. Em tais casos, o PMV e PPD, o modelo de corrente de ar, e a relação entre os parâmetros de desconforto térmico local, podem ser usados para determinar diferentes intervalos de parâmetros ambientais para a avaliação e projeto do ambiente térmico.

A última versão da norma especifica diferentes níveis de aceitabilidade. Exemplos de diferentes categorias de requisitos são dados no Anexo A da nova versão. O ambiente térmico desejado para um espaço pode ser selecionado entre 3 categorias, A, B e C de acordo com a Tabela 1.1 (Tabela A.1 da ISO 7730/2005): Categorias de ambiente térmico. (Tabela A1 da Norma). Todos os critérios devem ser satisfeitos simultaneamente para cada categoria.

Tabela 1.1 (Tabela A.1 da ISO 7730/2005): Categorias de ambiente térmico.

Table A.1 — Categories of thermal environment

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD % caused by		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

1.3.5 Anexos

A ISO 7730/2005, apresenta os seguintes anexos:

1.3.5.1 Anexo A (Informativo) – Exemplos de requisitos de conforto térmico para diferentes categorias de ambientes e tipos de espaço.

1.3.5.2 Anexo B (Informativo): Taxas metabólicas para diferentes atividades

Este Anexo B fornece conforme Tabela 1.2 a seguir, as taxas metabólicas para algumas atividades cotidianas. Para maiores informações sobre taxas metabólicas deve-se consultar a ISO 8996/2004.

Tabela 1.2 - (Tabela B.1 da ISO 7730/2005): Taxas metabólicas

Atividades	Taxas Metabólicas	
	W/m ²	met
-Deitado, reclinado	46	0,8
-Sentado, relaxado	58	1,0
-Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
-Atividade leve em pé (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
-Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	116	2,0
-Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	110	1,9
-Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	140	2,4
-Andando em nível:	165	2,8
2 km/h	200	3,4
3 km/h		
4 km/h		
5 km/h		

1.3.5.3 Anexo C (Informativo) – Estimativa de isolamento térmico de vestimentas

Este anexo apresenta valores básicos de isolamento térmico para trajes típicos, bem como para peças de roupas. **Para pessoas sentadas, a cadeira pode contribuir com um aumento adicional de isolamento de 0 a 0,4 clo.**

Tabela 1.3 - (Tabela C.1 da ISO 7730/2005) - Isolamento térmico para trajes típicos.

Table C.1 — Thermal insulation for typical combinations of garments

Work clothing	I_{cl}		Daily wear clothing	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Underpants, boiler suit, socks, shoes	0,70	0,110	Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Underpants, shirt, boiler suit, socks, shoes	0,80	0,125	Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear with long legs and sleeves, thermo-jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	1,40	0,220	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	2,00	0,310	Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Underwear with long sleeves and legs, thermo-jacket and trousers, Parka with heavy quilting, overalls with heavy quilting, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395	Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230

Tabela 1.4 - Isolamento térmico para peças individuais de roupas.

Table C.2 — Thermal insulation for garments and changes of optimum operative temperature

Garment	I_{clu}		Change of optimum operative temperature, °C
	clo	$m^2 \cdot KW$	
Underwear			
Panties	0,03	0,005	0,2
Underpants with long legs	0,10	0,016	0,6
Singlet	0,04	0,006	0,3
T-shirt	0,09	0,014	0,6
Shirt with long sleeves	0,12	0,019	0,8
Panties and bra	0,03	0,005	0,2
Shirts/Blouses			
Short sleeves	0,15	0,023	0,9
Light-weight, long sleeves	0,20	0,031	1,3
Normal, long sleeves	0,25	0,039	1,8
Flannel shirt, long sleeves	0,30	0,047	1,9
Light-weight blouse, long sleeves	0,15	0,023	0,9
Trousers			
Shorts	0,08	0,009	0,4
Light-weight	0,20	0,031	1,3
Normal	0,25	0,039	1,8
Flannel	0,28	0,043	1,7
Dresses/Skirts			
Light skirts (summer)	0,15	0,023	0,9
Heavy skirt (winter)	0,25	0,039	1,8
Light dress, short sleeves	0,20	0,031	1,3
Winter dress, long sleeves	0,40	0,062	2,5
Boiler suit	0,55	0,085	3,4
Sweaters			
Sleeveless vest	0,12	0,019	0,8
Thin sweater	0,20	0,031	1,3
Sweater	0,28	0,043	1,7
Thick sweater	0,35	0,054	2,2
Jackets			
Light, summer jacket	0,25	0,039	1,8
Jacket	0,35	0,054	2,2
Smock	0,30	0,047	1,9
High-insulative, fibre-pelt			
Boiler suit	0,90	0,140	5,8
Trousers	0,35	0,054	2,2
Jacket	0,40	0,062	2,5
Vest	0,20	0,031	1,3
Outdoor clothing			
Coat	0,60	0,093	3,7
Down jacket	0,55	0,085	3,4
Parka	0,70	0,109	4,3
Fibre-pelt overalls	0,55	0,085	3,4
Sundries			
Socks	0,02	0,003	0,1
Thick, ankle socks	0,05	0,008	0,3
Thick, long socks	0,10	0,016	0,6
Nylon stockings	0,03	0,005	0,2
Shoes (thin soled)	0,02	0,003	0,1
Shoes (thick soled)	0,04	0,006	0,3
Boots	0,10	0,016	0,6
Gloves	0,05	0,008	0,3

1.3.5.4 Anexo D (Normativo) - Programa computacional para o cálculo do voto médio estimado, PMV, e percentagem de pessoas insatisfeitas, PPD

1.3.5.5 Anexo E (Normativo) - Tabelas para a determinação do voto médio estimado, PMV, para uma umidade relativa de 50%.

Este anexo apresenta tabelas para a determinação do PMV em função da vestimenta, temperatura operativa e velocidade relativa do ar, para uma umidade

relativa de 50%, para 9 níveis de atividade metabólica, sendo aqui apresentada a de 69,6W/m².

Tabela 1.5 - Tabela do PMV, para atividade metabólica de 69,6 W/m²
 Table E.3 — Activity level: 69,6 W/m² (1,2 met)

Clothing		Operative temperature °C	Relative air velocity								
clo	m ² · K/W		m/s								
			< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	
0	0	25	-1,33	-1,33	-1,59	-1,92					
		26	-0,83	-0,83	-1,11	-1,40					
		27	-0,33	-0,33	-0,63	-0,88					
		28	0,15	0,12	-0,14	-0,36					
		29	0,63	0,56	0,35	0,17					
		30	1,10	1,01	0,84	0,69					
		31	1,57	1,47	1,34	1,24					
0,25	0,039	32	2,03	1,93	1,85	1,78					
		23	-1,18	-1,18	-1,39	-1,61	-1,97	-2,25			
		24	-0,79	-0,79	-1,02	-1,22	-1,54	-1,80	-2,01		
		25	-0,42	-0,42	-0,64	-0,83	-1,11	-1,34	-1,54	-2,21	
		26	-0,04	-0,07	-0,27	-0,43	-0,68	-0,89	-1,06	-1,85	
		27	0,33	0,29	0,11	-0,03	-0,25	-0,43	-0,58	-1,09	
		28	0,71	0,64	0,49	0,37	0,18	0,03	-0,10	-0,54	
0,50	0,078	29	1,07	0,99	0,87	0,77	0,61	0,49	0,39	0,03	
		30	1,43	1,35	1,25	1,17	1,05	0,95	0,87	0,58	
		18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,70				
		20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42		
		22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17	
		24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35	
		26	0,44	0,39	0,26	0,16	-0,01	-0,11	-0,21	-0,52	
0,75	0,116	28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,70	0,61	0,54	-0,31	
		30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14	
		32	2,25	2,20	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99	
		16	-1,77	-1,77	-1,91	-2,07	-2,31	-2,49			
		18	-1,27	-1,27	-1,42	-1,56	-1,77	-1,93	-2,05	-2,45	
		20	-0,77	-0,77	-0,92	-1,04	-1,23	-1,36	-1,47	-1,82	
		22	-0,25	-0,27	-0,40	-0,51	-0,66	-0,78	-0,87	-1,17	
1,00	0,155	24	0,27	0,23	0,12	0,03	-0,10	-0,19	-0,27	-0,51	
		26	0,78	0,73	0,64	0,57	0,47	0,40	0,34	0,14	
		28	1,29	1,23	1,17	1,12	1,04	0,99	0,94	0,80	
		30	1,80	1,74	1,70	1,67	1,62	1,58	1,55	1,46	
		16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12	
		18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59	
		20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07	
22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52			
24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02			
26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,58			
28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12			
30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67			

Table E.3 (continued)

Clothing		Operative temperature °C	Relative air velocity							
clo	m ² · K/W		m/s							
			< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
1,50	0,233	12	-1,09	-1,09	-1,19	-1,27	-1,39	-1,48	-1,55	-1,75
		14	-0,75	-0,75	-0,95	-0,93	-1,03	-1,11	-1,17	-1,35
		16	-0,41	-0,42	-0,51	-0,58	-0,67	-0,74	-0,79	-0,96
		18	-0,06	-0,09	-0,17	-0,22	-0,31	-0,37	-0,42	-0,56
		20	0,28	0,25	0,18	0,13	0,05	0,00	-0,04	-0,16
		22	0,63	0,60	0,54	0,50	0,44	0,39	0,36	0,25
		24	0,99	0,95	0,91	0,87	0,82	0,78	0,78	0,67
		26	1,35	1,31	1,27	1,24	1,20	1,18	1,15	1,08
2,00	0,310	10	-0,77	-0,78	-0,98	-0,92	-1,01	-1,08	-1,11	-1,24
		12	-0,49	-0,51	-0,58	-0,63	-0,71	-0,78	-0,80	-0,92
		14	-0,21	-0,23	-0,29	-0,34	-0,41	-0,48	-0,49	-0,60
		16	0,08	0,06	-0,00	-0,04	-0,10	-0,15	-0,18	-0,27
		18	0,37	0,34	0,29	0,26	0,20	0,17	0,14	0,05
		20	0,67	0,63	0,59	0,56	0,52	0,48	0,46	0,39
		22	0,97	0,93	0,89	0,87	0,83	0,80	0,78	0,72
		24	1,27	1,23	1,20	1,18	1,15	1,13	1,11	1,08

1.3.5.6 Anexo F (Informativo) – Umidade

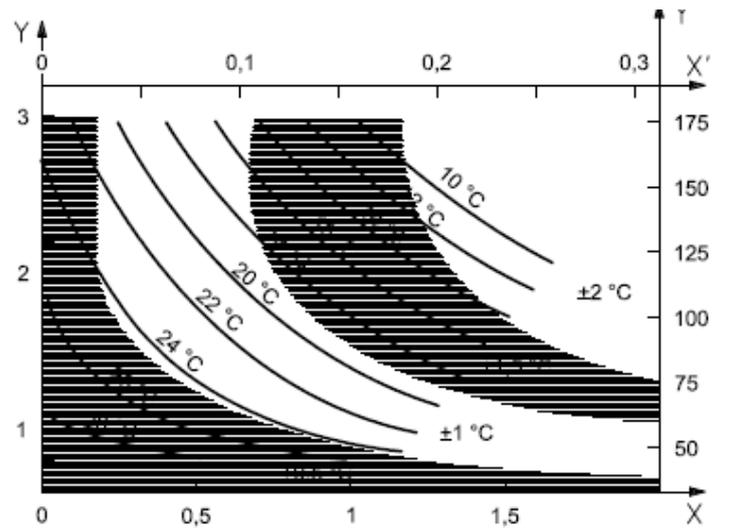
1.3.5.7 Anexo G (Informativo) – Velocidade do Ar

1.3.5.8 Anexo H (Informativo) – Avaliação de período longo das condições gerais de conforto térmico.

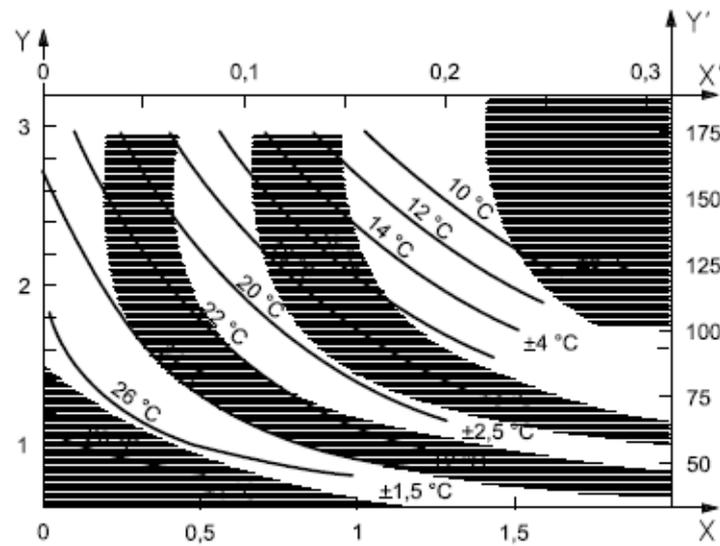
1.3.6 Intervalo de Temperatura Operativa (Anexo A da ISO 7730/2005)

Para um dado espaço, existe uma temperatura operativa¹ ótima correspondente a um PMV = 0 em função da atividade e da roupa dos ocupantes. A Figura 1.9 mostra a temperatura operativa ótima e o intervalo de temperatura permitida em função da vestimenta e atividade para cada uma das três categorias. A temperatura operativa ótima é a mesma para as três categorias, enquanto que o intervalo permitido ao redor da temperatura operativa varia. A temperatura operativa de todos os locais dentro da zona ocupada de um espaço deveria estar dentro do intervalo permitido todo o tempo.

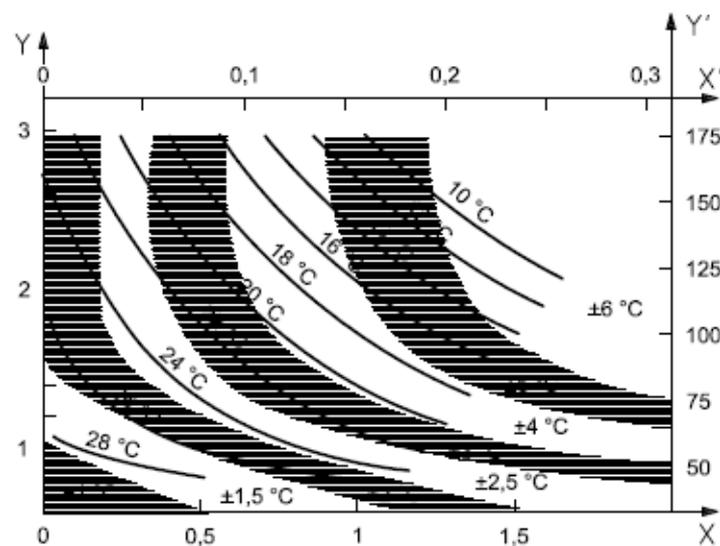
¹ Temperatura uniforme de um fechamento imaginário, no qual um ocupante trocava a mesma quantidade de calor por radiação e convecção, do que se ele estivesse num ambiente real, não uniforme.



Category A: PPD < 6 %



Category B: PPD < 10 %



Category C: PPD < 15 %

Figura 1.9 - Temperatura operativa ótima (PMV=0) como função da atividade e vestimenta.

Obs: As áreas hachuradas indicam uma faixa de conforto $\pm \Delta t$ ao redor da temperatura ótima. A velocidade relativa do ar causada pelo movimento do corpo é estimada como sendo = 0 para $M < 1$ met e como sendo $v_{ar} = 0,3.(M-1)$ para $M > 1$ met. A umidade relativa considerada = 50%.

1.3.7 Critérios de Projeto para diferentes tipos de espaço – Exemplos.

Os critérios de projeto especificados na Tabela 1.6 são derivados de certas suposições: para o ambiente térmico, os critérios para a temperatura operativa são baseados em atividades típicas leves; para vestimentas de 0,5 clo durante o verão e 1,0 clo durante o inverno. Os critérios para a velocidade média do ar se aplicam para uma intensidade de turbulência de aproximadamente 40% (ventilação mista). Todos os critérios de projeto são válidos para as condições de ocupação mostradas na Tabela 1.6, mas podem ser aplicados para outros tipos de espaço de uso similar.

Tabela 1.6 - Exemplos de critérios de projeto para espaços em vários tipos de edifícios.
 Table A.5 — Example design criteria for spaces in various types of building

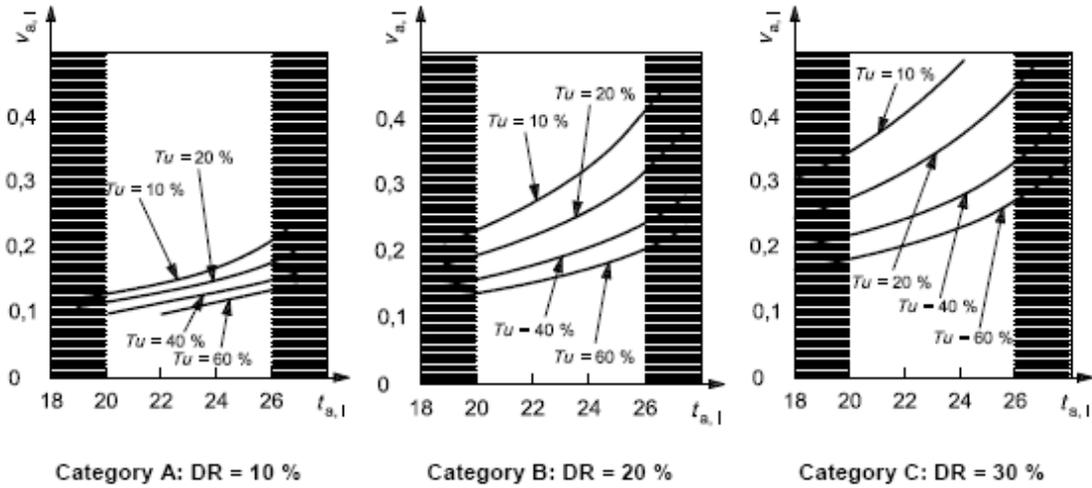
Type of building/space	Activity W/m ²	Category	Operative temperature °C		Maximum mean air velocity ^a m/s	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)	Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office Landscape office	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Conference room Auditorium		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Cafeteria/restaurant Classroom		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Kindergarten	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^b
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
Department store	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 ^b
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 ^b

^a The maximum mean air velocity is based on a turbulence intensity of 40 % and air temperature equal to the operative temperature according to 6.2 and Figure A.2. A relative humidity of 60 % and 40 % is used for summer and winter, respectively. For both summer and winter a lower temperature in the range is used to determine the maximum mean air velocity.

