

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO.  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



**Laboratório de Eficiência Energética em  
Edificações**

**CONFORTO TÉRMICO  
e  
STRESS TÉRMICO**

**Elaborado por:**      **Prof. Roberto Lamberts, PhD.**  
   lamberts@ecv.ufsc.br  
**Prof. Antônio Augusto de Paula Xavier, Dr.**  
   augusto@pb.cefetpr.br

**Florianópolis, março de 2002.**

<b>1 - CONFORTO TÉRMICO</b> .....	<b>2</b>
1.1 - INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO: .....	2
1.1.1 - Definições: .....	2
1.1.2 –Tipos de pesquisas de campo: .....	3
1.1.3 - Variáveis que influenciam o conforto: .....	3
1.1.4 - Normalização em conforto térmico: .....	4
1.2 - PRINCÍPIOS FISIOLÓGICOS E CONFORTO:.....	5
1.2.1 - Zonas de respostas fisiológicas e comportamentais: .....	6
1.3 - BALANÇO DE CALOR DO CORPO E CONDIÇÕES DE CONFORTO:.....	6
1.3.1 - Condições de conforto térmico: .....	9
1.3.2 - Desconforto Localizado:.....	10
1.4 - EQUAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E EQUAÇÃO DO PMV .....	14
1.4.1 - Equação do conforto térmico e carga térmica: .....	14
1.4.2 - Equação do PMV:.....	15
1.5 - ISO 7730/94 - AMBIENTES TÉRMICOS MODERADOS - DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES PMV E PPD E ESPECIFICAÇÕES DAS CONDIÇÕES PARA CONFORTO TÉRMICO: .....	16
1.5.1 - Escopo: .....	16
1.5.2 - Normas de referência: .....	16
1.5.3 - Voto Médio Estimado - PMV: .....	16
1.5.4 - Percentagem de pessoas insatisfeitas - PPD: .....	18
1.5.5 - Taxas de correntes de ar - DR: .....	19
1.5.6 - Aceitabilidade de ambientes térmicos, visando o conforto:.....	19
1.5.7 - Anexos: .....	20
1.5.8 - Exemplo de aplicação:.....	28
1.6 - ISO/DIS 7726/96 - AMBIENTES TÉRMICOS - INSTRUMENTOS E MÉTODOS PARA A MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS. ....	29
1.6.1 - Introdução:.....	29
1.6.2 - Escopo e campo de aplicação:.....	29
1.6.3 - Referências Normativas: .....	30
1.6.4 - Gerais:.....	30
1.6.5 - Instrumentos de medição:.....	31
1.6.6 - Especificações relativas aos métodos de medição: .....	37
1.6.7 - Anexo A: Medição da temperatura do ar:.....	39
1.6.8 - Anexo B: Medição da temperatura radiante média: .....	40
1.6.9 - Anexo C: Medição da temperatura radiante plana: .....	48
1.6.10 - Anexo D: Medição da umidade absoluta e relativa do ar:.....	54
1.6.11 - Anexo E: Medição da velocidade do ar:.....	61
1.6.12 - Anexo F: Medição da temperatura superficial:.....	64
1.6.12 – Tipos de equipamentos e sensores para medições ambientais: .....	64
<b>2 - ESTRESSE (STRESS) TÉRMICO. ....</b>	<b>69</b>
2.1 - INTRODUÇÃO:.....	69
2.2 - AMBIENTES QUENTES: .....	69
2.3 - AMBIENTES FRIOS: .....	70
2.4 - NORMAS DE REFERÊNCIA: .....	70
2.5 - ISO 7243/1989 - AMBIENTES QUENTES - ESTIMATIVA DO STRESS POR CALOR SOBRE O TRABALHADOR, BASEADO NO IBUTG - (BULBO ÚMIDO E TEMPERATURA DE GLOBO).....	71
2.5.1. - Princípios gerais:.....	71
2.5.2 - Medições das características ambientais: .....	72
2.5.3 - Medição ou estimativa da taxa metabólica: .....	73
2.5.4 - Especificações das medições: .....	73
2.5.5 - Período e duração das medições: .....	75
2.5.6 - Valores de referência: .....	75
2.5.7 - Relatório final de avaliação: .....	77
2.5.8 - Exemplo de aplicação:.....	77
2.6 - NR 15 - ANEXO 3 - LIMITES DE TOLERÂNCIA DE EXPOSIÇÃO AO CALOR.....	78
2.6.1 Limites de tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente com	

<i>períodos de descanso no próprio local de prestação de serviço</i> .....	79
2.6.2 <i>Limites de tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente, com período de descanso em outro local (local de descanso)</i> .....	80
7.6.3 - <i>Exemplo de aplicação</i> :.....	81
2.7 - ISO 7933/1989 - AMBIENTES QUENTES - DETERMINAÇÃO E INTERPRETAÇÃO ANALÍTICAS DO STRESS TÉRMICO, UTILIZANDO O CÁLCULO DA TAXA REQUERIDA DE SUOR : .....	81
2.7.1 - <i>Princípios do método de avaliação</i> :.....	82
2.7.2 - <i>Principais etapas de cálculo</i> : .....	82
2.7.3 - <i>Interpretação da taxa requerida de suor</i> : .....	85
2.7.4 - <i>Anexos</i> : .....	88
2.7.5 - <i>Exemplo de aplicação</i> : .....	90
2.8 - ISO/TR 11079/1993 - AVALIAÇÃO DE AMBIENTES FRIOS - DETERMINAÇÃO DO ISOLAMENTO REQUERIDO DE ROUPAS. ....	94
2.8.1 - <i>Simbologia utilizada</i> : .....	94
2.8.2 - <i>Princípios dos métodos de avaliação</i> : .....	95
2.8.3 - <i>Resfriamento geral do corpo e determinação do IREQ</i> : .....	96
2.8.4 - <i>Resfriamento localizado e cálculo do WCI</i> :.....	98
2.8.5 - <i>Verificação prática de ambientes frios</i> : .....	99
2.8.6 - <i>Anexos</i> :.....	103
2.8.7 - <i>Exemplo de aplicação</i> :.....	105

# 1 - CONFORTO TÉRMICO

## 1.1 - INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO:

Os estudos de conforto térmico visam 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 conclusivas a esse respeito. Apesar 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 com climas artificiais, ambientes condicionados, e assim sendo, uma vez conhecendo-se as condições e os parâmetros relativos ao conforto térmico dos ocupantes do ambiente, 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, e assim busca-se criar condições de conforto para o grupo, ou seja condições nas quais a maior percentagem do grupo esteja em conforto térmico.

### 1.1.1 - Definições:

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

#### 1.1.1.1 - Conforto térmico:

Segundo a ASHRAE Standard 55-92, o conforto térmico é assim definido:

“Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

#### 1.1.1.2 - Neutralidade Térmica:

Segundo o pesquisador dinamarquês Ole Fanger (1970), neutralidade térmica é:

“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:

“Estado físico, no qual todo o calor gerado pelo organismo através do metabolismo, seja trocado em igual proporção com o ambiente ao redor, não havendo nem acúmulo de calor, nem perda excessiva do mesmo, mantendo a temperatura corporal constante”. Esta sugestão de conceito para neutralidade térmica, é compatível com o relato subjetivo das pessoas expressando satisfação com a temperatura do corpo como um todo.

Dessas 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 certamente em conforto térmico.

### **1.1.2 –Tipos de pesquisas de campo:**

As pesquisas normalmente utilizadas em estudos de conforto térmico, são divididas em dois grandes grupos:

#### *1.1.2.1 - Pesquisas em câmaras climatizadas:*

As pesquisas em câmaras climatizadas, são aquelas realizadas 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 a fim de fornecer uma situação confortável.

Os estudos realizados em câmaras climatizadas, principalmente por Fanger na Dinamarca e posteriormente por outros pesquisadores nos EUA e UK forneceram subsídios para o equacionamento e cálculos analíticos de conforto térmico das Normas.

#### *1.1.2.1 - Pesquisas de campo:*

As pesquisas de campo são aquelas realizadas em ambientes reais, com as pessoas desempenhando suas atividades rotineiras. Neste tipo de pesquisas, o pesquisador não interfere nas variáveis ambientais e pessoais, onde as pessoas expressam suas sensações e preferências térmicas em escalas apropriadas.

### **1.1.3 - Variáveis que influenciam o conforto:**

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 de pessoais 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 contidas na ISO/DIS 7726/96.

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 7730/94, ASHRAE Fundamentals cap.8 - 1997 e ISO 8996/90.