^b Below 20 °C limit (see Figure A.2).

1.3.8 Desconforto Localizado

A Figura 1.10 mostra intervalos para os parâmetros de desconforto térmico localizado para as três categorias da Tabela 1.1 (tabela A1 da Norma). A máxima velocidade média do ar permitida é função da temperatura do ar local e da intensidade da turbulência.



Key

- $t_{a,l}$ local air temperature, °C
- $v_{a,l}$ local mean air velocity, m/s
- Tu turbulence intensity, %

Figura 1.10 - Velocidades do ar médias permitidas em função da temperatura do ar e da intensidade da turbulência.

As tabelas abaixo fornecem valores para desconforto térmico localizado (diferença de temperatura vertical, temperatura do piso e assimetria radiante de temperatura) para diferentes categorias (Fonte: ISO 7730/2005).

Table A.2 — Vertical air temperature difference between head and ankles

Category	Vertical air temperature difference ^a °C
A	< 2
B	< 3
C	< 4

^a 1,1 and 0,1 m above floor.

Table A.3 — Range of floor temperature

Category	Floor surface temperature range °C
A	19 to 29
B	19 to 29
C	17 to 31

Table A.4 — Radiant temperature asymmetry

Category	Radiant temperature asymmetry °C			
	Warm ceiling	Cool wall	Cool ceiling	Warm wall
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

1.3.9 Exemplo de aplicação

Determinar a condição de conforto térmico (PMV e PPD) para a análise da seguinte situação de posto de trabalho em escritório, em local com pressão atmosférica de 101kPa.

Dados:

$M = 1,2$ met; $I_{cl} = 0,75$ clo; $t_a = 20^\circ\text{C}$; $t_g = 20^\circ\text{C}$; $v_a = 0,12$ m/s; UR=50%.

1º Passo: Transformação das variáveis para aplicar na equação 12:

Como $M=1,2$ met, mas 1 met= $58,2\text{W}/\text{m}^2$, logo $M = 69,84$ W/m²

Como $t_a = t_g = 20^\circ\text{C}$, logo $t_{rm} = 20^\circ\text{C}$

Como UR = 50%, mas $UR = 100 \cdot (p_a/p_{as})$

pressão saturada de vapor, $p_{as} = 0,611 \cdot e^{(17,27 \cdot t_a / t_a + 237,3)}$, logo $p_{as} = 2,34$ kPa

pressão parcial do vapor de água, $p_a = (UR \cdot p_{as})/100$, logo $p_a = 1,17$ kPa

Como $v_a = 0,12$ m/s, mas $v_{ar} = v_a + 0,0052(M-58)$, logo

$v_{ar} = 0,18$ m/s

2º Passo: Cálculo da temperatura da roupa, t_{cl} :

Através da 12 anterior, calculando-se iterativamente:

$t_{cl} = 26,22$ °C

3º Passo: Cálculo do PMV:

Aplicando-se os valores calculados, acima, na equação 18:

PMV = -1,00

4º Passo: Cálculo do PPD:

Substituindo o valor do PMV, na equação 19:

PPD= 26,11%

5º Passo: Determinação alternativa, utilizando-se tabelas e gráficos:

Com os dados iniciais do problema, consultando-se a tabela 1.5.5 anterior, temos que o valor do PMV será de -1,00.

Consultando-se o gráfico da figura 1.5.1, com um valor de PMV = -1,00 temos graficamente que o PPD será de 26,11%.

1.4 ISO/DIS 7726/98 - AMBIENTES TÉRMICOS - INSTRUMENTOS E MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS.

O objetivo dessa Norma Internacional é definir padrões e orientar as medições dos parâmetros físicos de ambientes térmicos, tanto para ambientes moderados, análise de conforto térmico, como ambientes extremos e análises de stress térmico.

1.4.1 Introdução

Esta norma internacional que se encontra atualmente em discussão é uma de uma série de normas que objetivam particularmente:

- a) A finalização das definições para os termos usados nos métodos de medição, testes ou interpretação, levando-se em conta as normas já existentes ou em processo de execução.

- b) O fornecimento de relação de especificações relativas aos métodos de medição dos parâmetros físicos que caracterizam os ambientes térmicos.
- c) A seleção de um ou mais métodos para a interpretação dos parâmetros.
- d) A especificação dos valores recomendados para os ambientes térmicos se situarem na faixa de conforto ou limites de exposição para ambientes extremos (calor ou frio).
- e) A especificação de métodos de medição da eficiência dos dispositivos ou processos.

Os equipamentos descritos nos anexos da Norma significam apenas que eles são recomendados, porém, como suas características podem variar conforme o princípio de medição, modo de construção e uso, é necessário checá-los com as especificações contidas nessa norma.

1.4.2 Escopo e campo de aplicação

Esta Norma especifica as “características mínimas” dos equipamentos e métodos de medição dos parâmetros físicos de um ambiente. Não objetiva o estabelecimento de um índice global de conforto ou estresse térmico, mas apenas padroniza o processo de registro de informações que levam à obtenção deste índice.

Esta Norma deverá ser utilizada como referência quando se deseja fornecer especificações para fabricantes e usuários de equipamentos de medição de parâmetros físicos de ambientes ou em um contrato formal entre duas partes para a medição desses parâmetros. Seu campo de aplicação envolve estudos tanto em ambientes moderados, como quentes ou frios ocupados pelo homem.

1.4.3 Gerais

1.4.3.1 Padrões de conforto e padrões de stress:

As especificações e métodos contidos nessa Norma estão subdivididos em dois tipos, conforme a situação a ser analisada.

- Especificações e métodos do **tipo C**. Referem-se às medições executadas em ambientes moderados, próximos do conforto.
- Especificações e métodos do **tipo S**. Referem-se às medições executadas em ambientes sujeitos a estresse térmico.

As medições de conforto térmico, tipo ou classe C, e as medições de stress térmico, tipo ou classe S, podem ser realizadas em ambientes homogêneos ou heterogêneos, que podem ser classificados da seguinte maneira:

- **Ambientes homogêneos:** são aqueles onde não há variações nos valores das variáveis físicas no espaço ao redor da pessoa (variações inferiores a 5%).
- **Ambientes heterogêneos:** são aqueles que apresentam variações nos valores das variáveis físicas no espaço ao redor da pessoa, superiores a 5%.

1.4.3.2 Variáveis físicas que caracterizam o ambiente

Os estudos de conforto e stress térmico, bem como a determinação dos respectivos índices, requerem conhecimentos a respeito das variáveis físicas que se encontram ligadas ao ambiente. Essas variáveis podem ser consideradas *variáveis básicas* e *variáveis derivadas*.

As **variáveis básicas** são aquelas que caracterizam um dos fatores ambientais, independentemente dos outros. São elas:

- a) Temperatura do ar, expressa em Kelvins, T_a , ou em graus Celsius, t_a ;
- b) Temperatura radiante média, expressa em Kelvins, T_r , ou em graus Celsius, t_r , e temperatura radiante plana, expressa em Kelvins, T_{pr} , ou em graus Celsius, t_{pr} ;
- c) Umidade absoluta do ar, expressa pela pressão parcial do vapor de água, p_a , em kilopascals;
- d) velocidade do ar, v_a , expressa em metros por segundo;
- e) Temperatura superficial, expressa em Kelvins, T_s , ou em graus Celsius, t_s .

As relações entre estas variáveis, e os vários tipos de ganhos ou perdas de calor pelo organismo, estão contidas na Tabela 1.7. Os parâmetros isolamento da roupa (I_{cl}), resistência evaporativa da roupa (R_{cl}), taxa metabólica (M) e trabalho mecânico realizado (W), por serem geralmente extraídos de tabelas e não medidos, não são objetos de estudos dessa Norma.

O conceito de temperatura média radiante pressupõe que os efeitos sobre o homem, de um ambiente real, geralmente heterogêneo, e de um ambiente imaginário, homogêneo, são idênticos. Quando essa hipótese não é válida (em casos de assimetria de radiação) lança-se mão do conceito de temperatura radiante plana.

Tabela 1.7 - Principais variáveis independentes envolvidas no balanço térmico entre o homem e o ambiente

Elementos do balanço térmico	Variáveis							
	t_a temp. do ar	t_r temp. rad média	v_a veloc. do ar	p_a Umidade absol. ar	I_{cl} Isolam. roupas	R_{cl} Resist. evapor.	M Taxa metabólica	W trabalho mecânico
Produção de calor orgânico (M-W)							X	X
Transferência por radiação (R)		X			X			
Transferência por convecção (C)	X		X		X			
Evaporação pela pele (E)			X	X		X		
Evaporação pela respiração (E_{res})				X			X	

Já as **variáveis derivadas** caracterizam um grupo de fatores do ambiente, que são dependentes de outras variáveis, principalmente as básicas. São geralmente utilizadas para definir índices empíricos de conforto e stress térmico, onde não se tenham recursos para a utilização de métodos racionais ligados ao balanço térmico. Algumas variáveis derivadas são descritas em Normas específicas onde elas se aplicam, as quais apresentam os requerimentos de medição.

1.4.4 Instrumentos de medição

1.4.4.1 Definições

a) Temperatura do ar

É a temperatura do ar ao redor do corpo humano (Ver anexo A, item)

b) Temperatura média radiante

É a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a transferência de calor por radiação do corpo humano é igual à transferência de calor por radiação em um ambiente real não uniforme. Pode ser medida por instrumentos que permitam que a radiação, geralmente heterogênea das paredes de um ambiente real, seja integrada em um valor médio. (Ver anexo B, item).

O termômetro de globo negro é o instrumento mais frequentemente utilizado.

Pode ser determinado um valor aproximado da temperatura média radiante através de valores observados da temperatura de globo (t_g) e da temperatura e velocidade do ar ao redor do globo.

A precisão da medição varia consideravelmente de acordo com o tipo de ambiente e também de acordo com a precisão da medição da temperatura do ar e da temperatura de globo. A precisão de uma medição real sempre deve ser indicada quando estiver fora dos limites estipulados nessa Norma.

Como a temperatura média radiante é medida em relação ao corpo humano, o termômetro de globo tipo esférico o representa bem na posição sentada, porém um sensor do tipo elipsoide representa melhor o corpo humano quer seja na posição em pé, como na sentada.

A temperatura média radiante também pode ser calculada através de medições das temperaturas superficiais das paredes ao redor da pessoa, conhecendo-se o tipo das paredes e suas posições em relação à pessoa. Cálculo esse, realizado através dos fatores de forma. (Anexo B, item).

A temperatura radiante média pode também ser estimada através da temperatura radiante plana em 6 direções opostas, ponderadas de acordo com o fator de área projetado para a pessoa.

c) Temperatura radiante plana

A temperatura radiante plana (T_{pr} ou t_{pr}) é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, onde a radiação sobre um lado de um pequeno elemento plano seja igual à de um ambiente real não uniforme. Ela descreve a radiação oriunda de uma direção.

O radiômetro de fluxo líquido, ou radiômetro de dupla face, é o instrumento utilizado para se determinar esse parâmetro (ver anexo C, item). Com esse instrumento é possível se determinar a temperatura radiante plana através da radiação líquida trocada entre o ambiente e a superfície do elemento e da temperatura superficial do radiômetro.

Pode também ser utilizado para determinar a temperatura radiante plana um radiômetro com um sensor possuindo um disco reflexivo (polido) e um disco absorvente (pintado de negro).

A temperatura radiante plana pode também ser determinada pelas temperaturas superficiais do ambiente e os fatores de forma entre as superfícies e o elemento plano (Anexo C, item).

A assimetria da temperatura radiante é a diferença entre a temperatura radiante plana dos dois lados opostos de um pequeno elemento plano. Ela é utilizada quando a temperatura média radiante não descreve completamente o ambiente radiativo, como por exemplo, quando a radiação proveniente de partes opostas do espaço apresenta considerável heterogeneidade térmica.

A assimetria da temperatura radiante é medida ou calculada através do valor medido da temperatura radiante plana em duas direções opostas.

d) Umidade absoluta do ar

É o parâmetro relativo ao montante real de vapor de água contido no ar. Ao contrário da umidade relativa ou nível de saturação que fornece o montante de vapor de água no ar, ocorre em relação ao montante máximo que pode conter a uma determinada temperatura.

A umidade absoluta é levada em conta para se analisar as trocas por evaporação entre o homem e o ambiente. Ela é geralmente expressa em termos de pressão parcial de vapor de água. A pressão parcial do vapor de água de uma mistura de ar úmido é a pressão que esse vapor de água exerceria, se ele sozinho ocupasse o volume do ar úmido a uma mesma temperatura.

A umidade absoluta pode ser determinada diretamente utilizando-se instrumentos eletrolíticos ou de ponto de orvalho, ou indiretamente, medindo-se simultaneamente vários parâmetros, como umidade relativa e temperatura do ar, temperatura de bulbo úmido e temperatura do ar (ver anexo D, item).

O psicrômetro é o equipamento normalmente utilizado para se determinar a umidade. Ele permite que a umidade absoluta seja determinada através de medições da temperatura do ar seco (t_a) e da temperatura de bulbo úmido ventilado (t_{bu}). A precisão do equipamento só será adequada e conforme os preceitos dessa Norma, se o mesmo for bem projetado e os cuidados com o uso forem verificados.

e) Velocidade do ar

É um parâmetro definido por sua magnitude e direção. No caso de ambientes térmicos, considera-se a velocidade efetiva do ar, ou seja, a magnitude do vetor velocidade do fluxo no ponto de medição considerado (ver anexo E, item).

A velocidade do ar (v_a) para qualquer ponto no espaço varia com o tempo e essas flutuações devem ser registradas. Um fluxo de ar pode ser descrito pela velocidade média (v_a), que é a média das velocidades instantâneas em um dado intervalo de tempo, e pelo desvio padrão das velocidades, o qual é dado pela seguinte equação:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{ai} - v_a)^2}$$

[Equação 22]

onde:

v_{ai} = velocidade instantânea do ar.

A intensidade de turbulência do fluxo de ar (T_u) é definida pelo quociente entre o desvio padrão das velocidades instantâneas e a velocidade média, sendo geralmente expressa em percentagem.

$$T_u = \frac{SD}{v_a} \cdot 100$$

[Equação 23]

f) Temperatura superficial

É a temperatura de uma dada superfície. É utilizada para avaliar as trocas de calor radiativo entre o corpo humano por meio da temperatura radiante média e/ou temperatura radiante plana. Avalia também o efeito do contato direto entre o corpo e uma dada superfície. Pode ser medida pelo método apresentado no anexo F, utilizando um termômetro de contato onde o sensor está em contato com a superfície ou um sensor infravermelho, onde é medido o fluxo de calor radiante da superfície e convertido em temperatura.

1.4.4.2 Características dos instrumentos de medição

As faixas e precisões das medições, assim como o tempo de resposta dos sensores para cada tipo de parâmetro físico básico e derivado, encontram-se na Tabela 1.8, que apresenta as faixas de medição, a acuracidade requerida e desejada, e o tempo de resposta para os instrumentos de medição das variáveis físicas. Estes são os valores mínimos recomendados. Certos parâmetros físicos para medições muito precisas de estresse térmico podem requerer o uso de instrumentos de medição com faixas de medição na classe S e a precisão da classe C.

A constante de tempo de um sensor é considerada como sendo numericamente igual ao tempo necessário para que o sensor efetue a substituição do valor do parâmetro que está sendo medido, para alcançar 63% da troca final, sem ultrapassá-la. O tempo de resposta é na prática o tempo depois do qual o parâmetro que está sendo medido pode ser considerado suficientemente próximo do valor exato e real do parâmetro a ser medido. Um tempo de resposta de 90% (proximidade de 90% com o valor real exato), é adquirido após um período igual a 2,3 vezes a constante de tempo.

Como a constante de tempo, e também o tempo de resposta dos sensores não dependem exclusivamente do sensor, mas também do ambiente e das condições sob as quais são executadas as medições, é necessário indicar as condições sob as quais os tempos de resposta foram obtidos. As condições ambientais padronizadas para a determinação do tempo de resposta encontram-se Tabela 1.9.