O isolamento térmico das roupas são determinados através de medições em manequins aquecidos ou determinados diretamente pelas tabelas constantes da ISO 7730/94, ASHRAE Fundamentals cap.8 - 1997 e ISO 9920/95.

#### **1.1.4 - Normalização em conforto térmico:**

Os estudos de conforto térmico tiveram nos últimos anos, um aumento de interesse por parte dos pesquisadores, sendo que as normas existentes 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 7730/94 - Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico.*

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/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.

*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 Fundamentals Handbook - cap. 8 Thermal Comfort - 1997:*

Este guia normativo da sociedade americana de aquecimento, refrigeração e ar condicionado, apresenta os fundamentos de termoregulação humana e conforto em termos úteis aos engenheiros para o 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 8996/90 - Ergonomia - Determinação da produção de calor metabólico.*

Esta norma internacional especifica métodos para a determinação e medição da taxa de calor metabólico, necessário para a avaliação da regulação de calor humana. 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 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.

## **1.2 - PRINCÍPIOS FISIOLÓGICOS E CONFORTO:**

Pode-se considerar o corpo humano, como uma “máquina térmica”, que dispõe de um mecanismo termoregulador, o qual controla as variações térmicas do organismo, e, por ser o organismo humano homotérmico, isto é, sua temperatura deve permanecer praticamente constante, esse mecanismo termoregulador cria condições para que isso ocorra.

Podemos entender por “máquina térmica”, àquela que necessita 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, 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 de calor, o qual é oriundo do metabolismo dos alimentos ingeridos e esse calor, também pode ser subdividido em 2 categorias, quais sejam: *Metabolismo basal*, que é aquela taxa de calor necessária para o desempenho das atividades basais, e *metabolismo devido às atividades externas*, que é aquela 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 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, uma vez 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, admite-se pequenas oscilações nessa temperatura interna, sendo que em situações mais extremas, admite-se variações um pouco maiores para se evitar os perigos de stress térmico.

Dessa 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 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, quais sejam:

*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 de pele ( $E_{sw}$  e  $E_{dif}$ ).

*Através da respiração:* Perda sensível de calor: **convecção (C<sub>res</sub>)**;

Perda latente de calor: **evaporação** ( $E_{res}$ ).

### 1.2.1 - Zonas de respostas fisiológicas e comportamentais:

As pessoas apresentam zonas de respostas fisiológicas e comportamentais, de acordo com as condições a que estiver submetida e de acordo com a atividade que estiver desempenhando. Como na maioria dos estudos de conforto térmico, as atividades desempenhadas são do tipo sedentárias, o fator humano de influência sobre a determinação da zona de conforto, é a vestimenta utilizada pelas pessoas. 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°C e 31°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°C.

Cada indivíduo possui uma temperatura corporal neutra, isto é, aquela em que não prefira sentir nem mais frio, nem mais calor no ambiente, isto é, que esteja em situação de neutralidade térmica (vide definição no item 1.1.1), e nem necessite utilizar seu mecanismo de termoregulação. 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 constricção;
- \*  $t_{corpo} < 35^{\circ}C$  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.

### 1.3 - Balanço de calor do corpo e condições de conforto:

O mecanismo termoregulador do organismo, tem como objetivo a manutenção da temperatura corporal constante. Assim sendo, a teoria assume que um organismo exposto por longo tempo a um ambiente térmico constante, moderado, tenderá a um equilíbrio térmico 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, estão relacionadas com a 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, num 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. Conforme visto em capítulos anteriores as variáveis, tanto **ambientais**, como temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar e as **variáveis pessoais**, como atividade e vestimentas, são incorporadas ao modelo.

A expressão do balanço de energia entre o corpo e o ambiente, pode então assim ser escrita:

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

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:

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

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 a 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 a 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 ( $W/m^2$ ).

A expressão do balanço térmico, pode assim se reescrita:

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

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 nú. Uma expressão

convencional para o cálculo dessa área, é dada através da expressão da área de DuBois ( $A_D$ ).

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

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 numeradas de 5 a 10 a seguir:

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

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

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

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

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

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

Ao substituírmos essas expressões na equação dupla do balanço térmico, o mesmo pode ser expresso em função das variáveis ambientais e pessoais, conforme equação 11 a seguir:

$$\begin{aligned} (M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) = \\ = \frac{[35,7 - 0,028(M - W)] - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} = \\ = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \quad [11]$$

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 ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ).

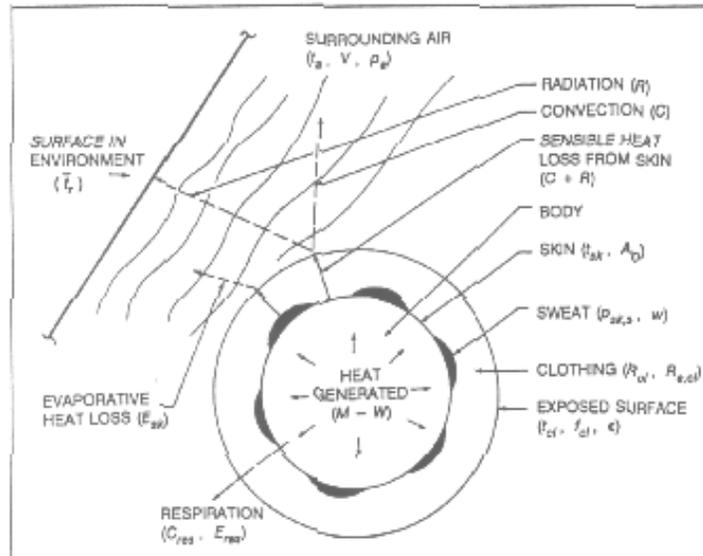


Figura 1.3.1: Interação térmica do corpo humano e ambiente.

### 1.3.1 - 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/m<sup>2</sup>)

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:

$$t_{skm} = 35,7 - 0,0275.M \quad [6]$$

$$E_{sw} = 0,42.(M - 58,15) \quad [7]$$

Podemos então dessa 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.*

Dentro do tratado no item 1.3.1, podemos representar esquematicamente as condições necessárias ao conforto térmico, conforme consta na figura 1.3.2.

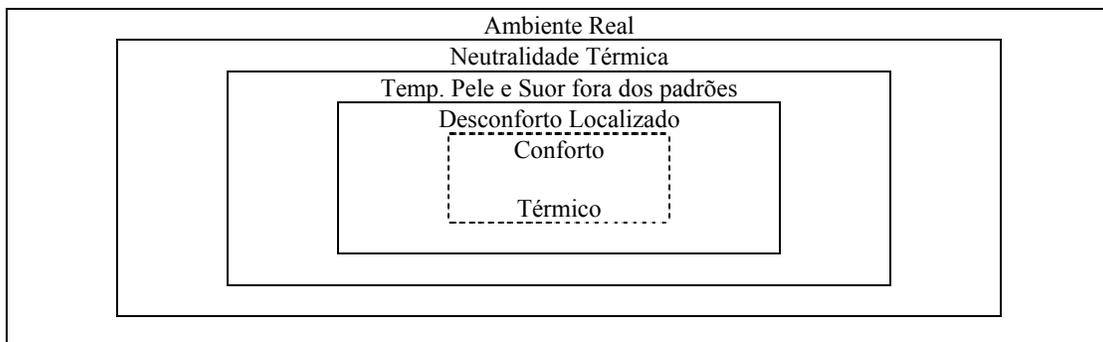


Figura 1.3.2: Representação esquemática, mostrando as condições necessárias ao conforto térmico.

### 1.3.2 - 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, porém apenas uma parte, e embora a pessoa possa estar

satisfeita com a temperatura do corpo como um todo, normalmente está aborrecida com esse incômodo, não estando dessa forma em conforto.

Entre os principais fatores que causam esse desconforto, podemos citar os 4 mais comuns:

### 1.3.2.1 - 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 de seu corpo atingida por radiação diferenciada das demais, e dessa forma quanto maior for esse diferencial mais desgostoso 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 dessa maneira 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 abaixo.

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 1.3.3 abaixo, ilustra situações diferenciadas de assimetria de radiação, que são fatores de insatisfação com o ambiente térmico:

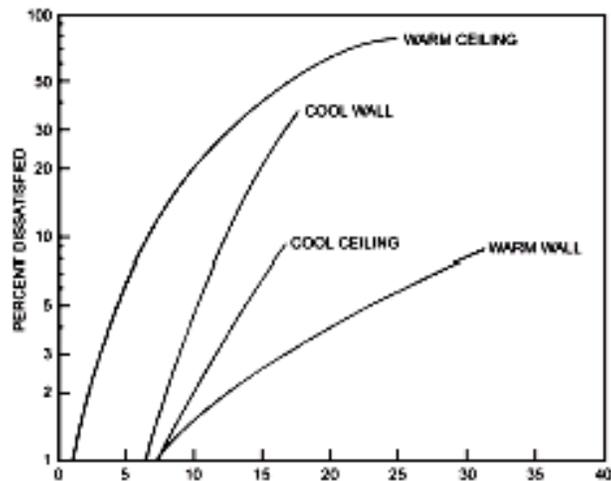


Figura 1.3.3: Percentagem de pessoas expressando desconforto devido à assimetria de radiação.

### 1.3.2.2 - Correntes de ar:

Essa situação que acarreta um resfriamento localizado em alguma parte do corpo

humano é causado 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 tem sido identificadas como um dos fatores mais aborrecedores 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 abaixo mostra o aumento das pessoas insatisfeitas com o ambiente à medida que se aumentava a velocidade média do ar sobre a região da cabeça.

A figura 1.3.4 apresenta situações de desconforto devido às correntes de ar, para diferentes temperaturas do ar.

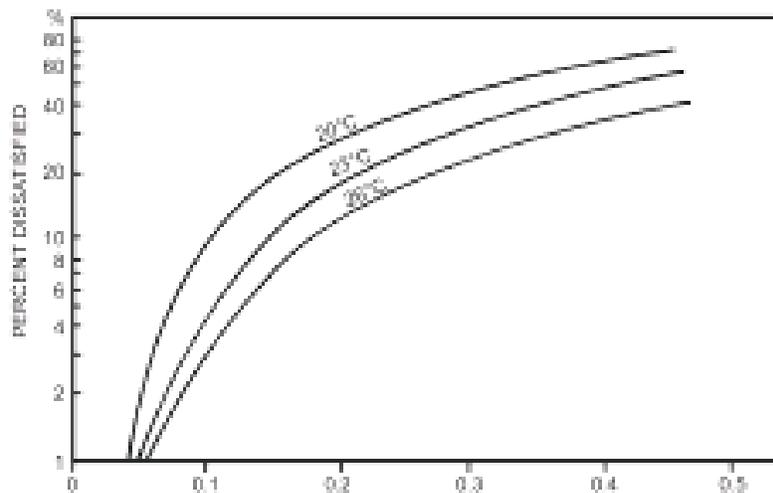


Figura 1.3.4: Percentagem de pessoas insatisfeitas, devido às correntes de ar.

### 1.3.2.3 - 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 abaixo.

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.

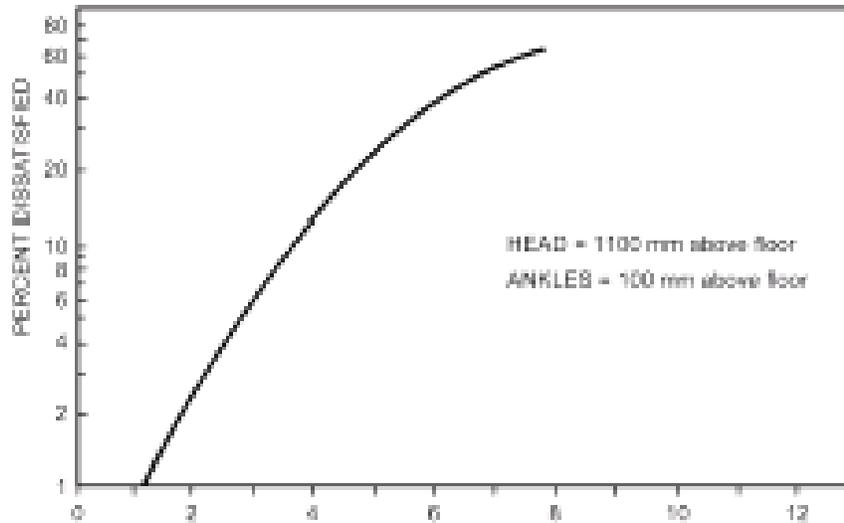


Figura 1.3.5: Percentagem de pessoas insatisfeitas devido à diferença de temperatura entre a cabeça e pés.

#### 1.3.2.4 - Pisos aquecidos ou resfriados:

Devido ao contato direto dos pés com o piso, desconforto local nos pés pode ser verificado com o piso estiver aquecido ou resfriado. A temperatura do piso é muito influenciada por características construtivas dos prédios (isolamento do piso, camada de contra-piso, 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, possibilitando o aumento do desconforto térmico e contribuindo 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 torna-se significativo.

Desses estudos empíricos, extraiu-se as seguintes faixas recomendadas de temperaturas:

Faixa de temperatura recomendada para pisos onde circulam pessoas descalça, conforme o revestimento do piso:

- \* Acabamento textil (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 1.3.6 exemplifica o descontentamento das pessoas, devido à temperatura do piso:

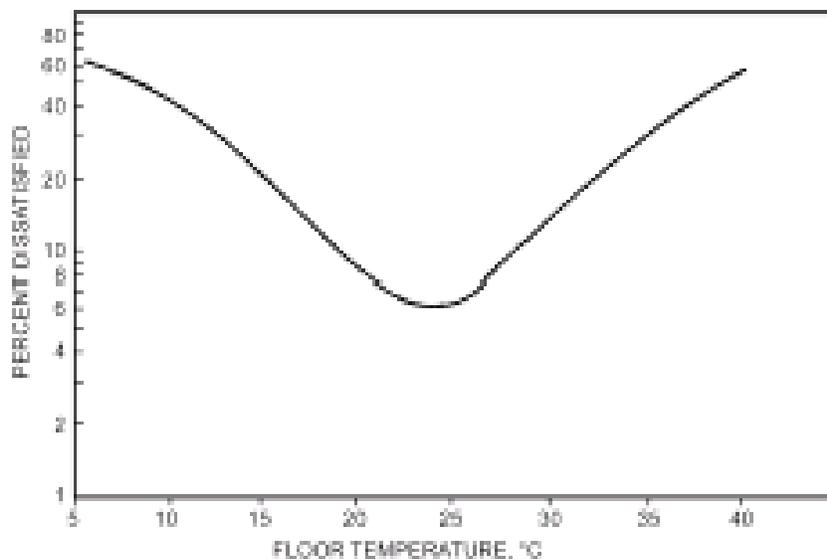


Figura 1.3.6: Percentagem de pessoas insatisfeitas, em função da temperatura do piso.

#### 1.4 - Equação do conforto térmico e equação do PMV

A equação dupla (5), apresentada anteriormente, representa o balanço de calor entre o corpo e o ambiente. Dessa equação, a temperatura superficial das roupas é dada ao compararmos a parte central com a direita da equação dupla, ou seja:

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

onde:

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

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

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

e

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

\* A equação (8) acima é calculada iterativamente.

##### 1.4.1 - Equação do conforto térmico e carga térmica:

Também oriunda da equação do balanço térmico (5), ao compararmos a parte da esquerda da equação com sua parte da direita, temos a “equação de conforto térmico”, conforme conceituação de Fanger, da ISO 7730/94 e da 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 1.4.2. De acordo com as normas, então, a equação de conforto térmico é assim representada:

$$M - 3,05.(5,73 - 0,007.M - p_a) - 0,42 .(M - 58,15) - 0,0173.M.(5,87 - p_a) - 0,0014.M.(34 - t_a) = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad [9]$$

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:

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

### 1.4.2 - Equação do PMV:

A equação de conforto térmico (9), apresentada anteriormente, foi expandida para englobar uma grande gama de 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.

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad [11]$$

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 utilizadas 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

## **1.5 - ISO 7730/94 - 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.

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. Além disso, fornece também um método para o cálculo da percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar, bem como apresenta os parâmetros relativos à condição de aceitabilidade térmica de um ambiente, tendo em vista os índices do PMV e PPD.

### **1.5.1 - 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 ela foi originalmente baseada em estudos realizados na América do Norte e Europa, principalmente nos estudos de Fanger, porém esta versão contém conclusões retiradas de recentes estudos realizados no Japão.

### **1.5.2 - Normas de referência:**

Encontram-se referenciadas nessa norma, os preceitos referentes às seguintes normas apresentadas abaixo:

*ISO 7726/85* - Ambientes térmicos - Instrumentos e métodos para medições de quantidades físicas. (Essa norma foi posteriormente atualizada, sendo que a nova versão, *ISO/DIS 7726/96*, encontra-se detalhada no item 1.6 desta).