Tabela 1.8 - Características dos instrumentos de medição:

Quantity	Class C (comfort)				Class S (thermal stress)			Comments
	Symbol	Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	
Air temperature	t_a	10 to 40°C	Required: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ Desirable: $\pm 0,2^\circ\text{C}$ These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_a - t_a $ equal to 10 °C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	-40 to +120 °C	Required: - 40 to 0°C: $\pm (0,5 + 0,01 t_a)^\circ\text{C}$ > 0 to 50°C: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ > 50 to 120°C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_a - 50)]^\circ\text{C}$ Desirable: <u>required accuracy</u> / 2 These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_a - t_a $ equal to 20°C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	The air temperature sensor shall be effectively protected from any effects of the thermal radiation coming from hot or cold walls. An indication of the mean value over a period of 1 min is also desirable.
Mean radiant temperature	t_r	10 to 40°C	Required: $\pm 2^\circ\text{C}$ Desirable: $\pm 0,2^\circ\text{C}$ These levels are difficult or even impossible to achieve in certain cases with the equipment normally available. When they cannot be achieved, indicate the actual measuring precision	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	- 40°C to +150°C	Required: - 40 to 0°C: $\pm (5 + 0,02 t_r)^\circ\text{C}$ > 0 to 50°C: $\pm 5^\circ\text{C}$ > 50 to 150°C: $\pm [5 + 0,08 (t_r - 50)]^\circ\text{C}$ Desirable: - 40 to 0°C: $\pm (0,5 + 0,01 t_r)^\circ\text{C}$ > 0 to 50°C: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ > 50 to 150°C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_r - 50)]^\circ\text{C}$	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	When the measurement is carried out with a black sphere, the inaccuracy relation to the mean radiant temperature can be as high as $\pm 5^\circ\text{C}$ for class C and $\pm 20^\circ\text{C}$ for class S according to the environment and the inaccuracy for v_a , t_a and t_p
Plane radiant temperature	t_p	0 to 50°C	Required: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ Desirable: $\pm 0,2^\circ\text{C}$ These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_p - t_p < 10^\circ\text{C}$	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	0 to 200°C	Required: -60 to 0°C: $\pm (1+0,1 t_p)^\circ\text{C}$ 0 to 50°C: $\pm 1^\circ\text{C}$ 50 to 200°C: $\pm [1+0,1 (t_p - 50)]^\circ\text{C}$ Desirable: <u>required accuracy</u> / 2 These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_p - t_p < 20^\circ\text{C}$	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	
Air velocity	v_a	0,05 to 1 m/s	Required: $\pm (0,05 + 0,05v_a)$ m/s Desirable: $\pm (0,02 + 0,07 v_a)$ m/s These levels shall be guaranteed whatever the direction of flow within a solid angle () = $3 \pi \text{ sr}$	Required: 0,5 s Desirable: 0,2 s	0,2 to 20 m/s	Required: $\pm (0,1 + 0,05v_a)$ m/s Desirable: $\pm (0,05 + 0,05v_a)$ m/s These levels shall be guaranteed whatever the direction of flow within a solid angle () = $3 \pi \text{ sr}$	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	Except in the case of a unidirectional air current, the air velocity sensor shall measure the velocity whatever the direction of the air. An indication of the mean value and standard deviation for a period of 3 min is also desirable.
Absolute humidity expressed as partial pressure of water vapour	p_a	0,5 to 3,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa This level shall be guaranteed for a difference $ t_a - t_a $ of at least 10°C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	0,5 to 6,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa This level shall be guaranteed for a difference $ t_a - t_a $ of at least 20°C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	
Surface temperature	t_s	0-50°C	Required: $\pm 1^\circ\text{C}$ Desirable: $\pm 0,5^\circ\text{C}$	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	- 40 to +120°C	Required: < - 10°C: $\pm [1 + 0,05 (-t_s - 10)]$ - 10°C to 50°C: $\pm 1^\circ\text{C}$ > 50°C: $\pm [1 + 0,05 (t_s - 50)]$ Desirable: <u>required accuracy</u> / 2	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	

NOTE - At some work places in hot environments (steel, coal, glass industries) there may be a need to measure plane radiant and surface temperatures at higher levels than the range in this table. The manufacturers of instruments are required to state the accuracy for an extended range.

Tabela 1.9 - Condições de ambientes padrões para a determinação das constantes de tempos dos sensores.

Variáveis do ambiente padrão	t_a	t_r	p_a	v_a
Tempo de resposta dos sensores para:				
Temperatura do ar		$=t_a$	qualquer	$< 0,15$ m/s
Temperatura média radiante	$=t_r$		qualquer	$< 0,15$ m/s
Umidade absoluta	$= 20^\circ\text{C}$	$=t_a$		Ser especificada conf. método
Velocidade do ar	$= 20^\circ\text{C}$	$=t_a$	qualquer	
Temperatura radiante plana	$= 20^\circ\text{C}$	$=t_a$	qualquer	$< 0,15$ m/s
Temperatura superficial	$= 20^\circ\text{C}$	$=t_a$	qualquer	$< 0,15$ m/s

EXEMPLO DE INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO



Figura 1.11 - Confortímetro BABUC.

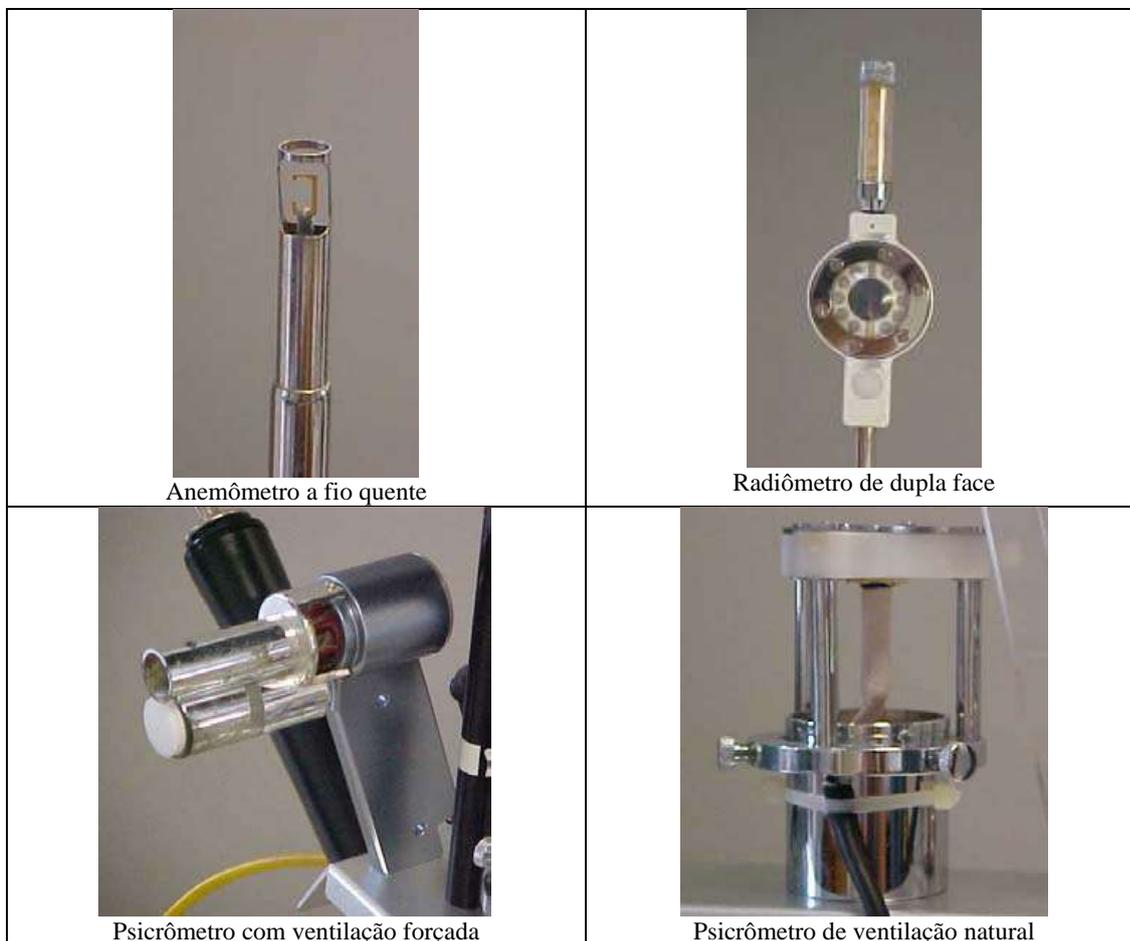
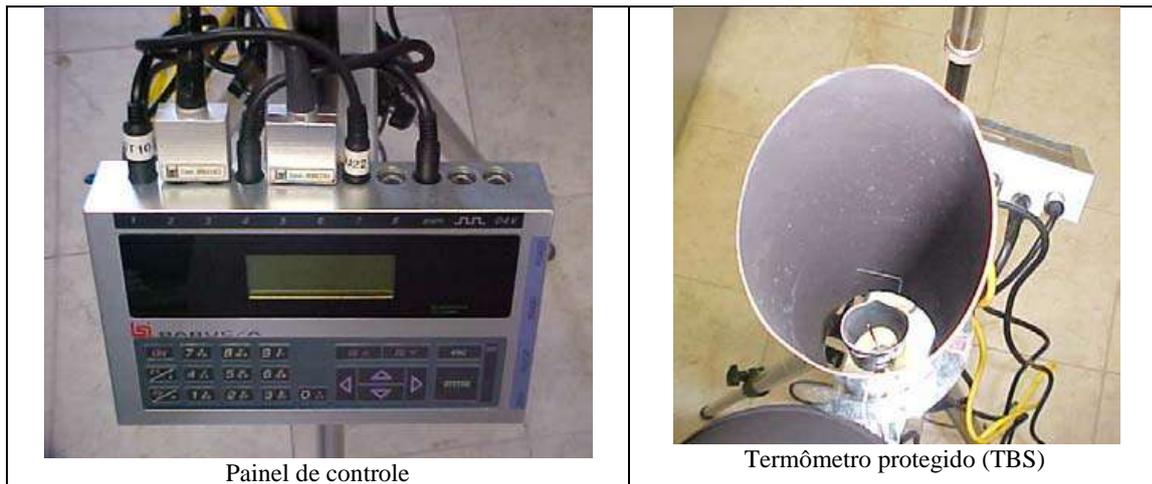


Figura 1.12 - Sensores do confortímetro BABUC.

1.4.5 Especificações relativas aos métodos de medição

As características físicas de um ambiente são variáveis em posição e no tempo, e assim sendo, as medições a serem realizadas devem levar em consideração essas variações.

1.4.5.1 Especificações relativas às variações dos parâmetros físicos no espaço ao redor da pessoa

Um ambiente pode ser considerado “homogêneo” do ponto de vista bioclimático, se em um dado momento suas variáveis físicas ao redor da pessoa podem ser consideradas praticamente constantes, isto é, os desvios padrões destas variáveis não podem exceder aos valores obtidos pela multiplicação entre a acuracidade de medição requerida, dada pela Tabela 1.8, e o correspondente valor do fator X apresentado na Tabela 1.10. Esta condição é frequentemente encontrada no caso de temperatura do ar, velocidade e umidade do ar, mas raramente no caso de radiação.

Tabela 1.10 - Critérios para um ambiente homogêneo e em estado permanente.

Variável	Classe C (conforto) Fator X	Classe S (stress térmico) Fator X
Temperatura do ar	3	4
Temperatura radiante média	2	2
Temperatura radiante plana	2	3
Velocidade do ar média	2	3
Pressão de vapor de água	2	3

Quando os desvios são superiores à multiplicação tratada anteriormente, os ambientes são ditos heterogêneos, e nesses casos devem ser executadas medições em vários pontos ao redor do indivíduo e registrados os resultados parciais obtidos, a fim de se determinar um valor médio dos parâmetros a serem considerados na avaliação do conforto ou da condição de estresse térmico. Em casos de dúvidas com relação à homogeneidade ou não de um ambiente, o mesmo deve ser considerado como heterogêneo.

A Tabela 1.11 apresenta a posição na qual devem ser executadas as medições dos parâmetros físicos básicos, bem como os coeficientes de ponderação a serem usados para a determinação do valor médio, de acordo com o tipo do ambiente considerado e a classe das especificações da medição.

As posições a serem medidos os parâmetros derivados devem seguir preferencialmente os dizeres da Tabela 1.11, porém devem ser respeitados os preceitos das Normas específicas que definem os índices de conforto e estresse térmico, as quais tem preferência sobre os dizeres desta Norma.

Os sensores devem estar localizados em alturas especificadas da Tabela 1.11, onde geralmente se executam as atividades. Quando for impossível de se interromper as atividades que estão sendo executadas, a fim de se localizarem os sensores nos locais exatos, estes devem ser dispostos onde as trocas térmicas sejam mais ou menos idênticas às que a pessoa está sujeita.

Tabela 1.11 - Posições de medições para as variáveis físicas de um ambiente.

Localização dos sensores	Coeficientes ponderados para os cálculos das variáveis				Alturas recomendadas	
	Ambientes homogêneos		Ambientes heterogêneos		Sentado	Em pé
	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S		
Nível da cabeça			1	1	1,1 m	1,7 m
Nível do abdomen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Nível do tornozelo			1	1	0,1 m	0,1 m

1.4.5.2 Especificações relativas às variações das variáveis físicas com o tempo

Os parâmetros físicos, e também pessoais (extraídos de tabelas), podem variar em função do tempo (hora da medição), pelas seguintes razões:

- a) Os parâmetros podem variar, para uma dada atividade, em função de incidentes externos tais quais os que acontecem em processos de fabricação, no caso de atividade industrial.
- b) Podem também variar de acordo com a movimentação da pessoa por diferentes ambientes, por exemplo, um ambiente quente próximo a uma máquina pode estar desconfortável enquanto o resto do ambiente confortável.

Um ambiente é dito estacionário em relação à pessoa quando os parâmetros físicos utilizados para descrever o nível de exposição ao calor são praticamente independentes do tempo, ou seja, as flutuações verificadas nos valores dos parâmetros com relação à sua média são insignificantes, não excedendo a multiplicação entre a acuracidade apresentada na Tabela 1.8 e o fator X apresentado na Tabela 1.10. Quando um ambiente não puder ser considerado estacionário, deverão ser feitos registros das principais variações dos parâmetros em função do tempo.

1.4.6 Anexo A: Medição da temperatura do ar

1.4.6.1 Introdução

A medição da temperatura do ar é particularmente importante quando se analisam as trocas de calor por convecção sobre o corpo da pessoa.

1.4.6.2 Princípios para se medir a temperatura do ar

A temperatura é determinada geralmente por medições de variáveis que são funções de volumes de líquidos, resistências elétricas, força eletromotiva, etc.

Qualquer que seja a variável com a qual está sendo relacionada a temperatura, a leitura do sensor corresponde somente à temperatura onde ele se encontra, a qual pode diferir da temperatura do fluido geral a ser medido.

1.4.6.3 Precauções a serem tomadas quando se mede a temperatura do ar

1ª - Redução do efeito da radiação:

Devem ser tomados cuidados para se proteger o sensor utilizado contra os efeitos da radiação proveniente de superfícies vizinhas, senão o valor medido não será o correto da temperatura do ar e sim um valor intermediário entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante. Estes cuidados podem ser efetivados de diferentes maneiras:

- a) Reduzindo a emissividade do sensor, utilizando um sensor polido quando o mesmo for de metal, ou utilizando-se um sensor coberto por tinta reflexiva quando o mesmo for do tipo isolante.
- b) Reduzindo a diferença de temperatura entre o sensor e as paredes adjacentes a ele. Quando essa redução não for possível, deve ser utilizada uma barreira radiativa entre o sensor e o ambiente (uma ou mais telas ou chapas refletivas finas, por exemplo, de alumínio de 0,1 a 0,2 mm). Deve ser deixado um espaço entre a proteção e o sensor para que haja convecção natural.
- c) Aumentando-se o coeficiente de convecção através de um aumento da velocidade do ar, utilizando-se ventilação forçada e reduzindo-se o tamanho do sensor.

2ª - Inércia térmica do sensor:

O sensor requer um determinado tempo para indicar a temperatura correta, já que a leitura não é instantânea. Uma medição não deve ser concretizada em um período menor a 1,5 vezes menos que o tempo de resposta (90%) do sensor.

Um sensor responderá mais rapidamente:

- a) Quanto menor a temperatura do sensor e mais baixo seu calor específico;
- b) Quanto melhor as trocas térmicas com o ambiente.

1.4.6.4 Tipos de sensores de temperatura:

Termômetros de expansão: Termômetros de expansão de líquidos (mercúrio, etc.), termômetros de expansão de sólidos.

Termômetros elétricos: Termômetros de resistência variada (resistor de platina, termistor), termômetros baseados em geração de força eletromotriz (termopares).

Termomanômetros: Variação da pressão de um líquido em função da temperatura.

1.4.7 Anexo B: Medição da temperatura radiante média

1.4.7.1 Introdução

O montante de calor radiante ganho ou perdido pelo corpo pode ser considerado a soma algébrica de todos os fluxos radiantes trocados por suas partes expostas com as várias fontes de calor a seu redor. A radiação a que está sujeita uma pessoa no interior de um ambiente pode ser determinada através das dimensões do ambiente, suas características térmicas e a localização da pessoa no ambiente. Este método pode, porém, ser complexo e bastante trabalhoso, uma vez que podem haver várias fontes emissoras de radiação e de variados tipos.

Os objetivos deste anexo são:

- a) Apresentar um método de determinação da temperatura média radiante através da temperatura do termômetro de globo, e temperatura e velocidade do ar ao nível do globo;
- b) Apresentar resumidamente outros métodos de obtenção desse parâmetro físico;
- c) Apresenta os princípios de cálculo da temperatura radiante média utilizando-se fatores de forma.

O termômetro de globo negro será utilizado neste anexo como um instrumento para a medição da variável ambiental denominada temperatura média radiante.

1.4.7.2 Medição da temperatura média radiante, utilizando-se o termômetro de globo

a) Descrição do termômetro de globo negro:

Consiste de um globo negro, em cujo centro é colocado um sensor de temperatura do tipo bulbo de mercúrio, termopar ou resistor. O globo pode, teoricamente, ter qualquer diâmetro, mas como a fórmula utilizada para o cálculo da temperatura média radiante depende do diâmetro do globo, um globo de 15 cm é recomendado. Quanto menor for o diâmetro do globo, maior seria o efeito da temperatura e velocidade do ar, o que leva a imprecisões nos resultados.

Como a superfície externa do globo deve absorver a radiação proveniente das paredes do ambiente, sua superfície deve ser negra ou por cobertura eletroquímica, ou mais comumente por pintura com tinta negra.

b) Princípios de medição:

O globo situado em um ambiente tende a um balanço térmico sob os efeitos das trocas térmicas devido à radiação, provindas de diferentes fontes do ambiente e devido aos efeitos da convecção. A temperatura do globo em situação de balanço térmico, permite que T_r , seja determinada. O balanço térmico é dado pela expressão:

$$R_g + C_g = 0$$

[Equação 24]

onde:

R_g = trocas térmicas por radiação entre as paredes do ambiente e o globo, em W/m^2

C_g = trocas térmicas por convecção entre o ar e o globo, em W/m^2

A transferência de calor por radiação (R_g) é dada pela expressão:

$$R_g = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_g^4)$$

[Equação 25]

onde:

ε_g = emissividade do globo negro (adimensional);

σ = constante de Stefan-Boltzman = $5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$;

T_r = temperatura radiante média, em Kelvins;

T_g = temperatura de globo, em Kelvins.

A transferência de calor por convecção (C_g) é dada pela expressão:

$$C_g = h_{cg} \cdot (T_a - T_g)$$

[Equação 26]

onde:

h_{cg} = coeficiente de transferência de calor por convecção ao nível do globo, em $W/m^2.K$

Em casos de convecção natural: $h_{cg} = 1,4 \cdot (\Delta T/D)^{1/4}$

Em casos de convecção forçada: $h_{cg} = 6,3 \cdot (v_a^{0,6} / D^{0,4})$

sendo:

D = diâmetro do globo, em metros;

v_a = velocidade do ar ao nível do globo, em m/s.