*ISO 8996/90* - Ergonomia - Determinação da taxa metabólica de calor.

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

### **1.5.3 - 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.

### 1.5.3.1 - 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.

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 termoregulador de mais de 1300 pessoas, respostas estas que foram tratadas estatisticamente, atingindo-se a equação abaixo, que é obtida da substituição do valor de L, da equação 11, pelo sua respectiva expressão conforme equação 10:

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] \\ & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad [12]$$

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 12 acima, 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 $^\circ C$

$t_r$  = 10 a 40 $^\circ C$

$v_{ar}$  = 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 12 anterior;

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.

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

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.

#### 1.5.3.2 - 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.

#### 1.5.4 - Percentagem de pessoas insatisfeitas - PPD:

O índice PPD, estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas térmicamente 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 equação 13 abaixo em função do PMV, ou extraído da figura 1.5.1 apresentada abaixo:

$$PPD = 100 - 95.e^{-[0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2]} \quad [13]$$

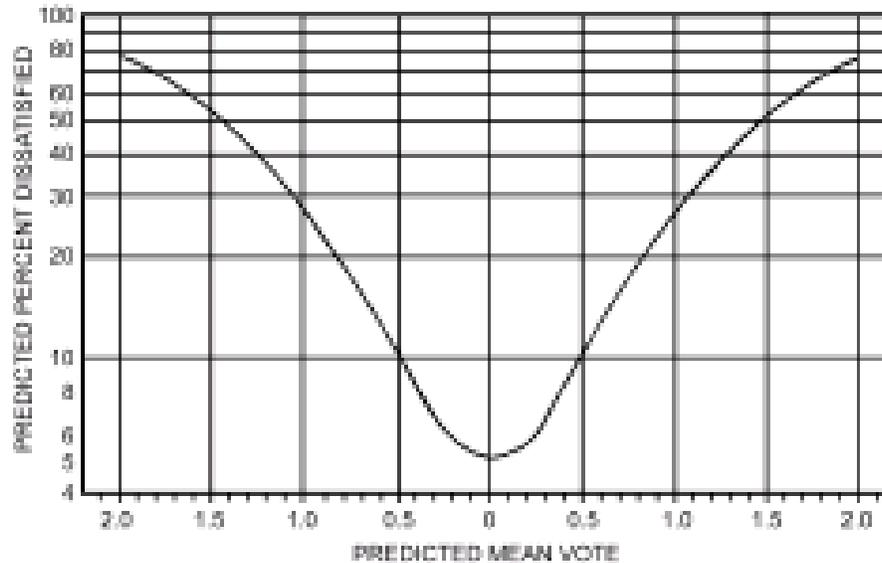


Figura 1.5.1: Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV).

### 1.5.5 - Taxas de correntes de ar - DR:

Taxa de corrente de ar, pode ser definida como resfriamento local não desejado do corpo, causado pelo movimento de ar. Ela pode ser expressa como uma percentagem de pessoas que estão aborrecidas pelas correntes de ar. Pode ser determinada através da seguinte equação empírica:

$$DR = (34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62}(0,37.v.Tu + 3,14) \quad [14]$$

onde:

DR = Percentagem de pessoas insatisfeitas devido à corrente de ar

$t_a$  = Temperatura do ar local, em °C

$v$  = Velocidade média de ar do local, em m/s

$Tu$  = Intensidade da turbulência local, em %, definida como a razão do desvio padrão da velocidade do ar local, pela velocidade média do ar local

A insatisfação por correntes de ar é mais baixa em atividades mais altas que a sedentária e para pessoas que estão sentindo mais calor do que neutras.

### 1.5.6 - Aceitabilidade de ambientes térmicos, visando o 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.

Os requerimentos de conforto térmico encontram-se especificados no anexo D desta Norma, estimando uma aceitabilidade térmica para 90% de seus ocupantes e prevendo que 85% dos ocupantes não estão insatisfeitos devido à correntes de ar

(Ambientes aceitáveis termicamente:  $-0,5 < PMV < +0,5$ )

Em alguns casos é desejados um ambiente com alta qualidade térmica (poucos insatisfeitos) e em outros casos é suficiente uma qualidade térmica menor (um pouco mais de insatisfeitos). Em ambos os casos, os índices de PMV e PPD, bem como a taxa de corrente de ar, podem ser utilizados para determinar outras faixas de parâmetros ambientais, do que as que estão contidas no anexo D desta Norma.

### 1.5.7 - Anexos:

A ISO 7730/94, apresenta ainda 5 anexos conforme apresentado abaixo:

#### 1.5.7.1 - Anexo A (Normativo) - Taxas metabólicas para diferentes atividades:

Este anexo fornece, conforme tabela 1.5.1 abaixo, as taxas metabólicas para algumas atividades cotidianas. Para maiores informações sobre taxas metabólicas, deve-se consultar a ISO 8996/90.

Tabela 1.5.1 (Tabela A.1 da ISO 7730/94): Taxas metabólicas

Atividades	Taxas Metabólicas	
	W/m <sup>2</sup>	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
-Andando em nível:	110	1,9
2 km/h	140	2,4
3 km/h	165	2,8
4 km/h	200	3,4
5 km/h		

#### 1.5.7.2 - Anexo B (Normativo) - Programa computacional para o cálculo do voto médio estimado, PMV, e percentagem de pessoas insatisfeitas, PPD:

1.5.7.3 - Anexo C (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/m<sup>2</sup>.

Tabela 1.5.2 - Tabela do PMV, para atividade metabólica de 69,6 W/m<sup>2</sup>

Clothing		Operative temperature °C	Relative air velocity m/s							
clo	m <sup>2</sup> ·°C/W		< 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	-1,65
		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
1,50	0,233	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
		12	-1,09	-1,09	-1,19	-1,27	-1,39	-1,48	-1,55	-1,75
		14	-0,75	-0,75	-0,85	-0,93	-1,03	-1,11	-1,17	-1,35
2,00	0,310	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	0,76	0,67
		26	1,35	1,31	1,27	1,24	1,20	1,18	1,15	1,08
		10	-0,77	-0,78	-0,86	-0,92	-1,01	-1,06	-1,11	-1,24
2,00	0,310	12	-0,49	-0,51	-0,58	-0,63	-0,71	-0,76	-0,80	-0,92
		14	-0,21	-0,23	-0,29	-0,34	-0,41	-0,46	-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	1,06

#### 1.5.7.4 - Anexo D (Informativo) - Requerimentos recomendados para conforto térmico:

São recomendados requerimentos para conforto térmico em ambientes para ocupação humana.

É recomendado como aceitável o ambiente no qual a percentagem de pessoas insatisfeitas seja menor que 10%. Isto corresponde ao seguinte critério para o PMV:

$$- 0,5 < \text{PMV} < + 0,5.$$

Como exemplo, limites de conforto para a temperatura operativa são dadas na figura 1.5.2 abaixo, em função da atividade e vestimenta:

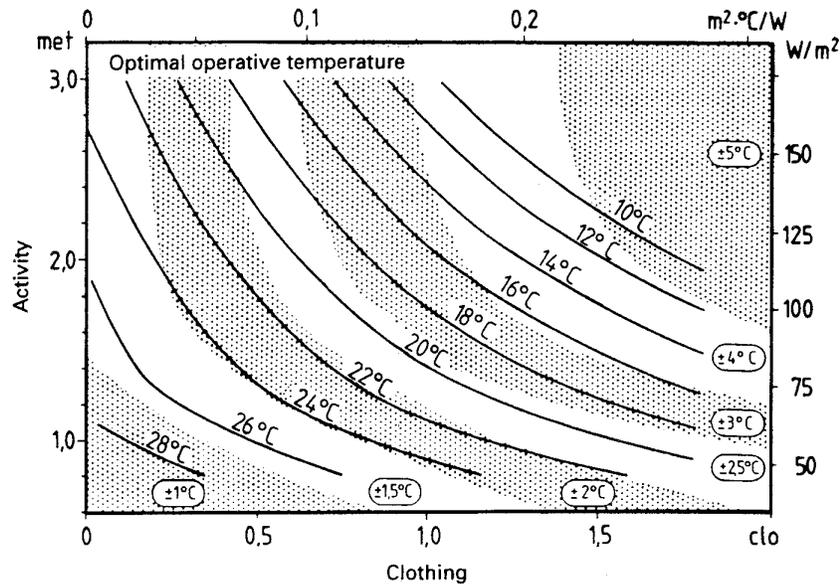


Figura 1.5.2: Temperatura operativa ótima (PMV=0), como função da atividade e vestimenta:

Obs: As áreas achureadas indicam uma faixa de conforto  $\pm \Delta t$  ao redor da temperatura ótima para a qual  $-0,5 < \text{PMV} < +0,5$ . A velocidade relativa do ar causada pelo movimento do corpo é estimada como sendo = 0 para  $M < 1$  met e como sendo  $v_{\text{ar}} = 0,3 \cdot (M-1)$  para  $M > 1$  met. A umidade relativa considerada = 50%.