Em medição ambiental do **Tipo C**, o coeficiente de convecção a ser adotado deve ser o maior entre os dois mostrados acima, e em medição ambiental do **Tipo S**, pode-se adotar diretamente o coeficiente mostrado para casos de convecção forçada.

Substituindo os valores de R_g e C_g das equações 25 e 26 na equação 27, o balanço térmico pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$\varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_g^4) + h_{cg} \cdot (T_a - T_g) = 0$$

[Equação 27]

Isolando-se a temperatura média radiante, temos:

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \cdot \sigma} \cdot (T_g - T_a)}$$

[Equação 28]

Para o caso de convecção natural:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

[Equação 29]

No caso do globo padronizado, $D = 0,15m$, $\varepsilon_g = 0,95$ (pintura superficial externa negra), a equação 29 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

[Equação 30]

No caso de convecção forçada:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\epsilon_g \cdot D^{0,4}} \cdot (t_g - t_a)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

[Equação 31]

Ou, para o globo padronizado:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

[Equação 32]

Na prática, é esta a expressão que será mais usada para o cálculo da temperatura radiante média. Ela só é válida para o globo padronizado, e em convecção forçada.

Exemplo de aplicação:

Em uma medição em um ambiente, utilizando o globo padronizado, foram encontrados os seguintes valores para as variáveis ambientais:

$t_g = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_a = 0,3 \text{ m/s}$. Determinar a temperatura radiante média.

1º Passo: Determinação do coeficiente de convecção:

Para convecção natural: $h_{cg} = 1,4 \cdot (\Delta T / D)^{1/4} = 1,4 \cdot [(55 - 30) / 0,15]^{1/4} = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Para convecção forçada: $h_{cg} = 6,3 \cdot (v_a^{0,6} / D^{0,4}) = 6,3 \cdot (0,3^{0,6} / 0,15^{0,4}) = 6,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Nesse caso será utilizado o coeficiente de convecção forçada, por ser o maior.

2º Passo: Determinação da temperatura radiante média:

Substituindo os valores na equação 31:

$$t_r = [(55 + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (55 - 30)]^{1/4} - 273 \quad t_r = 74,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

c) Precauções e cuidados quando se utiliza o termômetro de globo:

Como a radiação em um ambiente é um dos principais fatores de stress térmico, uma determinação incorreta da temperatura radiante média pode levar a grandes erros na verificação global desse estado de stress. As seguintes precauções devem então ser tomadas:

C.1) Quando o ambiente apresenta uma emissão de radiação não homogênea em relação à pessoa, a utilização de apenas um termômetro de globo não é representativa da radiação à que está sujeita a pessoa. Nestes casos devem ser utilizados 3 termômetros de globo, localizados em níveis em relação a pessoa apresentados na Tabela 1.11 -

Posições de medições para as variáveis físicas de um ambiente., e a temperatura média radiante final será a média ponderada das 3 leituras, respeitando-se os coeficientes de ponderação apresentados na mesma tabela.

C.2) O tempo de resposta do termômetro de globo é de aproximadamente 20 a 30 minutos, de acordo com as características do globo e condições ambientais. Leituras sucessivas dessa temperatura permitirão que o equilíbrio seja facilmente alcançado. Em ambientes que variam sua condição de temperatura, radiação e velocidade do ar com muita rapidez, o termômetro de globo não é o instrumento indicado para a medição devido à sua alta inércia térmica.

C.3) A precisão da medição da temperatura média radiante pode variar em muito, de acordo com as precisões dos outros parâmetros ambientais medidos. Deve ser efetuada uma checagem a cada medição a fim de verificar se os parâmetros possuem suas precisões dentro dos limites dessa Norma, e em caso contrário, a precisão com a qual está se trabalhando deve ser indicada.

C.4) O uso do termômetro de globo representa uma aproximação da temperatura média radiante à que está sujeita uma pessoa, devido à sua forma esférica não corresponder a do corpo humano. Em casos particulares de medição da radiação oriunda do teto ou do piso, os valores apresentados com a utilização do globo são geralmente superestimados com relação aos reais sentidos pela pessoa. Um termômetro do tipo elipsoide concebe uma melhor representação nesses casos (Tabela 1.12).

Tabela 1.12 - Fatores de área projetados

		Acima/abaixo	direita/esquerda	frente/trás
Em pé	Pessoa	0,08	0,23	0,35
	Elipsóide	0,08	0,28	0,28
	Esfera	0,25	0,25	0,25
Sentada	Pessoa	0,18	0,22	0,30
	Elipsóide	0,18	0,22	0,28
	Esfera	0,25	0,25	0,25

C.5) O uso do termômetro de globo em casos de exposição à radiação de ondas curtas (o sol por exemplo), requerem que se utilize uma pintura no globo que apresente a mesma absorvidade para ondas curtas que as superfícies das roupas (cinza médio, por exemplo). Uma alternativa possível é a utilização do termômetro de globo e calcular a temperatura média radiante levando-se em conta a absorvidade da roupa utilizada pela pessoa. Em casos de determinação do IBUTG, o globo, mesmo na presença do sol, deve ser mantido com a pintura negra.

1.4.7.3 Outros métodos de medição da temperatura média radiante

a) Radiômetro de 2 esferas:

Neste método são utilizadas duas esferas com emissividades diferentes (uma negra e uma polida). Através da diferença de calor armazenado pelas duas esferas, a radiação é medida. A temperatura média radiante é calculada pela expressão:

$$T_r^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma \cdot (\epsilon_b - \epsilon_p)}$$

[Equação 33]

onde:

T_r = Temperatura radiante média em Kelvins

T_s = Temperatura do sensor, em Kelvins

P_p = Calor armazenado pelo sensor polido, em W/m^2

P_b = Calor armazenado pelo sensor negro, em W/m^2

ϵ_p = emissividade do sensor polido

ϵ_b = emissividade do sensor negro

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, em $W/m^2.K^4$

b) Sensor de temperatura do ar constante.

Neste método, um sensor (esférico ou elipsoidal) é mantido à mesma temperatura que o ar ao redor, não havendo assim ganhos ou perdas por convecção. O fornecimento de calor ou refrigeração para que se mantenham constantes as temperaturas (sensor e ar), é igual ao ganho ou perda de calor por radiação. A temperatura média radiante é dada pela seguinte expressão:

$$T_r^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \cdot \epsilon_s}$$

[Equação 34]

onde:

T_r = temperatura radiante média em Kelvins

T_s = temperatura do sensor em Kelvins

P_s = Fornecimento de calor (ou resfriamento) ao sensor, em W/m^2

ϵ_s = emissividade do sensor

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, em $W/m^2.K^4$

1.4.7.4 Métodos para o cálculo da temperatura radiante média

a) Cálculo através das temperaturas superficiais ao redor:

Para o cálculo da temperatura média radiante é necessário se conhecer as temperaturas das superfícies ao redor, bem como os fatores de forma entre a pessoa e as paredes ao redor, em função do tipo, do tamanho, e da posição relativa das paredes em relação à pessoa.

Como a maioria dos materiais de construção possuem alta emissividade, é possível se desconsiderar a reflexão, isto é, as superfícies são consideradas como negras. A temperatura média radiante é assim calculada:

$$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N}$$

[Equação 35]

onde:

T_r = temperatura radiante média em Kelvins

T_N = temperatura superficial da superfície N, em Kelvins

F_{p-N} = Fator de forma entre a pessoa e a superfície N.

A quarta potência da temperatura média radiante poderá ser considerada como sendo a média entre as temperaturas superficiais ao redor, ponderada pelos respectivos fatores de forma.

Os fatores de forma (F_{p-N}) podem ser estimados através das Figura 1.13 e Figura 1.14 a seguir, no caso de superfícies retangulares. Podem também ser calculados pela equação da Tabela 1.13, onde AC é a/c e BC é b/c nas Figuras de 1.12 a 1.15.

Se houver somente pequenas diferenças entre as temperaturas superficiais ao redor da pessoa, a equação pode ser simplificada para a forma linear do tipo.

$$T_r = T_1 \cdot F_{p-1} + T_2 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N \cdot F_{p-N} \quad \text{[Equação 36]}$$

Nesse caso, como a somatória dos fatores de forma é igual a 1, a temperatura radiante média pode ser considerada como a média entre as temperaturas superficiais, ponderadas pela seus respectivos fatores de forma.

A Equação 36 sempre fornece um valor levemente inferior ao da Equação 35, mas na maioria dos casos essa diferença é insignificante. Por exemplo, para diferenças de temperaturas superficiais de até 10 K, a diferença na temperatura média radiante, calculada pelas Equações 35 e 36 será de apenas 0,2 K. Já para o caso de grandes diferenças nas temperaturas superficiais, por exemplo, na ordem de 100 K, a temperatura média radiante calculada pela Equação 36, será aproximadamente 10 K inferior do que se calculada pela Equação 35.

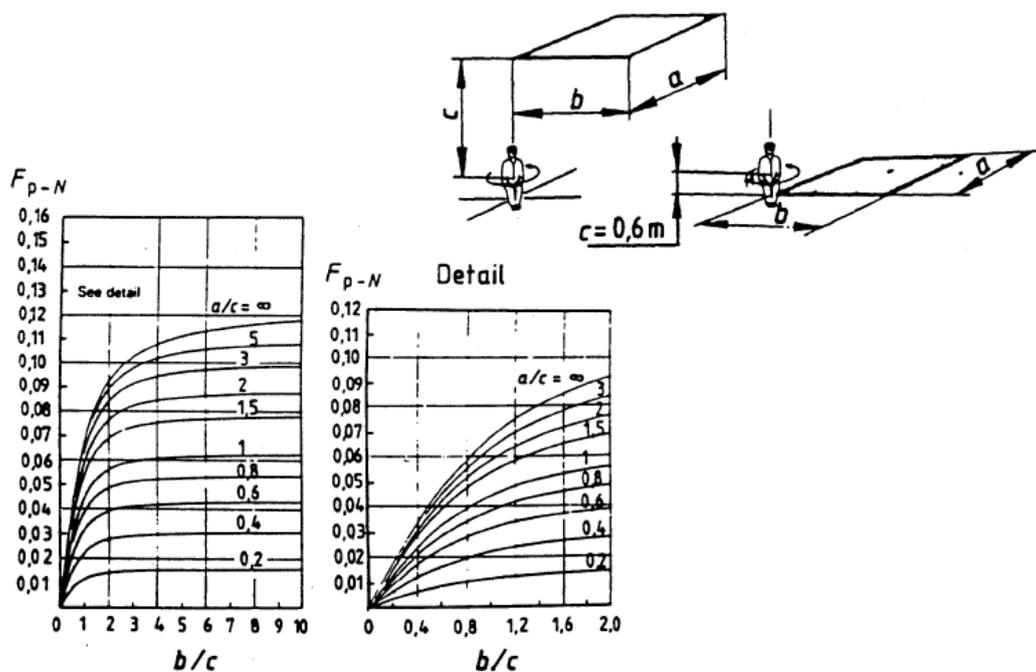


Figura 1.13 - Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa sentada e um retângulo vertical.

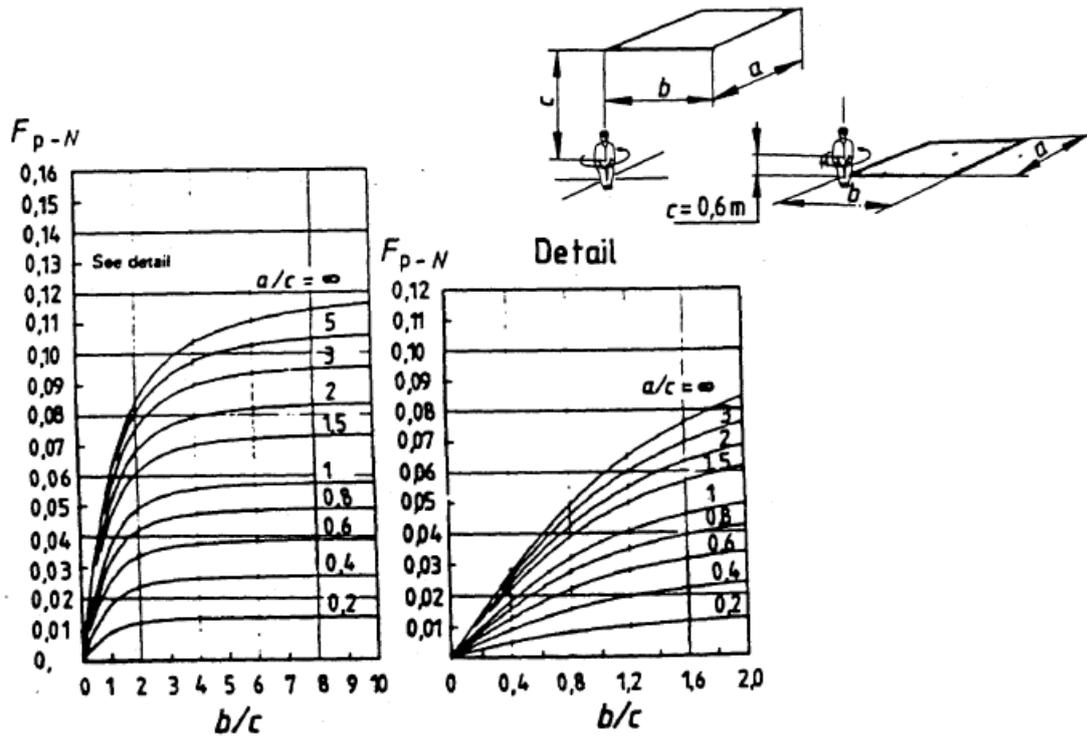


Figura 1.14 - Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa sentada e um retângulo horizontal.

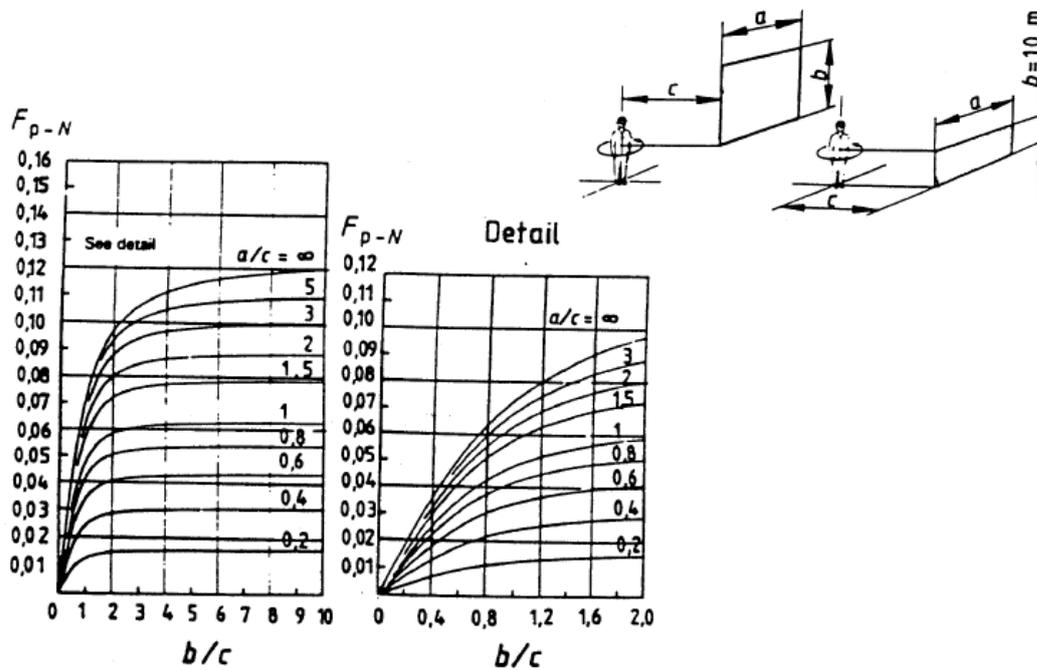


Figura 1.15 - Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa em pé e um retângulo vertical.

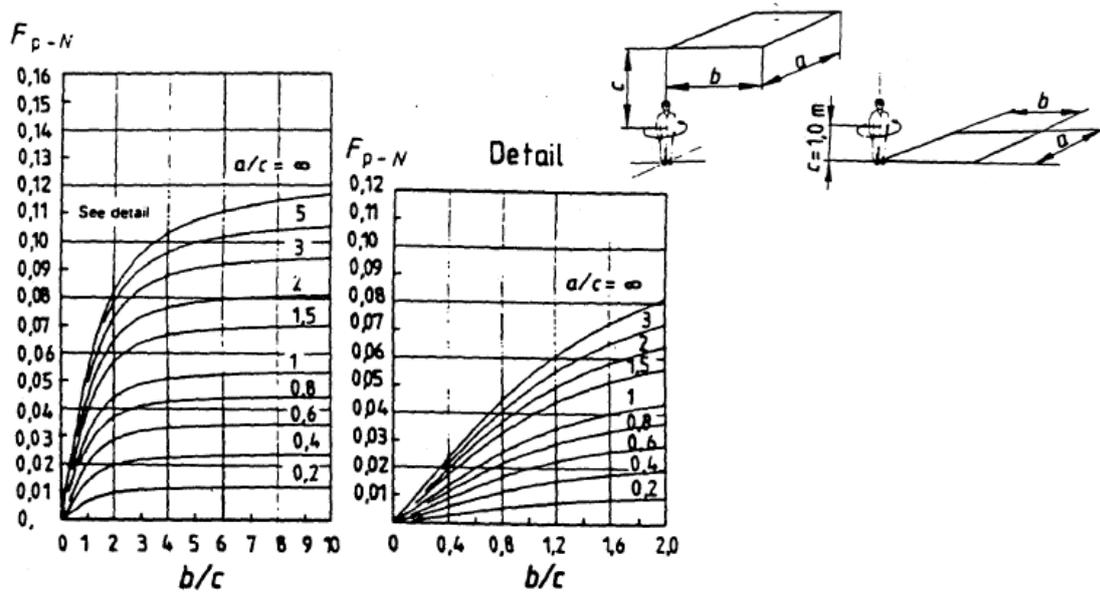


Figura 1.16 - Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa em pé e um retângulo horizontal.

Tabela 1.13 - Equações para cálculos dos fatores de forma.