De particular interesse, na prática, é a atividade leve, principalmente sedentária ( $70 \text{ W/m}^2 = 1,2$  met). Essa atividade é característica de pessoas ocupando ambientes como por exemplo escritório e residências. Para esse caso comum, os limites de conforto para a temperatura operativa estão listados nos sub-itens D.1 e D.2 a seguir.

O item D.1 refere-se a condições de inverno, onde é assumido que o isolamento térmico das roupas é igual a  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ . O item D.2 refere-se a condições de verão, onde é assumido que o isolamento térmico das roupas é igual a  $0,5 \text{ clo} = 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ .

Os índices PMV e PPD, expressam desconforto por calor ou frio para o corpo como um todo. A insatisfação térmica porém pode também ser causada por um resfriamento ou aquecimento não desejado de alguma parte do corpo (desconforto local). A causa mais comum do desconforto local são as correntes de ar, (DR). O limite da taxa de correntes de ar de 15% de insatisfeitos é alcançado quando a velocidade do ar local média seja inferior à especificada na figura 1.5.3. O desconforto local também pode ser causado por uma diferença significativa entre a temperatura no sentido vertical

do corpo, entre a cabeça e o tornozelo, devido à pisos ou forros aquecidos ou resfriados e também devido a uma alta assimetria na temperatura radiante média. Os limites para estes fatores encontram-se listados, para atividades sedentárias, nos sub-itens D.1 e D.2. Se estes limites encontram-se satisfeitos, então menos que 5% dos ocupantes dos ambientes sentem-se desconfortáveis devido ao resfriamento ou aquecimento local, causado por um desses fatores mencionados acima.

É recomendado que a umidade relativa situe-se entre 30% e 70%. Esses limites são estabelecidos para diminuir o risco de sensações desagradáveis de pele úmida ou seca, irritação nos olhos, eletricidade estática, proliferação de microorganismos e deficiências respiratórias.

Se as condições ambientais estiverem de acordo com os limites recomendados nesse anexo, é estimado que mais de 80% das pessoas se encontrarão em condições aceitáveis de conforto térmico.

*D.1 - Atividades leves, principalmente sedentárias, durante as condições de inverno (período de aquecimento):*

As condições devem ser as seguintes:

- (a) A temperatura operativa deve situar-se entre 20 e 24° C (ou seja,  $22 \pm 2$  °C).
- (b) A diferença entre a temperatura no sentido vertical, entre 1,1 m e 0,1 m acima do piso (cabeça e tornozelos) deverá ser inferior a 3 °C.
- (c) A temperatura superficial do piso deve situar-se normalmente entre 19 e 26 °C, mas o sistema de aquecimento pode ser projetado para 29 °C.
- (d) A velocidade média do ar deverá ser menor que o apresentado na figura D.2.
- (e) A assimetria da temperatura radiante devido a janelas ou outras superfícies verticais frias deve ser menor que 10 °C (relativa a um pequeno plano vertical localizado a 0,6 m acima do piso).
- (f) A assimetria da temperatura radiante de um forro aquecido ou resfriado, deve ser menor que 5 °C (relativo a um pequeno plano horizontal localizado a 0,6 m acima do piso).
- (g) A umidade relativa deve estar entre 30 e 70%.

*D.2 - Atividade leve, principalmente sedentária, durante as condições de verão (período de resfriamento):*

As condições são as seguintes:

- (a) A temperatura operativa deve ser entre 23 e 26 °C (ou seja,  $24,5 \pm 1,5$  °C).
- (b) A diferença de temperatura no sentido vertical entre 1,1 e 0,1 m acima do piso (cabeça e tornozelos), deve ser inferior a 3 °C.
- (c) A velocidade do ar média, deve ser menor que a especificada na figura D.2.
- (d) A umidade relativa do ar deve estar entre 30% e 70%.

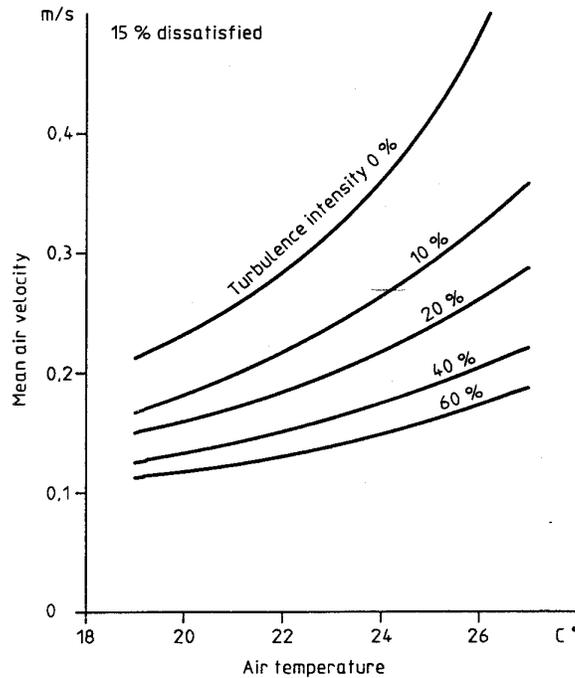


Figura 1.5.3: Velocidades do ar médias permitidas em função da temperatura do ar e da intensidade da turbulência. As curvas estão baseadas no modelo de taxas de corrente de ar para 15% de insatisfeitos devido à essas correntes. A figura se aplica para atividades leves, principalmente sedentárias (70W/m<sup>2</sup> ou 1,2 met).

1.5.7.5 - Anexo E (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 1.5.3: Isolamento térmico para trajés típicos.

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, trousers, socks, shoes	0,75	0,115	Panties, petticoat, stockings, light dress with sleeves, sandals	0,45	0,070
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, jacket, socks, shoes	0,85	0,135	Panties, stockings, shirt with short sleeves, skirt, sandals	0,55	0,085
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Underpants, shirt, light-weight trousers, socks, shoes	0,60	0,095
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short legs and sleeves, shirt, trousers, boiler suit, socks, shoes	1,10	0,170	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear, with long legs and sleeves, thermo jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Underwear, track suit (sweater and trousers), long socks, runners	0,75	0,115
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, thermo jacket, socks, shoes	1,25	0,190	Panties, petticoat, shirt, skirt, thick knee-socks, shoes	0,80	0,120
Underwear with short sleeves and legs, boiler suit, thermo jacket and trousers, socks, shoes	1,40	0,220	Panties, shirt, skirt, roundneck sweater, thick knee-socks, shoes	0,90	0,140
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, thermo jacket and trousers, socks, shoes	1,55	0,225	Underpants, singlet with short sleeves, shirt, trousers, V-neck sweater, socks, shoes	0,95	0,145
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	1,85	0,285	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155

Work clothing	$I_{cl}$		Daily wear clothing	$I_{cl}$	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	2,00	0,310	Panties, stockings, shirt, skirt, vest, jacket	1,00	0,155
Underwear with long sleeves and legs, thermo jacket and trousers, outer thermo jacket and trousers, socks, shoes	2,20	0,340	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
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, singlet with short sleeves, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,10	0,170
			Underwear, singlet with short sleeves, shirt, trousers, vest, jacket, socks, shoes	1,15	0,180
			Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
			Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat socks, shoes	1,50	0,230

Tabela 1.5.4: Isolamento térmico para peças individuais de roupas.

Garment description	Thermal insulation clo
<b>Underwear</b>	
Panties	0,03
Underpants with long legs	0,10
Singlet	0,04
T-shirt	0,09
Shirt with long sleeves	0,12
Panties and bra	0,03
<b>Shirts — Blouses</b>	
Short sleeves	0,15
Light-weight, long sleeves	0,20
Normal, long sleeves	0,25
Flanel shirt, long sleeves	0,30
Light-weight blouse, long sleeves	0,15
<b>Trousers</b>	
Shorts	0,06
Light-weight	0,20
Normal	0,25
Flannel	0,28
<b>Dresses — Skirts</b>	
Light skirts (summer)	0,15
Heavy skirt (winter)	0,25
Light dress, short sleeves	0,20
Winter dress, long sleeves	0,40
Boiler suit	0,55
<b>Sweaters</b>	
Sleeveless vest	0,12
Thin sweater	0,20
Sweater	0,28
Thick sweater	0,35
<b>Jackets</b>	
Light, summer jacket	0,25
Jacket	0,35
Smock	0,30
<b>High-insulative, fibre-pelt</b>	
Boiler suit	0,90
Trousers	0,35
Jacket	0,40
Vest	0,20
<b>Outdoor clothing</b>	
Coat	0,60
Down jacket	0,55
Parka	0,70
Fibre-pelt overalls	0,55
<b>Sundries</b>	
Socks	0,02
Thick, ankle socks	0,05
Thick, long socks	0,10
Nylon stockings	0,03
Shoes (thin soled)	0,02
Shoes (thick soled)	0,04
Boots	0,10
Gloves	0,05

### 1.5.8 - 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 = 101kPa.

Dados:

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

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

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

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

$p_{as} = 2,34 \text{ kPa}$

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

$p_a = 1,17 \text{ kPa}$

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

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

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

Através da 8 anterior, calculando-se iterativamente:

$t_{cl} = 26,22^\circ\text{C}$

*3º Passo: Cálculo do PMV:*

Aplicando-se os valores calculados, acima, na equação 12:

$PMV = -1,00$

*4º Passo: Cálculo do PPD:*

Substituindo o valor do PMV, na equação 13:

$PPD = 26,11\%$

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

Com os dados iniciais do problema, consultando-se a tabela 1.5.2 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%.

## **1.6 - ISO/DIS 7726/96 - 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 ambientes moderados, para análise de conforto térmico, como ambientes extremos, para análises de stress térmico.

### **1.6.1 - Introdução:**

Esta norma internacional, que encontra-se 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 e modo de construção e uso, é necessário checá-los com as especificações contidas nessa norma.

### **1.6.2 - 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 padronizar o processo de registro de informações que levem à obtenção desse 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.

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.

### 1.6.3 - Referências Normativas:

A presente norma contém preceitos e dizeres constantes das seguintes normas:  
*ISO 7243/89* - Ambientes quentes - Estimativa de stress por calor sobre o trabalhador, baseado no índice IBUTG (índice de bulbo úmido e termômetro de globo).  
*ISO 7933/89* - Ambientes quentes - Determinação analítica e interpretação do stress térmico, utilizando o cálculo da taxa requerida de suor.  
*ISO 7730/94* - Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices do PMV e PPD e especificações das condições de conforto térmico.  
*ISO/TR 11079/93* - Ambientes frios - Determinação do isolamento requerido de roupas.

### 1.6.4 - Gerais:

#### 1.6.4.1 - 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 à medições executadas em ambientes moderados, próximos do conforto.

Especificações e métodos do **tipo S**, referem-se à 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 haja 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%.

#### 1.6.4.2 - 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 encontram-se 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 na tabela 1.6.1. 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 serão 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 1.6.1: 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	$p_a$ Umid. 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	

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.

### 1.6.5 - Instrumentos de medição:

#### 1.6.5.1 - 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 freqüentemente 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 representa bem o corpo humano na posição sentada, porém um sensor do tipo elipsóide representa melhor o corpo humano quer seja na posição em pé como 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 dessas 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 a 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 se 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 apresente 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, 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, o que é considerado é 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:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{ai} - v_a)^2} \quad [15]$$

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, e é geralmente expressa em porcentagem.

$$T_u = \frac{SD}{v_a} \cdot 100 \quad [16]$$

*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, item, utilizando um termômetro de contato, onde o sensor está em contato com a superfície, ou um sensor infra-vermelho, onde é medido o fluxo de calor radiante da superfície e convertido em temperatura.

*1.6.5.2 - Características dos instrumentos de medição:*

As faixas e precisões das medições e o tempo de resposta dos sensores para cada tipo de parâmetro físico básico e derivado, encontram-se na tabela 1.6.2, a qual apresenta as faixas de medição, acuracidade (requerida e desejada) e 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-a. O tempo de<sub>33</sub>

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 1.6.3.

### **EXEMPLO DE INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO**



Fig 1: Confortímetro - BABUC

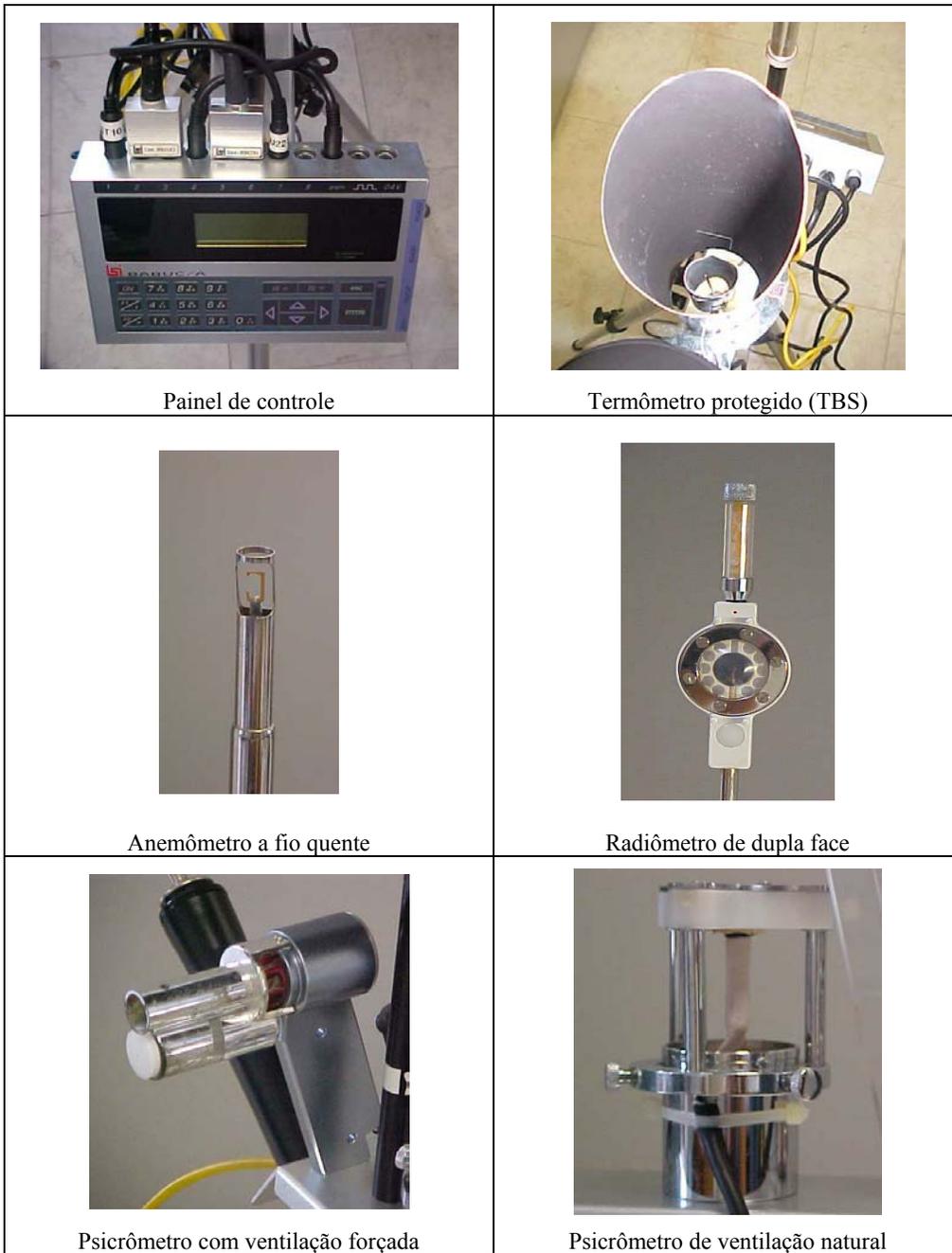


Fig. 2 – Sensores do confortímetro BABUC.