FATORES DE FORMA: $F_{m\acute{a}x} \cdot (1 - e^{-(a/c)^\tau}) \cdot (1 - e^{-(b/c)^\gamma})$ onde: $\tau = A + B (a/c)$ $\gamma = C + D \cdot (b/c) + E \cdot (a/c)$						
	$F_{m\acute{a}x}$	A	B	C	D	E
PESSOA SENTADA, Figura 1.6.1 superfícies verticais: paredes, janelas	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
PESSOA SENTADA, Figura 1.6.2 superfícies horizontais: forro, piso	0,116	1,396	0,130	0,951	0,080	0,055
PESSOA EM PÉ, Figura 1.6.3 superfícies verticais: paredes, janela	0,120	1,242	0,167	0,616	0,082	0,051
PESSOA EM PÉ, Figura 1.6.4 superfícies horizontais: forro, piso	0,116	1,595	0,128	1,226	0,046	0,044

b) Cálculo através das temperaturas radiantes planas:

Para o cálculo da temperatura radiante média é necessário se conhecer as temperaturas radiantes planas (t_{pr}) nas 6 direções, bem como os fatores de área projetados para a pessoa nas mesmas 6 direções.

Os fatores de área projetados para uma pessoa sentada ou em pé, encontram-se na Tabela 1.12 - Fatores de área projetados, para as 6 posições: cima (1), baixo (2), esquerda (3), direita (4), frente (5), atrás (6). A temperatura média radiante pode assim ser calculada:

Para pessoas sentadas:

$$t_r = \frac{0,18(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,22(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda]) + 0,30(t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras])}{2(0,18 + 0,22 + 0,30)}$$

Para pessoas em pé:

$$t_r = \frac{0,08(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,23(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda]) + 0,35(t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras])}{2(0,08 + 0,23 + 0,35)}$$

[Equação 38]

onde:

t_r = temperatura radiante média;

t_{pr} = temperatura radiante plana.

Quando a orientação da pessoa não for definida, é utilizado o fator de área projetado médio de direita/esquerda e frente/atrás. Assim, as expressões podem ser simplificadas:

Para pessoas sentadas:

$$t_r = 0,13(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,185(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda] + t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras])$$

[Equação 39]

Para pessoas em pé:

$$t_r = 0,06(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,22(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda] + t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras])$$

[Equação 40]

1.4.8 Anexo C: Medição da temperatura radiante plana

1.6.8.1 - Introdução

O ser humano pode estar exposto à assimetria de radiação térmica em vários ambientes. Para avaliar a assimetria, o conceito de assimetria de temperatura radiante, o Δt_{pr} é utilizado. A equação é dada pela diferença entre a temperatura radiante plana em 2 direções opostas de um pequeno elemento plano.

1.4.8.1 Medição da temperatura radiante plana

a) *Sensor aquecido, consistindo de um disco reflexivo e um absorvivo:*

A temperatura radiante plana pode ser medida utilizando-se um sensor consistindo de um disco reflexivo (dourado) e um disco absorvivo (pintado de negro). O primeiro perde calor apenas por convecção, enquanto o segundo perde por convecção e radiação. Como os dois discos são aquecidos para a mesma temperatura, a diferença de suprimento de calor para que as temperaturas se mantenham constante, é igual a transferência de calor por radiação entre o disco pintado e o ambiente.

A temperatura radiante plana é assim calculada:

$$T_{pr}^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma \cdot (\epsilon_b - \epsilon_p)}$$

[Equação 41]

onde:

T_{pr} = temperatura radiante plana, em Kelvins;

T_s = temperatura do disco;

P_p = suprimento de calor para o disco polido, em W/m^2 ;

P_b = suprimento de calor para o disco negro, em W/m^2 ;

ε_p = emissividade do disco polido;

ε_b = emissividade do disco negro;

σ = constante de Stefan-Boltzmann, em $W/m^2.K^4$;

b) Disco a temperatura do ar constante:

Neste método, um pequeno elemento plano é mantido a mesma temperatura que a temperatura do ar ao redor, não havendo desta maneira, troca de calor por convecção. O suprimento de calor (ou resfriamento), necessário para manter constantes as temperaturas, é igual à troca de calor por radiação existente. A temperatura radiante plana é então calculada:

$$T_{pr}^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \cdot \varepsilon_s}$$

[Equação 42]

onde:

T_{pr} = temperatura radiante plana, em Kelvins

T_s = temperatura do disco, em Kelvins

P_s = Suprimento de calor (ou resfriamento), em W/m^2

ε_s = emissividade do disco

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, em $W/m^2.K^4$

1.4.8.2 Método para a medição da temperatura radiante plana e assimetria, utilizando o radiômetro

a) Descrição do radiômetro de fluxo líquido (dupla face)

Consiste em um pequeno elemento negro plano, com um fluxímetro de calor entre os dois lados do elemento. O fluxo líquido de calor entre os dois lados é igual à diferença entre a transferência de calor por radiação dos dois lados do elemento. Geralmente, o instrumento é coberto por uma fina cúpula de polietileno para se extinguir os efeitos da velocidade do ar. Ocasionalmente o instrumento é dotado de dispositivo para medição unidirecional.

b) Medição

O fluxo líquido de radiação é dado pela seguinte expressão:

$$P = \sigma \cdot (T_{pr1}^4 - T_{pr2}^4)$$

[Equação 43]

onde:

P = fluxo líquido de radiação medida, em W/m^2

T_{pr1} = Temperatura radiante plana do lado 1, em Kelvins

T_{pr2} = Temperatura radiante plana do lado 2, em Kelvins

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, em $W/m^2.K^4$

A assimetria da temperatura radiante é dada por:

$$\Delta t_{pr} = T_{pr1} - T_{pr2}$$

[Equação 44]

onde:

Δt_{pr} = assimetria da temperatura radiante, em Kelvins.

Este parâmetro não é medido diretamente pelo radiômetro, devendo ser calculado. A equação do fluxo líquido pode assim ser escrita:

$$P = 4 \cdot \sigma \cdot T_n^3 \cdot (T_{pr1} - T_{pr2})$$

[Equação 45]

onde:

T_n = temperatura absoluta do radiômetro de fluxo líquido, o qual é facilmente medido para a maioria dos radiômetros.

A assimetria da temperatura radiante pode assim ser escrita:

$$\Delta t_{pr} = \frac{P}{4 \cdot \sigma \cdot T_n^3}$$

[Equação 46]

A expressão abaixo fornece a radiação apenas em um lado do radiômetro, quando apenas é medida em um lado:

$$P_1 = \sigma \cdot T_{pr1}^4 - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_n^4$$

[Equação 47]

Isolando-se desta expressão a temperatura radiante plana e para $\varepsilon = 0,95$, obtém:

$$T_{pr1} = \sqrt[4]{0,95 \cdot T_n^4 + \frac{P_1}{\sigma}}$$

[Equação 48]

Para se determinar a temperatura radiante de assimetria deve-se também medir na direção oposta, a fim de se calcular T_{pr2} .

1.4.8.3 Método para cálculo da temperatura radiante de assimetria:

A temperatura radiante de assimetria pode ser calculada conhecendo-se:

- A temperatura superficial das superfícies ao redor;
- O fator de forma entre a pessoa e as superfícies ao redor, em função da geometria das superfícies, suas dimensões e a posição relativa da superfície em relação à pessoa.

Como a maioria dos materiais de construção apresentam uma alta emissividade, podem-se desprezar os efeitos da reflexão, sendo as superfícies consideradas como negras.

A temperatura radiante plana é assim calculada:

$$T_{pr}^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N} \quad \text{[Equação 49]}$$

onde:

T_{pr} = temperatura radiante plana, em Kelvins;

T_N = temperatura superficial da superfície N, em Kelvins;

F_{p-N} = fator de forma entre o pequeno elemento plano e a superfície.

Os fatores de forma (F_{p-N}) podem ser estimados de acordo com os ábacos das Figura 1.17 e Figura 1.18, ou Figura 1.19 e Figura 1.20, para casos de superfícies retangulares. Se as diferenças entre as temperaturas superficiais forem pequenas, a temperatura radiante plana pode assim ser simplificada:

$$T_{pr} = T_1 \cdot F_{p-1} + T_2 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N \cdot F_{p-N} \quad \text{[Equação 50]}$$

Pode-se então dizer que a temperatura radiante plana é o valor médio das temperaturas superficiais das superfícies ao redor, cujos coeficientes de ponderação são os fatores de forma. A Equação 46 sempre fornece uma temperatura radiante plana levemente inferior à fornecida pela Equação 47, porém na maioria dos casos essa diferença é pequena.

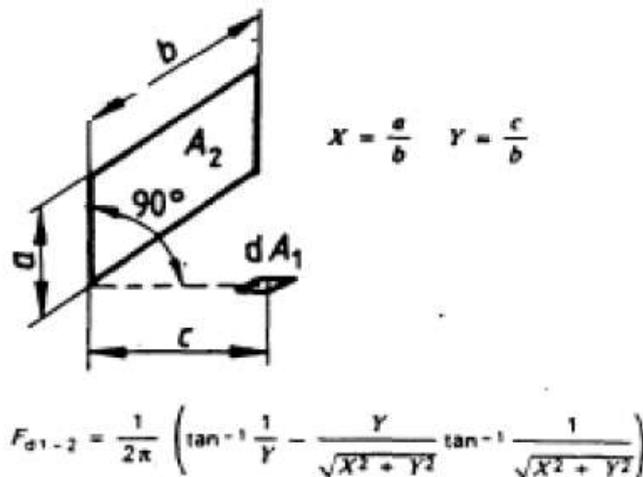


Figura 1.17 - Fórmula analítica para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano perpendicular a uma superfície retangular.

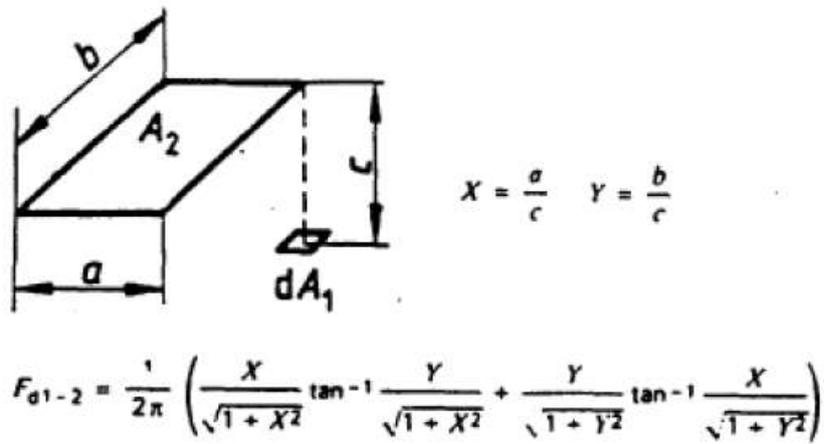


Figura 1.18 - Fórmula analítica para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano paralelo a uma superfície retangular.

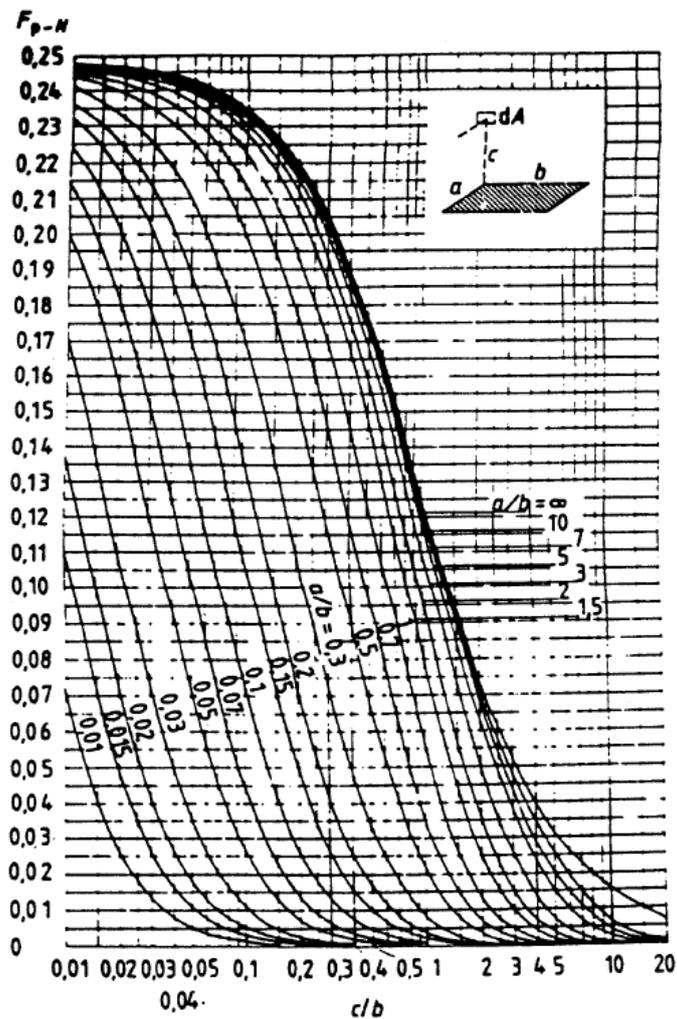


Figura 1.19 - Ábaco para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano perpendicular a uma superfície retangular

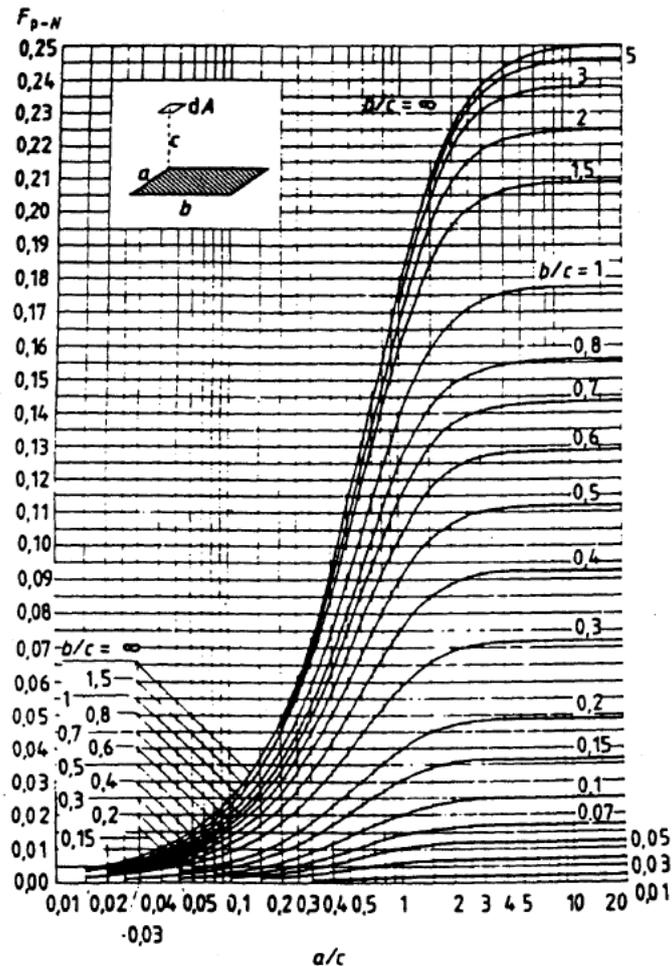


Figura 1.20 - Ábaco para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano paralelo a uma superfície retangular

1.4.9 Anexo D: Medição da umidade absoluta e relativa do ar

1.4.9.1 Introdução

A umidade absoluta do ar é sempre considerada para o entendimento da troca de calor por evaporação por uma pessoa. Uma alta umidade do ar reduz a evaporação do suor e conduz ao estresse térmico. Os dois tipos de instrumentos que aqui serão tratados e descritos seus princípios e cuidados na utilização são:

- Psicrômetro
- Higrômetro de lítio clorídrico.

1.4.9.2 Características termo-higrométricas do ar úmido

O ar úmido é uma mistura de vários gases que podem ser divididos em 2 grupos:

- Os gases que estão contidos no ar seco (oxigênio, nitrogênio, etc.);
- O vapor de água.

A certa temperatura, o ar não pode conter mais do que certa quantidade de vapor de água. Além desse limite, o vapor de água condensa. Com o aumento da temperatura, a quantidade máxima possível de vapor de água aumenta.

a) Umidade absoluta

Umidade absoluta é o valor real da quantidade de vapor de água contida em um ambiente. Geralmente é caracterizada por 2 parâmetros:

- Razão de umidade
- Pressão Parcial do Vapor de Água.

A.1) Razão de Umidade

A razão de umidade é a razão da massa de vapor de água numa amostra de ar, pela massa de ar seco na mesma amostra:

$$W_a = \frac{M_v}{M_a}$$

[Equação 51]

onde:

W_a = razão de umidade

M_v = massa do vapor de água

M_a = massa do ar seco

A.2) Pressão parcial

Pressão parcial do vapor de água do ar úmido (p_a) é a pressão que o vapor de água poderia exercer se sozinho ocupasse o volume do ar úmido, à mesma temperatura. Esses dois parâmetros são relacionados entre si:

$$W_a = 0,6220 \cdot \frac{p_a}{p - p_a}$$

[Equação 52]

onde:

W_a = razão de umidade

p_a = pressão parcial do vapor de água

p = pressão atmosférica total.

Para o ponto de saturação, estes dois parâmetros são conhecidos como razão de umidade de saturação (W_{as}) e pressão de saturação ou pressão de vapor saturado (p_{as}).

A pressão de vapor saturado (p_{as}) é tabelada em função da temperatura absoluta T , da mistura de ar úmido.

b) Umidade relativa

A umidade relativa é o montante de vapor de água do ar, em relação com o máximo montante de vapor de água que o ar pode conter a uma dada temperatura.

A umidade relativa, (e) é a razão entre a pressão do vapor de água (p_a) do ar úmido, e a pressão de vapor saturado (p_{as}) para uma mesma temperatura e mesma pressão atmosférica total.

$$e = \frac{p_a}{p_{as}}$$

[Equação 53]

Como a umidade relativa é geralmente expressa em porcentagem, escreve-se:

$$UR = 100.e$$

[Equação 54]

Para se analisar as trocas de calor por evaporação entre o homem e o ambiente, a umidade absoluta é que deve ser levada em consideração.

c) Determinação direta das características termo-higrométricas do ar úmido, utilizando a carta psicrométrica

As principais características do ar úmido estão agrupadas em uma carta conhecida como carta psicrométrica (Figura 1.21). As coordenadas dessa carta são:

No eixo x , a temperatura do ar (bulbo seco), em graus Celsius,

No eixo y , lado direito, a razão de umidade (W_a),

No eixo y , lado esquerdo, a pressão parcial de vapor de água (p_a), expressa ou em milímetros de mercúrio ou kilopascals.