Tabela 1.6.2: Características dos instrumentos de medição:

Quantity	Symbol	Class C (comfort)			Class S (thermal stress)			Comments
		Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	Measuring range	Accuracy	Response time (90%)	
Air temperature	$t_a$	10 to 40°C	Required: $\pm 0,5$ °C Desirable: $\pm 0,2$ °C  These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_a - t_r $ 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: $\pm (0,5 + 0,01  t_a )$ °C > 0 to 50°C: $\pm 0,5$ °C > 50 to 120°C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_a - 50)]$ °C  Desirable: <u>required accuracy</u> / 2  These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_a - t_r $ 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: $\pm 2$ °C Desirable: $\pm 0,2$ °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: $\pm (5 + 0,02  t_r )$ °C > 0 to 50°C: $\pm 5$ °C > 50 to 150°C: $\pm [5 + 0,08 (t_r - 50)]$ °C  Desirable: - 40 to 0°C: $\pm (0,5 + 0,01  t_r )$ °C > 0 to 50°C: $\pm 0,5$ °C > 50 to 150°C: $\pm [0,5 + 0,04 (t_r - 50)]$ °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 $\pm 5$ °C for class C and $\pm 20$ °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: $\pm 0,5$ °C Desirable: $\pm 0,2$ °C  These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_p - t_a  < 10$ °C	The shortest possible. Value to be specified as characteristic of the measuring instrument	0 to 200°C	Required: -60 to 0°C: $\pm (1+0,1  t_p )$ °C 0 to 50°C: $\pm 1$ °C 50 to 200°C: $\pm [1+0,1 (t_p - 50)]$ °C  Desirable: <u>required accuracy</u> / 2  These levels shall be guaranteed at least for a deviation $ t_p - t_a  < 20$ °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_r $ 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_r $ 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: $\pm 1$ °C Desirable: $\pm 0,5$ °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: $\pm 1$ °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 1.6.3: Condições de ambientes padrão 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

### 1.6.6 - 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.

#### 1.6.6.1 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 possam ser consideradas praticamente constantes, isto é, quando os desvios padrões dessas variáveis não excedam aos valores obtidos pela multiplicação entre a acuracidade de medição requerida, dada pela tabela 1.6.2 e o correspondente valor do fator X apresentado na tabela 1.6.4. Esta condição é frequentemente encontrada no caso de temperatura do ar, velocidade e umidade do ar, mas raramente no caso de radiação.

Tabela 1.6.4: 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 1.6.5 mostra 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 1.6.5, 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 na tabela 1.6.5, onde geralmente executam suas 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 1.6.5: 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

#### 1.6.6.2 Especificações relativas às variações das variáveis físicas com o tempo:

Os parâmetros físicos e também os 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, em casos de atividade industrial.
- b) Podem também variar de acordo com a movimentação da pessoa por diferentes ambientes, por exemplo, um ambiente quente próximo à uma máquina e 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 1.6.2 e o fator X apresentado na tabela 1.6.4.

Quando um ambiente não puder ser considerado estacionário, deverão ser feitos registros das principais variações dos parâmetros em função do tempo.

## **1.6.7 - Anexo A: Medição da temperatura do ar:**

### *1.6.7.1 - Introdução:*

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

### *1.6.7.2 - Princípios para medir temperatura:*

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.

### *1.6.7.3 - 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, pois senão o valor medido não será o correto da temperatura do ar, mas sim um valor intermediário entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante.

Esses 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, a leitura não é instantânea.

Uma medição não deve ser concretizada em um período menor que 1,5 vezes menor 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.

### *1.6.7.4 - 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.

## **1.6.8 - Anexo B: Medição da temperatura radiante média:**

### *1.6.8.1 - 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 pode haver várias fontes emissoras de radiação, 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) Apresenta resumidamente outros métodos de obtenção desse parâmetros 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.

### *1.6.8.2 - 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, levando 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 devidas a radiação vindas de diferentes fontes do ambiente e devidas aos efeitos da convecção. A temperatura do globo em situação de balanço térmico, permita que  $T_r$ , seja determinada.

O balanço térmico é dado pela expressão:

$$R_g + C_g = 0 \quad [17]$$

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:

$$R_g = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_g^4) \quad [18]$$

onde:

$\varepsilon_g$  = emissividade do globo negro (adimensional);

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

$T_r$  = temperatura radiante média, em Kelvins;

$T_g$  = temperatura de globo, em Kelvins.

A transferência de calor por convecção,  $C_g$ , é dada pela expressão:

$$C_g = h_{cg} \cdot (T_a - T_g) \quad [19]$$

onde:

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

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 expressões 18 e 19, na equação 17, o balanço térmico pode ser reescrito da seguinte maneira:

$$\varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_g^4) + h_{cg} \cdot (T_a - T_g) = 0 \quad [20]$$

Isolando-se a temperatura média radiante, temos:

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \cdot \sigma} \cdot (T_g - T_a)} \quad [21]$$

Para o caso de convecção natural:

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad [22]$$

No caso do globo padronizado,  $D = 0,15$  m,  $\varepsilon_g = 0,95$  (pintura superficial externa negra, a equação 22 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad [23]$$

No caso de convecção forçada:

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \cdot v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \cdot D^{0,4}} \cdot (t_g - t_a)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad [24]$$

Ou, para o globo padronizado:

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad [25]$$

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:

$t_g = 55 \text{ °C}$ ,  $t_a = 30 \text{ °C}$ ,  $v_a = 0,3 \text{ m/s}$ . 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 25:

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

*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 1.6.5, e a temperatura média radiante final será a média ponderada das 3 leituras, respeitando-se os coeficientes de ponderação apresentados na tabela 1.6.5.

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 de 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 elipsóide representa uma melhor representação nesses casos (tabela 1.6.6).

Tabela 1.6.6: 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 em presença de sol, deve ser mantido com a pintura negra.

### 1.6.8.3 - 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. Pela diferença de calor armazenado pelas duas esferas, a radiação é medida. A temperatura média radiante é calculada pela expressão:

$$T_r^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma \cdot (\epsilon_b - \epsilon_p)} \quad [26]$$

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  $W/m^2$

$\epsilon_p$  = emissividade do sensor polido

$\epsilon_b$  = emissividade do sensor negro

$\sigma$  = 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:

$$T_r^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \cdot \epsilon_s} \quad [27]$$

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  $W/m^2$

$\epsilon_s$  = emissividade do sensor

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

1.6.8.4 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:

$$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N} \quad [28]$$

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 figuras 1.6.1 a 1.6.4 a seguir, no caso de superfícies retangulares. Podem também ser calculados pela equação da tabela 1.6.7, onde AC é a/c e BC é b/c nas figuras de 1.6.1 a 1.6.4.

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

$$T_r = T_1 \cdot F_{p-1} + T_2 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N \cdot F_{p-N} \quad [29]$$

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 29, sempre fornece um valor levemente inferior ao da equação 28, 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 28 e 29, 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 29, será aproximadamente 10 K inferior do que se calculada pela equação 28.