Uma amostra de ar úmido é representada na carta por um ponto. Nota-se, contudo, que a uma dada temperatura do ar, a umidade absoluta não pode exceder uma quantidade máxima a qual corresponde a uma umidade relativa de 100%.

As características termo-higrométricas fornecidas pela carta psicrométrica referem-se a uma pressão atmosférica total de 100 kPa, ou 750 mm Hg. Medições de umidade executadas com outras pressões atmosféricas necessitam a utilização de cartas elaboradas para essas pressões.

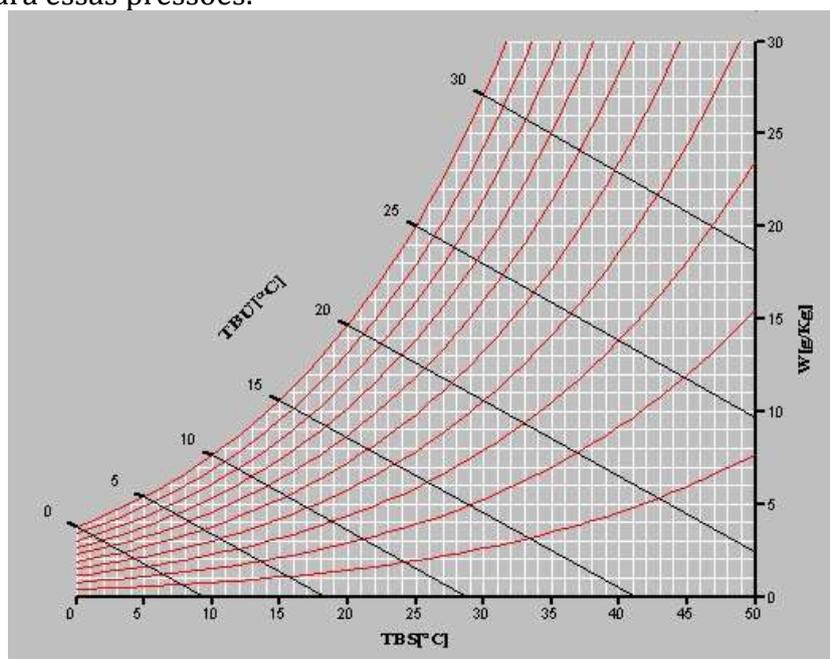


Figura 1.21 - Carta psicrométrica.

Tabela 1.14 - Equações de conversão de umidade.

Parameter	Equation	No.	Unit
Pas	$= 0,611 * e^{\frac{17,27 * t_a}{t_a + 237,3}}$	* (1)	kPa
	$= 100 \frac{Pa}{RH}$	(2)	kPa
Pa	$- p_{a,s,w} - 6,67 * 10^{-4} * (t_a - t_w)$	* (3)	kPa
	$= 0,01 * Pas * RH$	(4)	kPa
	$= \frac{p}{\frac{0,6220}{W_a} + 1}$	(5)	kPa
t _d	$= 38 * \log \frac{1000 * W_a}{4,8}$	* (6)	°C
	$= 234,3 \frac{\ln \frac{Pa}{0,611}}{17,27 - \ln \frac{Pa}{0,611}}$	* (7)	°C
W _a	$= 4,8 * 10^{-3} * 10^{\frac{t_d}{38}}$	* (8)	kg/kg
	$= 0,6220 \frac{Pa}{P - pa}$	(9)	kg/kg
RH	$= 100 * \frac{Pa}{Pas}$	(10)	%
* Approximated equations p = Atmospheric pressure			

1.4.9.3 Medição da umidade relativa utilizando-se o psicrômetro

a) Princípios de medição:

Um psicrômetro consiste em dois termômetros e um dispositivo para garantir uma mínima velocidade de ar (Figura 1.22). Os termômetros podem possuir qualquer tipo de sensor de temperatura (termômetro de mercúrio, termopar, resistor).

O primeiro é um termômetro comum, que indica a temperatura do ar (t_a). Essa temperatura será chamada de temperatura de bulbo seco, ao contrário da leitura do outro termômetro, que será a temperatura de bulbo úmido.

O outro consiste de um termômetro envolto por uma mecha de algodão molhada. O final do pavio (mecha) deve estar mergulhado em um recipiente com água destilada.

Por capilaridade a água atinge o bulbo do termômetro e então evapora a uma taxa dependente da umidade do ar. Essa evaporação gera um grande resfriamento do bulbo do termômetro com relação ao ar seco e essa temperatura fornecida pelo sensor é chamada de temperatura de bulbo úmido (t_{bu}).

As temperaturas observadas (seca e úmida) são utilizadas para a determinação da umidade absoluta do ar.

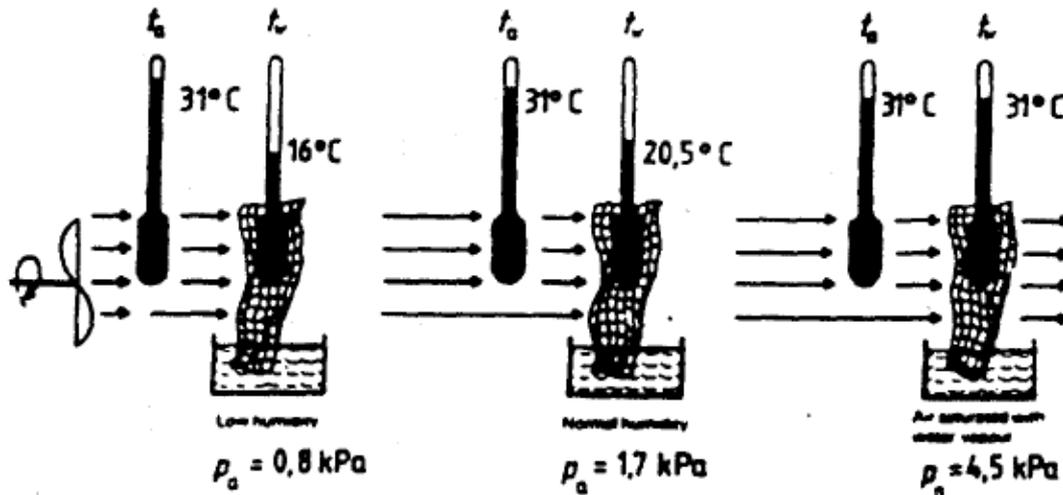


Figura 1.22 - Princípio de operação de um psicrômetro.

b) *Determinação direta da umidade absoluta do ar, utilizando-se uma carta psicrométrica*

A umidade absoluta do ar, expressa em termos de pressão parcial do vapor de água está relacionada com a temperatura de bulbo úmido segundo a seguinte expressão:

$$p_a = p_{asw} - A \cdot p \cdot (t_a - t_{bu}) \quad \text{[Equação 55]}$$

onde:

p_a = pressão parcial do vapor de água no ar, com mesmas unidades que p_{asw} e p .

p_{asw} = pressão do vapor saturado, determinado para a temperatura igual a t_{bu}

p = pressão atmosférica total, em milímetros de mercúrio ou kilopascals

A = coeficiente psicrométrico, em $^{\circ}\text{C}^{-1}$

t_a = temperatura do ar (bulbo seco), em $^{\circ}\text{C}$

t_{bu} = temperatura do bulbo úmido, em $^{\circ}\text{C}$

A expressão pode também assim ser escrita:

$$p_a = -A \cdot p \cdot t_a + A \cdot p \cdot t_{bu} + p_{asw} \quad \text{[Equação 56]}$$

ou

$$p_a = -A \cdot p \cdot t_a + f(t_{bu}) \quad \text{[Equação 57]}$$

Assim, em uma carta psicrométrica presume-se que o coeficiente psicrométrico (A) seja mais ou menos constante e as temperaturas de bulbo úmido são linhas inclinadas paralelas, de coeficiente angular (-A.p)

A intersecção entre a linha inclinada da temperatura de bulbo úmido (t_{bu}) com as linhas verticais da temperatura do ar (t_a) fornece um ponto representativo da umidade do ar considerado. A razão de umidade (W_a) e a pressão parcial do vapor de água (p_a) são lidos diretamente dos eixos y .

c) Precauções na utilização

O termômetro de bulbo úmido deveria ser ventilado a uma suficiente velocidade do ar de no mínimo 4 a 5 m/s. Os termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido deveriam ser protegidos contra a radiação por intermédio de uma barreira antirradiante. A mecha ou pavio em torno do termômetro de bulbo úmido deve se prolongar além da parte sensível do sensor, a fim de se evitarem erros devido à condução térmica no termômetro.

Tabela 1.15 - Diâmetros e comprimentos de mecha de tipos de termômetros de bulbo úmido

Tipo do termômetro	Diâmetro	Comprimento da mecha
termômetro mercúrio	--	20 mm
Termopar	1,20 mm	60 mm
	0,45 mm	30 mm
	0,12 mm	10 mm

A água que umedece a mecha deve ser destilada, uma vez que o vapor de pressão de água no caso de solução salina é menor que em água pura. A mecha do termômetro de bulbo úmido deve ser de tal tipo que permita que a água se desloque facilmente por capilaridade, particularmente quando a umidade absoluta do ar é baixa.

É necessário se medir a pressão atmosférica quando se apresentarem desvios perceptíveis a 100 kPa (1 ou 2%) [100 kPa = 1 bar].

1.4.9.4 Tipos de higrômetros

Higrômetros de ponto de orvalho. (Espelho resfriado);
 Higrômetros de variação de condutividade elétrica;
 Higrômetro de lítio clorido (medição de umidade absoluta);
 Higrômetro de lítio clorido (medição de umidade relativa);
 Higrômetro de adsorção (tipo fio de cabelo);
 Psicrômetro.

1.4.10 Anexo E: Medição da velocidade do ar

1.4.10.1 Introdução

A velocidade do ar é um parâmetro que deve ser levado em consideração quando se analisam as trocas de calor por convecção e evaporação na posição da pessoa. É um parâmetro que apresenta dificuldades na medição e determinação devido às constantes flutuações em intensidade e direção no tempo e no espaço.

Em vários campos de aplicação, um ou mais componentes da velocidade do ar instantâneos são necessários, enquanto nas equações de transferência de calor entre o

homem e o ambiente, somente se consideram os valores médios da velocidade do ar, isto é, intensidades médias, quaisquer que sejam as direções. Deve-se notar, contudo, que em estudos de conforto térmico, as flutuações da velocidade do ar têm um efeito na sensação subjetiva da corrente de ar.

Características dos instrumentos de medição a serem consideradas:

- A sensibilidade do sensor com relação à direção do fluxo,
- A sensibilidade do sensor com relação às flutuações na intensidade,
- A possibilidade de se obter um valor médio da velocidade, durante certo período de integração.

1.4.10.2 Acuracidade das precisões da velocidade

Os seguintes fatores devem ser levados em consideração para medições de velocidade acuradas:

- A calibração do instrumento;
- O tempo de resposta de sensor;
- O período de medição.

Medições acuradas de velocidades médias dependem da calibração do instrumento. A acuracidade das medições de desvios padrões, ou seja, da intensidade da turbulência, dependem do tempo de resposta do sensor.

Fluxos de ar com alta turbulência e baixa frequência das flutuações das velocidades necessitam períodos de medição maiores que os fluxos com baixa intensidade de turbulência e alta frequência das flutuações das velocidades.

1.4.10.3 Tipos de anemômetros

De maneira geral, a velocidade do ar pode ser determinada:

- 1) Ou pela utilização de um instrumento omnidirecional, que é sensível à magnitude da velocidade, independente de sua direção (esfera aquecida);
- 2) Ou se utilizando 3 sensores direcionais, que permitem que os componentes da velocidade do ar sejam medidos em 3 eixos perpendiculares. A velocidade do ar pode então ser determinada:

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

[Equação 58]

Nos casos em que o fluxo de ar é unidirecional é possível o uso de um sensor que seja sensível a só esta direção. A principal direção do fluxo de ar pode ser descoberta através de testes de fumaça. Os principais anemômetros utilizados em medições ambientais são:

- Anemômetros de copos ou pás (unidirecional);
- Anemômetros de fios quentes (unidirecional);
- Anemômetro de esfera aquecida, anemômetro termistor (omnidirecional)
- Anemômetro ultrasônico (omnidirecional);
- Anemômetro a laser (omnidirecional).

1.4.10.4 Descrição e princípios de operação do anemômetro de esfera aquecida

Como todos os sensores para medição de velocidade do ar, o anemômetro de esfera aquecida é baseado na medição da transferência de calor entre um sólido aquecido e o ar ambiente, o que depende das características aerodinâmicas do ar. A calibração do instrumento antes do uso permite que esta transferência de calor seja convertida em velocidade do ar.

O anemômetro consiste de uma esfera aquecida a uma temperatura muito superior à do ar ambiente. O elemento aquecido perde calor para o ambiente principalmente por convecção. O balanço térmico do elemento é assim expresso:

As características de aquecimento do elemento, a temperatura do elemento e do ar permitem que a velocidade do ar seja determinada através do uso do coeficiente de trocas de calor por convecção.

Todos os anemômetros de elementos aquecidos devem possuir 2 sensores de temperatura, um para medir a temperatura do elemento e outro para medir a temperatura do ar ambiente.

A metodologia de utilização pode ser de 2 maneiras:

- 1) Se o instrumento possuir uma potência de aquecimento constante, a medição da temperatura do elemento permite determinar a velocidade do ar;
- 2) Se o instrumento possuir a temperatura do elemento aquecido constante, a medição da potência necessária para que ela permaneça constante permite determinar a velocidade do ar.

A principal característica do anemômetro de esfera aquecida é a de possuir uma sensibilidade com relação à direção do fluxo de ar reduzido, enquanto o anemômetro de fio quente possui uma grande sensibilidade com relação à direção do fluxo.

1.4.10.5 Precauções a serem tomadas no uso de anemômetros de elementos aquecidos

A principal característica do sensor de esfera aquecida é ter reduzida a sensibilidade à direção do fluxo, exceto para um pequeno ângulo sólido ao redor do suporte do sensor (Figura 1.23). O anemômetro de fio quente tem uma alta sensibilidade à direção do fluxo de ar (Figura 1.24).

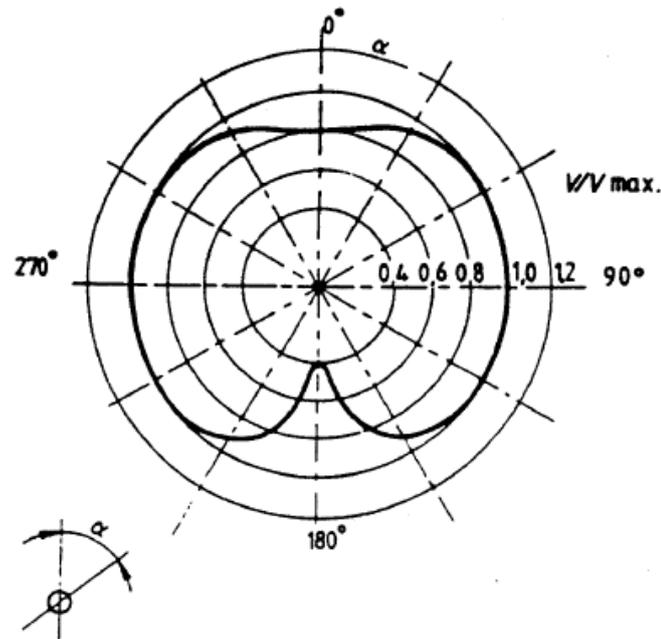


Figura 1.23 - Efeito da direção do fluxo do ar em um anemômetro de bulbo quente.

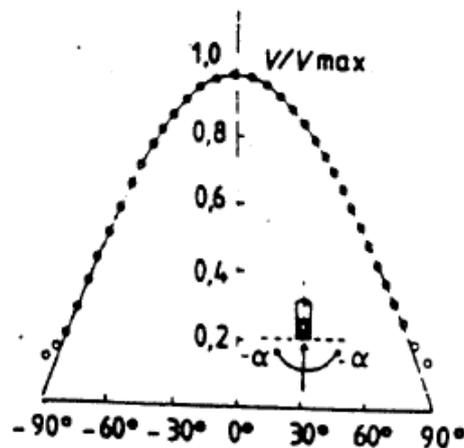


Figura 1.24 - Efeito da direção do fluxo de ar em um anemômetro de fio quente.

1.4.11 Anexo F: Medição da temperatura superficial

1.4.11.1 Introdução

A temperatura superficial é utilizada para avaliar as trocas radiativas entre o corpo humano por meio da temperatura média radiante ou da temperatura radiante plana. É também utilizada para avaliar o efeito do contato direto entre o corpo e uma superfície dada. Os instrumentos para a medição da temperatura superficial são:

Termômetros de contato (resistores, termopares);
Sensores infravermelhos.

1.4.11.2 Termômetros de contato

Consiste em um sensor de temperatura que esteja em contato com a superfície que se deseja avaliar. É importante que a troca de calor entre o sensor e a superfície seja significativamente superior à troca de calor entre o sensor e o ambiente, e para tal é desejável que seja grande a área de contato entre o sensor e a superfície e se isole o sensor com relação ao ambiente.

O contato do sensor com a superfície alterará as trocas de calor entre a superfície e o ambiente, e isso levará a falsos resultados de medição especialmente em superfícies com baixa condutividade térmica.

1.4.11.3 Radiômetros infravermelhos

Também chamados de sensores remotos de temperatura, permitem uma medição sem o contato com a superfície. Uma medição acurada da temperatura superficial requer conhecimento da emissão de ondas longas do objeto e o campo radiativo ao redor do objeto. Uma temperatura de referência é necessária para fazer medições de temperaturas superficiais absolutas. A resolução da temperatura dos radiômetros diminui com o decréscimo da temperatura do objeto.

1.4.12 Tipos de equipamentos e sensores para medições ambientais



Figura 1.25 - Psicrômetro giratório - Temperatura de bulbo seco (ar) e Temperatura de bulbo úmido com ventilação.



Figura 1.26 - Termômetro de globo negro.



Figura 1.27 - Termoanemômetro (temperatura do ar e velocidade do ar).



Figura 1.28 - Equipamento para medição de conforto e estresse BABUC - Itália.



Figura 1.29 - Equipamento para medição de conforto e estresse B&K - Dinamarca.



Figura 1.30 - Equipamento para medição de IBUTG - B&K.



Figura 1.31 - Psicrômetro com ventilação forçada, BABUC.



Figura 1.32 - Radiômetro de dupla face - BABUC.

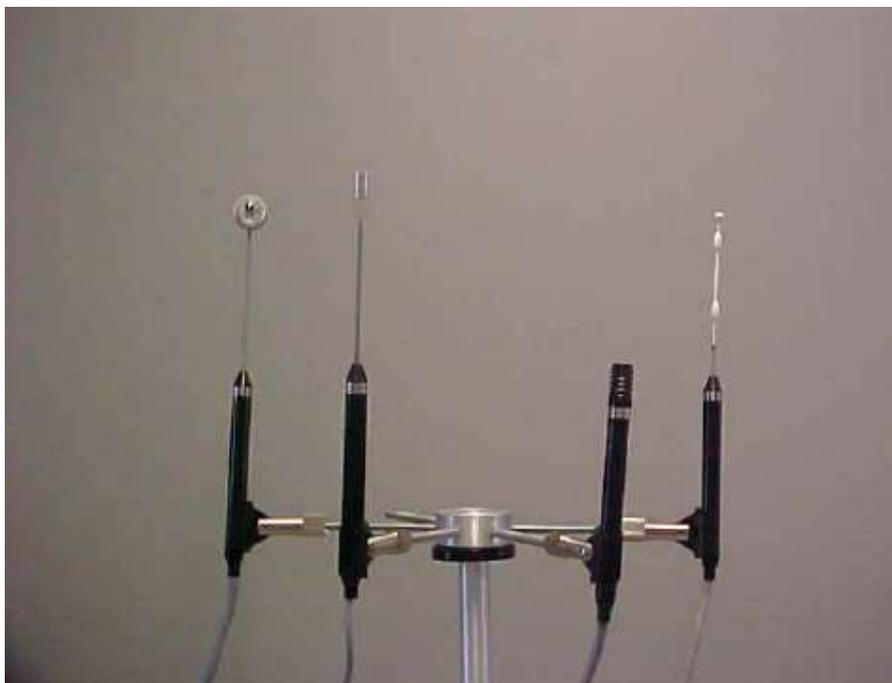


Figura 1.33 - Sensores para medição de conforto - B&K.

2 ESTRESSE (STRESS) TÉRMICO.

2.1 INTRODUÇÃO

O “*stress*” é uma expressão derivada da língua inglesa, que tem por definição: “*A ação inespecífica dos agentes e influências nocivas (frio ou calor excessivos, infecção, intoxicação, emoções violentas tais como inveja, ódio, medo etc.), que causam reações típicas do organismo, tais como síndrome de alerta e síndrome de adaptação*”. - Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa, Encyclopaedia Britannica do Brasil, 1975.

O stress térmico pode ser considerado como o estado psicofisiológico a que está submetida uma pessoa, quando exposta a situações ambientais extremas de frio ou calor.

O ser humano no desempenho de suas atividades, quando submetido a condições de stress térmico, tem entre outros sintomas, a debilitação do estado geral de saúde, alterações das reações psicossensoriais e a queda da capacidade de produção. Em vista disso, é fundamental o conhecimento a respeito das condições ambientais que possam levar a esse estado, bem como se observar o tipo de trabalho e o tempo de exposição do homem a tal situação.

Os estudos atuais acerca do stress térmico, bem como os mecanismos de sua determinação e ações preventivas e corretivas, encontram-se subdivididos em 2 grandes grupos de acordo com o tipo de ambiente que se está analisando, divididos em: Ambientes Quentes - Stress por calor; e Ambientes Frios - Stress por frio.

2.2 AMBIENTES QUENTES

Esses ambientes são caracterizados por condições ambientais que levam a ocorrência de stress por calor. Vários estudos e pesquisas têm sido feitas para estudar essas condições, bem como para fixar um índice aceitável que caracterize esses ambientes de trabalho ou essas situações particulares. Os principais índices existentes para essa caracterização conforme Szokolay e Auliciems (1997) são:

- a) *Relação de aceitação térmica (TAR) - Plummer, 1945;*
- b) *Taxa de suor estimada para 4 horas (P4SR) - McArdle, 1947;*
- c) *Índice de stress por calor (HSI) - Belding e Hatch, 1955;*
- d) *Índice de bulbo úmido e temperatura de globo (WBGT) - Yaglou e Minard, 1957;*
- e) *Índice de tensão térmica (TSI) - Lee, 1958;*
- f) *Índice relativo de tensão (RSI) - Lee e Henschel, 1963;*
- g) *Índice de stress térmico ou taxa requerida de suor (ITS) - Givoni, 1963.*

Devido à consistência e maior ou menor aceitação dos índices citados, 2 merecem estudos mais aprofundados, pois são referências normativas para a avaliação e determinação de stress térmico. São eles: “Índice de bulbo úmido e temperatura de globo (WBGT ou IBUTG em português)” e o “Índice de stress térmico” atualmente mais conhecido como “taxa requerida de suor (SW_{req})”.

Além desses índices, o estado de stress ou de tensão térmica também pode ser determinado por medições fisiológicas do corpo humano.

2.3 AMBIENTES FRIOS

Assim como visto no item anterior para o caso de ambientes quentes, os ambientes considerados frios são aqueles caracterizados por condições ambientais que levam à condição de stress por frio. Embora em número bem mais reduzido que no caso de ambientes quentes, esses ambientes e seus efeitos sobre o homem também se encontram estudados, sendo que o principal índice para determinar a situação de stress térmico por frio é conhecido por “*índice de isolamento requerido de vestimentas (IREQ)*”, desenvolvido por Holmer em 1984.

2.4 NORMAS DE REFERÊNCIA

Tanto os ambientes quentes, como os frios, que causem danos à saúde do trabalhador, foram objeto de estudos e pesquisas com o intuito de se padronizar a obtenção dos índices de estresse térmico bem como os procedimentos necessários a se adotar durante a verificação de tal situação. A normatização existente engloba ambos os ambientes, sendo que as 5 Normas mais conhecidas e utilizadas são as seguintes:

ISO 7243/1989 - Ambientes quentes - Estimativa do stress por calor em trabalhadores, baseado no índice IBUTG (Índice de bulbo úmido e temperatura de globo):

Fornece um método que pode ser facilmente utilizado em ambientes industriais, utilizando-se o índice IBUTG, e permite um rápido diagnóstico. Aplica-se para a avaliação do efeito médio do calor sobre o homem durante um período representativo de sua atividade, mas não se aplica para a avaliação do stress verificado durante períodos muito curtos, nem para a avaliação de stress por calor próximo das zonas de conforto térmico.

NR -15 - ANEXO 3 - MT/1978 - Limites de tolerância para exposição ao calor.

Esta Norma regulamentadora do Ministério do Trabalho do Brasil fixa os limites máximos de tempo a que um trabalhador pode ficar exposto, a uma condição de stress por calor, no desempenho de sua atividade, utilizando também o índice IBUTG. Relaciona a atividade desempenhada no posto de trabalho com os ciclos de trabalho/descanso em função dos valores máximos de referência do IBUTG tabelados.

Versão Antiga:

ISO 7933/1989 - Ambientes quentes - Determinação analítica e interpretação do stress térmico, utilizando o cálculo da taxa requerida de suor.

Esta Norma Internacional especifica um método de avaliação e interpretação do stress térmico a que está sujeita uma pessoa em um ambiente quente através do índice da taxa requerida de suor (SW_{req}). Descreve um método para o cálculo do balanço térmico, bem como para o cálculo da taxa de suor requerida pelo corpo para manter esse balanço em equilíbrio.

Versão Atual: Título original:

ISO 7933/2004 – Analytical Determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.

Versão Antiga:

ISO 9886/1992 - Avaliação da tensão térmica, através de medições fisiológicas.

Esta Norma Internacional descreve os métodos para medição e interpretação de dados fisiológicos de pessoas sujeitas a ambientes termicamente desfavoráveis. Os parâmetros fisiológicos a serem medidos e interpretados em conformidade com os preceitos dessa norma são: temperatura interna do corpo, temperatura da pele, taxa cardíaca e perda de massa corporal. A Norma fornece também os limites aceitáveis das respectivas variáveis tanto em ambientes quentes, como nos frios.

Versão Atual: Título original:

ISO 9886/2004 – Evaluation of thermal strain by physiological measurements.

Versão Antiga:

ISO/TR 11079/1993 - Avaliação de ambientes frios - Determinação do isolamento requerido das vestimentas (IREQ).

Propõe métodos e estratégias para se verificar o stress térmico associado à permanência em ambientes frios através da utilização do índice IREQ. Os métodos aplicam-se a casos de exposição contínua, intermitente ou ocasional em ambientes de trabalho tanto externos como internos.

Versão Atual: Título original:

ISO/TR 11079/2007 – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.

Devido aos objetivos dos estudos aqui tratados, não será entrado em maiores detalhes na avaliação de tensão térmica através de medições fisiológicas. Também não será tratada a determinação do stress térmico utilizando a taxa requerida de suor. Os preceitos das demais Normas citadas serão melhores detalhados nos capítulos a seguir.

2.5 ISO 7243/1989 - AMBIENTES QUENTES - ESTIMATIVA DO STRESS POR CALOR SOBRE O TRABALHADOR, BASEADO NO IBUTG - (BULBO ÚMIDO E TEMPERATURA DE GLOBO)

Este método se aplica para a avaliação do efeito médio do calor sobre o homem durante um período representativo de sua atividade, porém não se aplica para a avaliação do stress por calor ocorrido durante períodos muito curtos, nem na avaliação próximo à zona de conforto.

2.5.1 Princípios gerais

O stress por calor é dependente da produção interna de calor do corpo pela atividade física e das características ambientais do local do trabalho que permitam a troca de calor entre o corpo e a atmosfera. Dessa maneira, o stress térmico depende:

- a) Carga térmica interna do organismo;
- b) Características ambientais.

A carga térmica interna do organismo é o resultado da produção da energia metabólica causada pela atividade. As características ambientais são as referentes à temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade absoluta do ar. A influência dessas características ambientais básicas pode ser estimada através de medições de parâmetros ambientais derivados, os quais são considerados funções das características físicas do ambiente considerado.

O índice IBUTG é determinado pelo conhecimento de dois parâmetros ambientais derivados, a temperatura do bulbo úmido ventilado naturalmente (t_{bun}) e a temperatura de globo (t_g). Em algumas avaliações onde se tenha a presença da radiação solar é necessário também o conhecimento da temperatura do ar (t_a).

O IBUTG pode então ser calculado, de acordo com as seguintes expressões:

1) Ambientes internos ou externos sem radiação direta do sol:

$$\text{IBUTG} = 0,7.t_{bun} + 0,3.t_g$$

[Equação 59]

2) Ambientes externos com radiação solar direta:

$$\text{IBUTG} = 0,7.t_{bun} + 0,2.t_g + 0,1.t_a$$

[Equação 60]

Os cálculos dos valores médios levam em conta as variações espaciais e temporais dos parâmetros considerados. Os dados coletados e calculados são então comparados com valores de referência existentes e quando necessário, caso os valores encontrados estejam fora dos limites recomendados, deve-se:

- a) Reduzir diretamente o índice no local do trabalho através de métodos apropriados;
- b) Executar análises mais detalhadas de stress térmico utilizando outros métodos, que embora sejam mais elaborados, são mais complexos e de difícil aplicação na prática.

Os valores de referência citados correspondem aos níveis de exposição através dos quais, em determinadas condições especificadas e tabeladas, qualquer pessoa possa ficar exposta sem qualquer prejuízo à sua saúde, excluindo-se os casos onde se verifiquem a ocorrência de condições patológicas pré-existent. Esses níveis ou valores de referência devem, contudo, respeitar outros limites que possam ser fixados por outras importantes razões, como alterações as psicossensoriais, que podem causar acidentes de trabalho.

2.5.2 Medições das características ambientais

As características ambientais, bem como as características dos instrumentos de medição utilizados para tal, devem seguir os preceitos da ISO/DIS 7726/96.

2.5.2.1 Medições dos parâmetros derivados (t_{bun} e t_g)

A temperatura de bulbo úmido com ventilação natural (t_{bun}) é a temperatura fornecida por um sensor de temperatura coberto por um pavio molhado e ventilado naturalmente. É, portanto, diferente da temperatura termodinâmica ou de bulbo úmido (t_{bu}) determinada com psicrômetro, utilizada para a obtenção da umidade relativa do ar.

A temperatura de globo (t_g) é a temperatura indicada por um sensor de temperatura localizada no centro de um globo.

As características do sensor de temperatura de bulbo úmido ventilado naturalmente são:

- 1) Formato cilíndrico da parte sensível do sensor;
- 2) Diâmetro externo da parte sensível do sensor: $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$;
- 3) Comprimento do sensor: $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$;
- 4) Faixa de medição: 5°C a 40°C ;
- 5) Precisão de medição: $\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- 6) Toda a parte sensível do sensor deve ser coberto com um pavio branco, ou por material altamente absorvente de água (algodão por exemplo);
- 7) O suporte do sensor deve ter 6 mm , e 20 mm de seu comprimento deve estar coberto pelo pavio, para reduzir o efeito da condução de calor do suporte ao sensor;
- 8) O pavio deve ser colocado no sensor como uma manga e fixado sobre ele com precisão;
- 9) O pavio deve estar limpo, sem detritos;
- 10) A parte inferior do pavio deve estar imerso em um reservatório com água destilada. O comprimento livre do pavio no ar deve ser de 20 mm a 30 mm .
- 11) O reservatório de água deve ser tal que não permita um aquecimento da água por radiação do ambiente.

As características do sensor de temperatura de globo são:

- 1) Diâmetro do globo: 150 mm ;
 - 2) Emissividade média do globo: $0,95$ (globo pintado de preto);
 - 3) Espessura do material do globo: O mais fino possível;
 - 4) Faixa de medição: 20°C a 120°C ;
 - 5) Precisão de medição: Para a faixa de 20 a 50°C : $\pm 0,5^\circ\text{C}$. De 50 a 120°C : $\pm 1^\circ\text{C}$
- Observação: Outros dispositivos de medição que após calibração nas faixas especificadas forneçam resultados com a mesma precisão poderão ser utilizados.

2.5.2.2 Medição do parâmetro básico (t_a)

O sensor de temperatura do ar deve possuir um dispositivo de proteção contra a radiação que não impeça a circulação do ar a seu redor. A faixa de medição da temperatura do ar deve ser de 10°C a 60°C e sua precisão deve ser de $\pm 1^\circ\text{C}$.

2.5.3 Medição ou estimativa da taxa metabólica

Como a quantidade de calor produzida pelo organismo é um dos elementos de avaliação de stress térmico, é essencial sua determinação.

A energia metabólica, ou seja, a quantidade de energia consumida pelo corpo para o desempenho das atividades é uma boa estimativa para a maioria das situações de trabalho. A taxa metabólica, de acordo com a ISO 8996/90, pode assim ser determinada:

- 1) Pelo consumo de oxigênio do trabalhador;
- 2) Pela estimativa da taxa através de tabelas de referência, em função da atividade.

Para a avaliação de stress térmico pelo índice IBUTG, a utilização das tabelas padronizadas é suficiente. Na ausência de tabelas de referência mais precisas, a classificação das atividades podem ser feitas em 5 classes principais, que são: *descanso*, *baixa taxa metabólica*, *moderada taxa metabólica*, *alta taxa metabólica* e *taxa metabólica muito alta*. A Tabela 2.1 apresenta essa classificação, e os valores apresentados são referentes a execução de atividades contínuas.

2.5.4 Especificações das medições

2.5.4.1 Medições em ambientes heterogêneos

Em casos de ambientes heterogêneos, medições classe S, conforme ISO 7726/96, (ver item 1.4 desta apostila), propícios a ocorrência de stress térmico, onde não exista a constância de valores dos parâmetros no espaço ao redor da pessoa, o índice IBUTG deve ser determinado em 3 posições diferentes, representando a altura da cabeça, abdômen e tornozelos da pessoa com relação ao nível do piso. Assim sendo, as medições devem ser efetuadas e o IBUTG deve ser determinado:

- 1) Para pessoas em pé: a 0,1 m do piso, a 1,1 m do piso e a 1,7 m do piso.
- 2) Para pessoas sentadas: a 0,1 m do piso, a 0,6 m do piso e a 1,1 m do piso.

O IBUTG médio é então calculado pela seguinte expressão ponderada:

$$IBUTG = \frac{IBUTG_{cabeça} + (2 \cdot IBUTG_{abdome}) + IBUTG_{tornozelo}}{4} \quad \text{[Equação 61]}$$

Em casos de pequena heterogeneidade ($\leq 5\%$), pode ser feita apenas 1 medição, ao nível do abdome da pessoa e levando-se em consideração se ela se encontra sentada ou em de pé. Em ambientes onde a heterogeneidade é superior a 5% pode ser executada apenas 1 medição no nível onde o stress por calor seja mais acentuado. Esse procedimento leva a uma superestimação do estado de stress, sendo que esse fato deve ser apontado no relatório final de avaliação.

Tabela 2.1 - Classificação dos níveis de taxa metabólica. (Tabela 1 da ISO 7243/89)

Classe	Faixas de taxas metabólicas, M		Valores a serem utilizados para taxa metabólica média W/m ² W		Exemplos
	Relativos à unidade de área da pele (W/m ²)	Relativo à uma área da pele de 1,8m ² (W)			
0 Descanso	M ≤ 65	M ≤ 117	65	117	Descanso ou repouso
1 Baixa taxa metabólica	65 < M ≤ 130	117 < M ≤ 234	100	180	Sentado: leve atividade manual, trabalho com mãos e braços, trabalho com braços e pernas. De pé: Em bancadas leve, caminhando levemente 3,5km/h
2 Moderada taxa metabólica	130 < M ≤ 200	234 < M ≤ 360	165	297	De pé, moderado trabalho de mão e braços, braços e pernas, caminhar de 3,5 a 5,5 km/h
3 Alta taxa metabólica	200 < M ≤ 260	360 < M ≤ 468	230	414	Trabalho intenso de braços e tronco, caminhar de 5,5 a 7 km/h, puxar e empurrar cargas
4 Muito alta taxa metabólica	M > 260	M > 468	290	522	Atividade muito intensa. Correr e caminhar a mais de 7 km/h

2.5.4.2 No caso de variações temporais das variáveis

Em casos onde as variáveis de influência no stress variem temporalmente é necessário se executar várias medições no período de 1 hora, levando-se em consideração as variações dos valores e suas respectivas durações, sendo então determinado um valor médio para o parâmetro através da seguinte expressão de ponderação:

$$\bar{p} = \frac{p_1 \cdot t_1 + p_2 \cdot t_2 + \dots + p_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad \text{[Equação 62]}$$

onde:

p_1, p_2, p_n = parâmetro que se esteja medindo, podendo ser: t_{bun} , t_g , M ou IBUTG;
 t_1, t_2, t_n = período de ocorrência do valor do parâmetro, sendo: $t_1 + t_2 + \dots + t_n = 1$.

O número de medições dentro do intervalo de 1 hora é função da velocidade de variação do valor dos parâmetros, bem como das características de resposta do sensor.

2.5.4.3 Medição do valor médio da taxa metabólica

Em casos onde não houver variação da taxa metabólica o seu valor médio é retirado diretamente da Tabela 2.1. Quando houver variação da atividade no tempo deve-se executar a ponderação temporal apresentada no item 2.5.4.2 .

2.5.5 Período e duração das medições

2.5.5.1 Período das medições

Como o IBUTG representa o stress por calor que o trabalhador está sujeito na hora em que foi realizada a medição, é recomendado que esta seja realizada geralmente no período quente do verão, no meio do dia ou quando estiver em operação algum equipamento gerador de calor. Essas situações levam a resultados importantes concernentes a IBUTG máximo em períodos críticos.

2.5.5.2 Duração das medições

A duração de cada medição depende principalmente das características físicas e do tempo de resposta dos sensores utilizados (para maiores detalhes consultar ISO 7726), principalmente com relação ao sensor do termômetro de globo. Pode ser executada apenas 1 medição para a obtenção dos parâmetros, porém no caso de ocorrência de variações temporais dos mesmos, deve-se seguir o especificado no item 2.5.4.2.

2.5.6 Valores de referência

Os valores de referência para o IBUTG em função da atividade desempenhada encontram-se na Tabela 2.2. Caso esses valores sejam excedidos, deve-se:

1) Ou reduzir diretamente o stress por calor no posto de trabalho através de métodos apropriados, como controle do ambiente, do nível de atividade, do tempo de permanência no ambiente ou utilizando-se proteção individual;

2) Ou executar outras análises mais detalhadas de stress por calor de acordo com métodos mais sofisticados a fim de se verificar com maior confiabilidade a existência ou não da situação de stress.

Os valores constantes da Tabela 2.2 supõem um indivíduo vestido normalmente ($I_{cl}=0,6$ clo), apto para o desempenho das atividades e gozando de boa saúde. Se a vestimenta utilizada não estiver de acordo com o descrito acima, os valores de referência podem ser alterados, levando-se em conta as propriedades especiais das vestimentas e do ambiente analisado. Em geral, a utilização de vestimentas impermeáveis ao vapor de água requer uma diminuição dos valores de referência, enquanto a utilização de vestimentas reflexivas, de baixa emissividade, pode permitir um aumento destes. É recomendada no caso de dúvidas, a consulta a um especialista.

Caso a determinação da atividade não seja possível com precisão, recomenda-se utilizar a de taxa metabólica mais alta e se necessário, utilizar a de classe 4.

Tabela 2.2 - Valores de referência, em função da atividade desempenhada. (Tabela A.1 da ISO 7243/89)

Classe de taxa metabólica	Taxa metabólica		Valores de referência de IBUTG			
	Relativa a unid área (W/m^2)	Taxa total (W)	Pessoas aclimatadas ao calor ($^{\circ}C$)		Pessoas não aclimatadas ao calor ($^{\circ}C$)	
0	$M \leq 65$	$M \leq 117$	33		32	
1	$65 < M \leq 130$	$117 < M \leq 234$	30		29	
2	$130 < M \leq 200$	$234 < M \leq 360$	28		26	
3	$200 < M \leq 260$	$360 < M \leq 468$	Sem mov. de ar sensível 25	Com mov. de ar sensível 26	Sem mov. de ar sensível 22	Com mov. de ar sensível 23
4	$M > 260$	$M > 468$	23	25	18	20

A Figura 2.1 fornece alguns valores de referência estabelecidos para ciclos de trabalho/descanso. O gráfico dessa figura foi elaborado considerando-se que o local de descanso apresenta um índice de IBUTG igual ou muito próximo do IBUTG do posto de trabalho.

Devido a capacidade de adaptação fisiológica do organismo, uma pessoa que se encontra aclimatada com as condições ambientais, apresenta menos tensões ou disfunções fisiológicas do que uma pessoa que não encontra-se aclimatada. Essa aclimação pode ser efetuada artificialmente, através de exposições controladas a câmaras climatizadas ou naturalmente, aumentando-se gradativamente a exposição do indivíduo ao posto de trabalho até que suas reações sejam similares as dos trabalhadores aclimatados. O aumento de duração do trabalho de situação de não aclimação para aclimação deve ser feito gradualmente, num período superior a 7 dias.

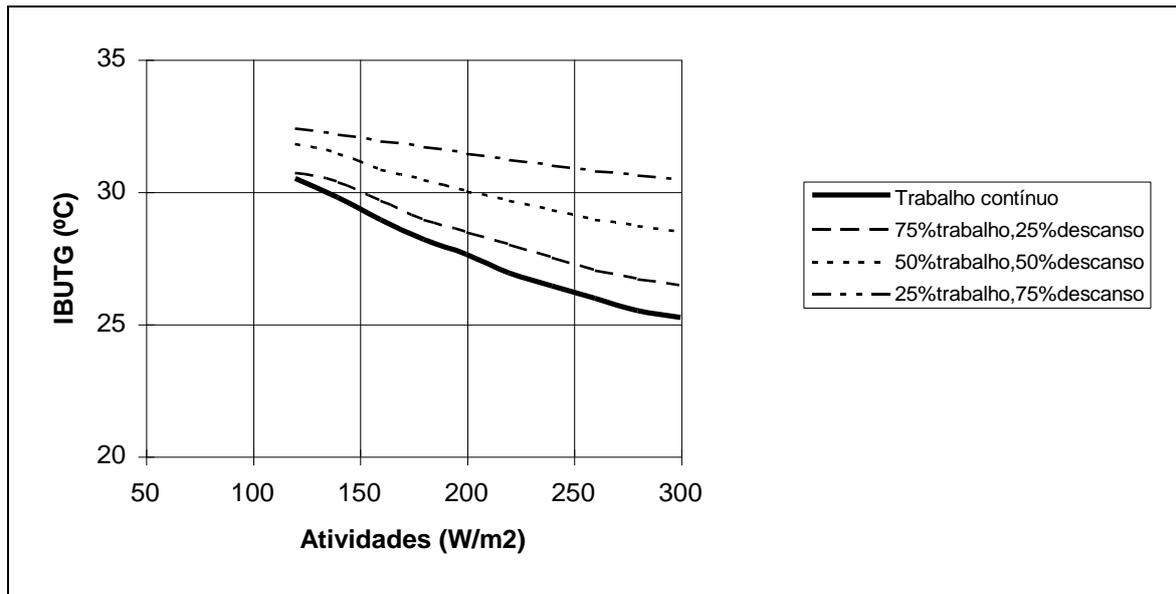


Figura 2.2 - Curvas de valores de referência de IBUTG, para vários ciclos de trabalho/descanso. (Figura B.1 da ISO 7243/89).

2.5.7 Relatório final de avaliação

O relatório final de avaliação do stress por calor, utilizando-se o índice IBUTG, deve apresentar os seguintes dados:

- 1) Local onde foi efetuada a avaliação (fábrica, escola, escritório, etc);
- 2) Período no qual foi feita a avaliação (dia, mês, ano, horário);
- 3) Condições meteorológicas externas (Temperatura, Umidade Relativa, Céu, Ventos);
- 4) Especialista ou profissional responsável pela avaliação;
- 5) Resultados detalhados das medições e estimativas dos parâmetros de referência;
- 6) Valor médio do IBUTG encontrado e sua comparação com os valores de referência.

2.5.8 Exemplo de aplicação

Analisar a situação de stress térmico da seguinte condição industrial:

$M = 2,4 \text{ met}$; $I_{cl} = 0,7 \text{ clo}$; $t_{bs} = 45,58^\circ\text{C}$; $t_{bun} = 34,60^\circ\text{C}$; $t_{bu} = 33,32^\circ\text{C}$; $t_g = 49,81^\circ\text{C}$;
 $v_a = 0,67 \text{ m/s}$; $p_a = 101 \text{ kPa}$ (Pressão atmosférica).

1º Passo: Atividade metabólica

$M = 2,4 \text{ met}$, mas como $1 \text{ met} = 58,20 \text{ W/m}^2$

$M = 140 \text{ W/m}^2$

De acordo com a tabela anterior, essa atividade é classificada como moderada atividade metabólica, classe 2.

2º Passo: Cálculo do IBUTG.

$$\text{IBUTG} = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,3 t_g = 0,7 \cdot 34,60 + 0,3 \cdot 49,81$$

$$\text{IBUTG} = 39,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3º Passo: Comparação do IBUTG calculado, com o IBUTG de referência:

De acordo com a tabela anterior, para pessoas aclimatadas com atividade metabólica de classe 2, o valor do IBUTG de referência é de 28°C, logo, o IBUTG calculado é bem superior ao valor de referência.

4º Passo: Análise da situação de trabalho.

De acordo com a Figura 2.2, o IBUTG máximo para trabalho contínuo com uma atividade metabólica de 140W/m² é de aproximadamente 29,50°C, e para regime intermitente com 25% de trabalho e 75% de descanso por hora, o IBUTG máximo é de 32,50°C (Para descanso no próprio local de trabalho). Dessa forma, não é permitido o trabalho nessas condições sem precauções especiais.

2.6 NR 15 - ANEXO 3 - LIMITES DE TOLERÂNCIA DE EXPOSIÇÃO AO CALOR

A Norma Regulamentadora NR 15 do Ministério do Trabalho do Brasil, fixa os limites aos quais os trabalhadores podem ficar expostos a ambientes quentes no desempenho de suas atividades. Assim como a ISO 7243, essa Norma também se baseia no índice do IBUTG para a avaliação da situação do stress térmico, porém difere da primeira principalmente com relação ao que se deve fazer quando os valores de referência são ultrapassados, pois nesta Norma, a maior preocupação é com relação ao tempo de exposição no desempenho das atividades e assim sendo, a Norma fixa os limites permitidos para a duração do trabalho levando-se em consideração o ciclo trabalho/descanso. A NR 15 também prevê a situação onde o descanso seja efetuado em locais diferentes daqueles onde o trabalho é efetuado, com valores de IBUTG diferentes para os locais de trabalho e descanso.

Sugere-se que para estudos e avaliações de stress térmico pelo método do índice do IBUTG onde se deseje apresentar resultados e conclusões mais completos, deve-se levar em conta os dizeres da NR 15 bem como da ISO 7243, muito embora a legislação brasileira permita estudos e laudos baseados apenas nos preceitos da NR 15.

Os principais dizeres da NR 15 encontram-se transcritos abaixo:

1) A exposição ao calor deve ser avaliada através do “Índice de Bulbo Úmido - Termômetro de Globo” (IBUTG), definido pelas equações que se seguem:

Ambientes internos sem carga solar:

$$\text{IBUTG} = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,3 t_g$$

[Equação 63]

Ambientes externos com carga solar:

$$\text{IBUTG} = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,2 t_g + 0,1 t_a$$

[Equação 64]

onde:

t_{bulbo} = temperatura de bulbo úmido natural;

t_g = temperatura de globo;

t_a = temperatura do ar.

2) Os aparelhos a serem utilizados nessa avaliação são: termômetro de bulbo úmido natural (sem ventilação), termômetro de globo e termômetro de mercúrio comum.

3) As medições devem ser efetuadas no local onde permanece o trabalhador, à altura da região do corpo mais atingida.

2.6.1 Limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente com períodos de descanso no próprio local de prestação de serviço

1) Em função do índice obtido pelas equações acima, o regime de trabalho intermitente será definido conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de referência para o índice IBUTG, em função da atividade e do ciclo trabalho/descanso. (Quadro 1 da NR-15)

Regime de trabalho intermitente (por hora)	Tipo de atividade		
	Leve	Moderada	Pesada
Trabalho contínuo	até 30,00	até 26,7	até 25,0
45 minutos de trabalho 15 minutos de descanso	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos de trabalho 30 minutos de descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos de trabalho 45 minutos de descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Trabalho não permitido sem medidas de controle adotadas	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

2) Os períodos de descanso serão considerados tempo de serviço para todos os efeitos legais

3) A determinação do tipo de atividade (leve, moderada ou pesada) está de acordo com o apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Taxas de metabolismo por tipo de atividade. (Quadro 3 da NR-15)

Tipo de atividade	M (kcal/h)	M (W)
SENTADO, EM REPOUSO.	100	117
Trabalho leve:		
Sentado. Movimentos moderados de braços e tronco (datilografia)	125	146
Sentado. Movimento moderado de braços e pernas (dirigir)	150	175
De pé. Trabalho leve em máquina, principalmente com os braços	150	175
Trabalho moderado:		
Sentado. Movimentos vigorosos de braços e pernas	180	210
De pé. Trabalho leve em máquina, com algum movimento	175	204
De pé. Trabalho moderado em máquina, com algum movimento	220	257
Em movimento. Trabalho moderado de levantar ou empurrar	300	350
Trabalho pesado:		
Trabalho intermitente de levantar, arrastar ou empurrar pesos	440	513
Trabalho fatigante	550	642

2.6.2 Limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente, com período de descanso em outro local (local de descanso).

1) Para os fins desse item, considera-se como local de descanso, ambiente termicamente mais ameno, com o trabalhador em repouso ou exercendo atividade leve.

2) Os limites de tolerância são dados segundo a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Valores de referência máximos de IBUTG em função da taxa metabólica média. (Quadro 2 da NR-15)

Atividade, M (kcal/h)	Atividade, M (W)	IBUTG máximo
175	204	30,5
200	233	30,0
250	292	28,5
300	350	27,5
350	408	26,5
400	467	26,0
450	525	25,5
500	583	25,0

A taxa de metabolismo média ponderada (M) para uma hora é determinada pela seguinte expressão ponderada:

$$M = \frac{M_t \cdot T_t + M_d \cdot T_d}{60}$$

[Equação 65]

onde:

M_t = Taxa de metabolismo no local do trabalho;

T_t = soma dos tempos, em minutos que se permanece no local do trabalho;

M_d = Taxa de metabolismo no local de descanso;

T_d = soma dos tempos, em minutos, em que se permanece no local de descanso.

Dessa maneira o $IBUTG_M$ é o valor $IBUTG$ médio ponderado para uma hora determinado pela seguinte expressão:

$$IBUTG_M = \frac{IBUTG_t \cdot T_t + IBUTG_d \cdot T_d}{60}$$

[Equação 66]

onde:

$IBUTG_t$ = valor do $IBUTG$ no local do trabalho;

$IBUTG_d$ = valor do $IBUTG$ no local de descanso;

T_t e T_d = tempos como anteriormente definidos os quais devem ser tomados no período mais desfavorável do ciclo de trabalho, sendo $T_t + T_d = 60$ minutos.

3) As taxas de metabolismo M_t e M_d serão obtidas consultando-se a Tabela 2.5.

4) Os períodos de descanso serão considerados como tempo de serviço para todos os efeitos legais.

2.6.3 Exemplo de aplicação

Analisar a situação de stress térmico pela NR -15 da mesma condição de trabalho do item 2.5.8:

1º Passo: Atividade Metabólica:

$M = 2,4$ met, mas como 1 met = $58,2$ W/m², temos que $M = 140$ W/m² a qual sendo transformada para kcal/h (unidade utilizada indevidamente pela NR-15):

$$M=215 \text{ kcal/h}$$

2º Passo: Cálculo do $IBUTG$:

$$IBUTG = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,3 t_g$$

$$IBUTG = 39,16^\circ\text{C}$$

3º Passo: Determinação da exposição máxima com regime trabalho e descanso no mesmo local da atividade:

De acordo com a tabela anterior, o $IBUTG$ de referência máximo é de $31,1^\circ\text{C}$ para um regime de trabalho de 45 minutos com 15 minutos de descanso no próprio local de trabalho e assim sendo, não é permitido o trabalho sem adoção de adequadas medidas de controle.

4º Passo: *Determinação do regime de trabalho/descanso, sendo o local de descanso mais ameno:*

Analisando a possibilidade: Local de descanso: $M = 100 \text{ kcal/h}$; $t_g = 24^\circ\text{C}$; $t_{\text{bun}} = 19^\circ\text{C}$; e trabalho intermitente com 30 minutos de trabalho e 30 minutos de descanso por hora:

Atividade metabólica ponderada:

$$M_m = (215 \times 30 + 100 \times 30) / 60 \quad M_m = 157,50 \text{ kcal/h}$$

Pela tabela anterior, o máximo IBUTG para essa atividade metabólica ponderada é de $30,5^\circ\text{C}$.

$$\text{IBUTG do local de descanso é: } \text{IBUTG}_d = 19 \times 0,7 + 24 \times 0,3 \quad \text{IBUTG}_d = 20,50^\circ\text{C}$$

$$\text{IBUTG ponderado é: } \text{IBUTG}_m = (39,16 \times 30 + 20,5 \times 30) / 60 \quad \text{IBUTG}_m = 29,83^\circ\text{C}$$

5º Passo: *Conclusões:*

Para as condições no posto de trabalho considerado é possível a realização de trabalho intermitente, com 30 minutos de trabalho e 30 minutos de descanso, desde que o local de descanso seja bem mais ameno, com variáveis ambientais da ordem de: $t_g = 24^\circ\text{C}$ e $t_{\text{bun}} = 19^\circ\text{C}$.