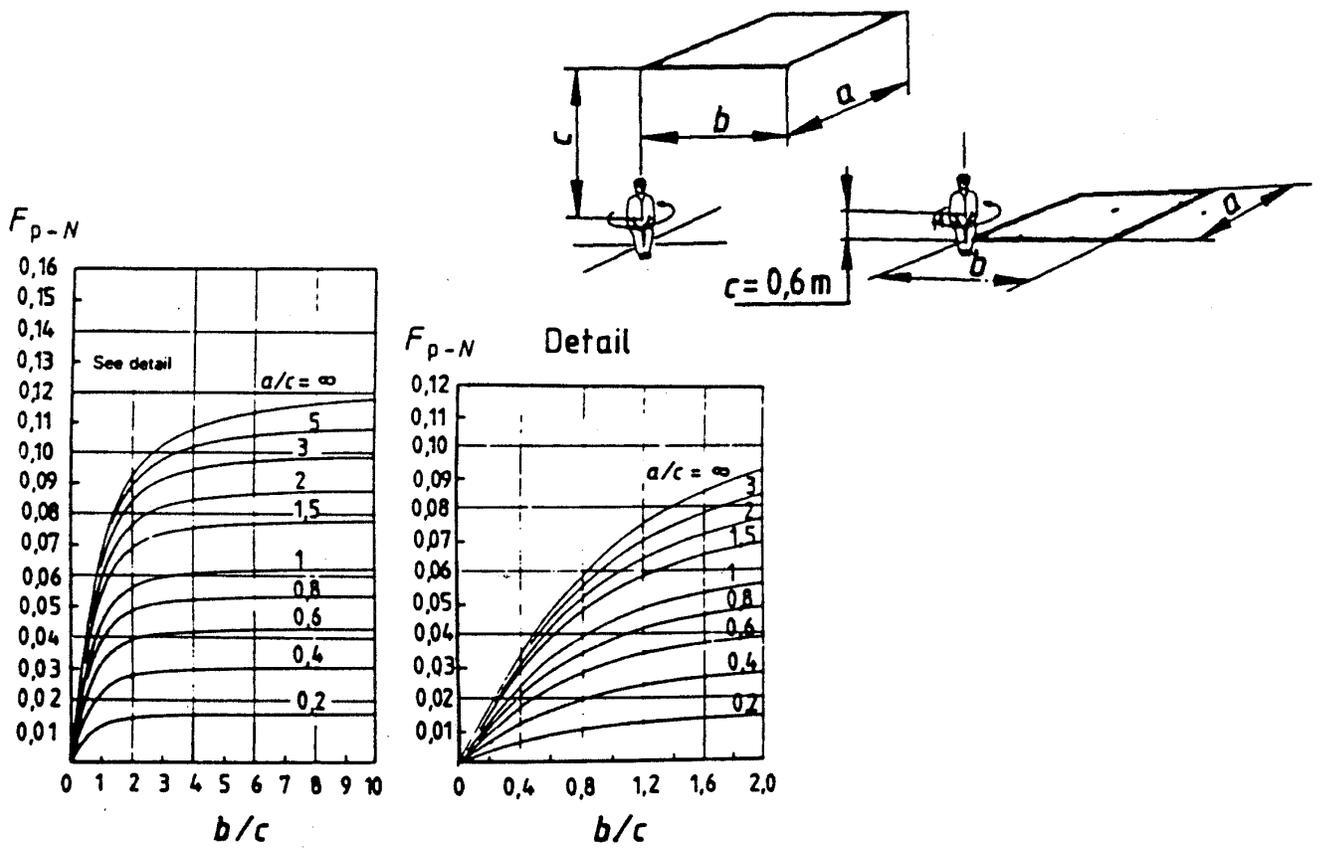


Figura 1.6.1: Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa sentada e um retângulo vertical.

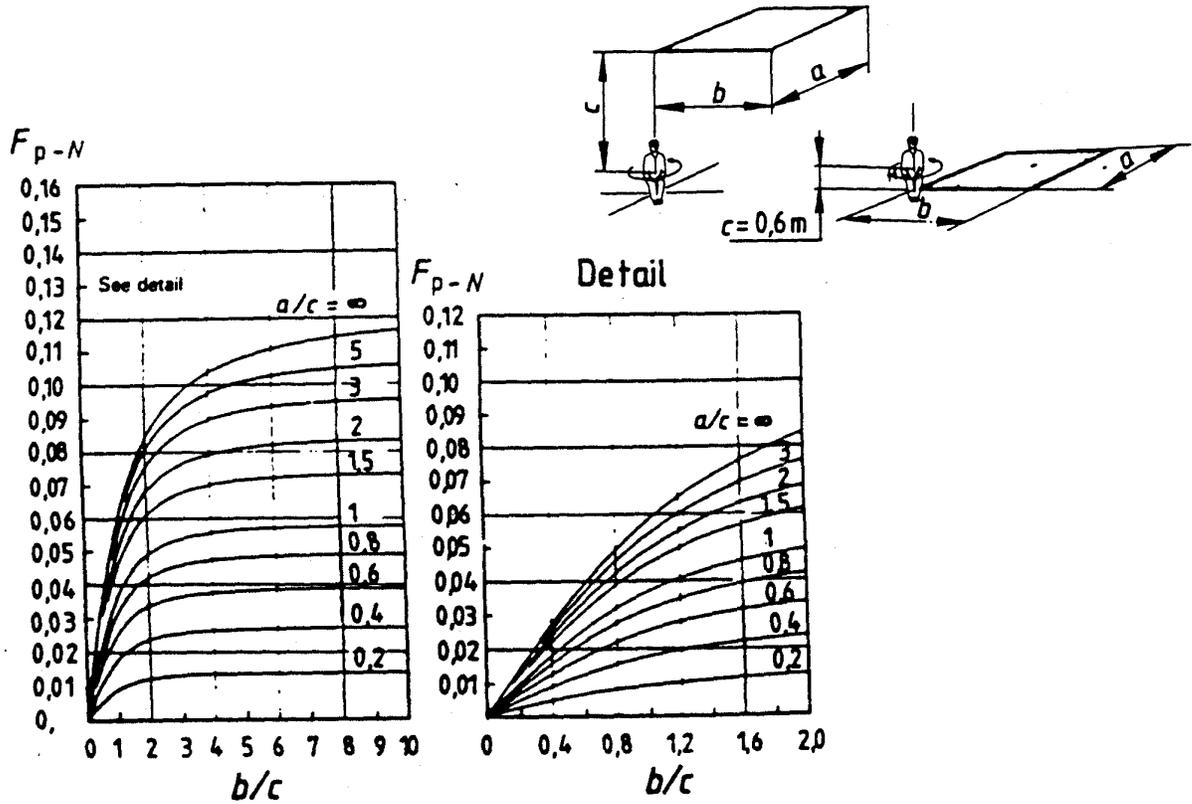


Figura 1.6.2: Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa sentada e um retângulo horizontal.

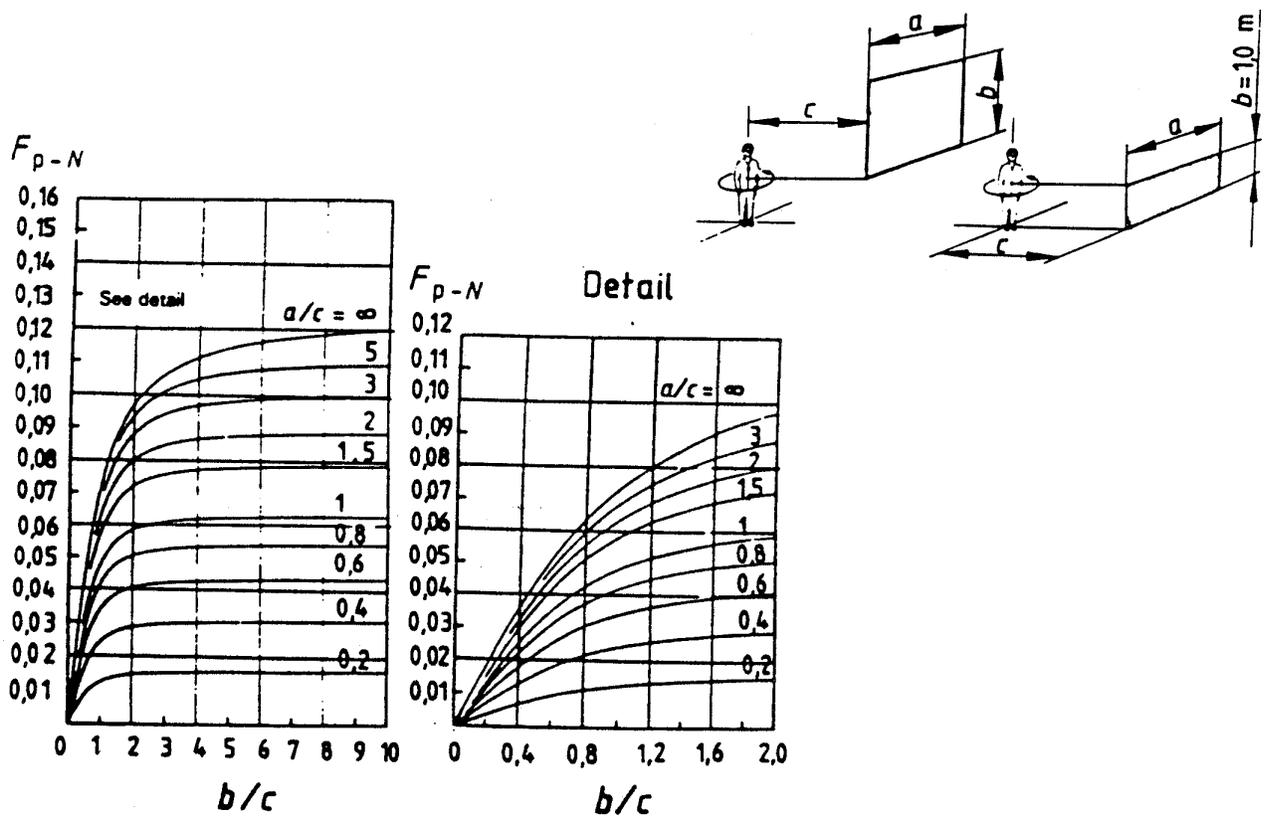


Figura 1.6.3: Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa em pé e um retângulo vertical.

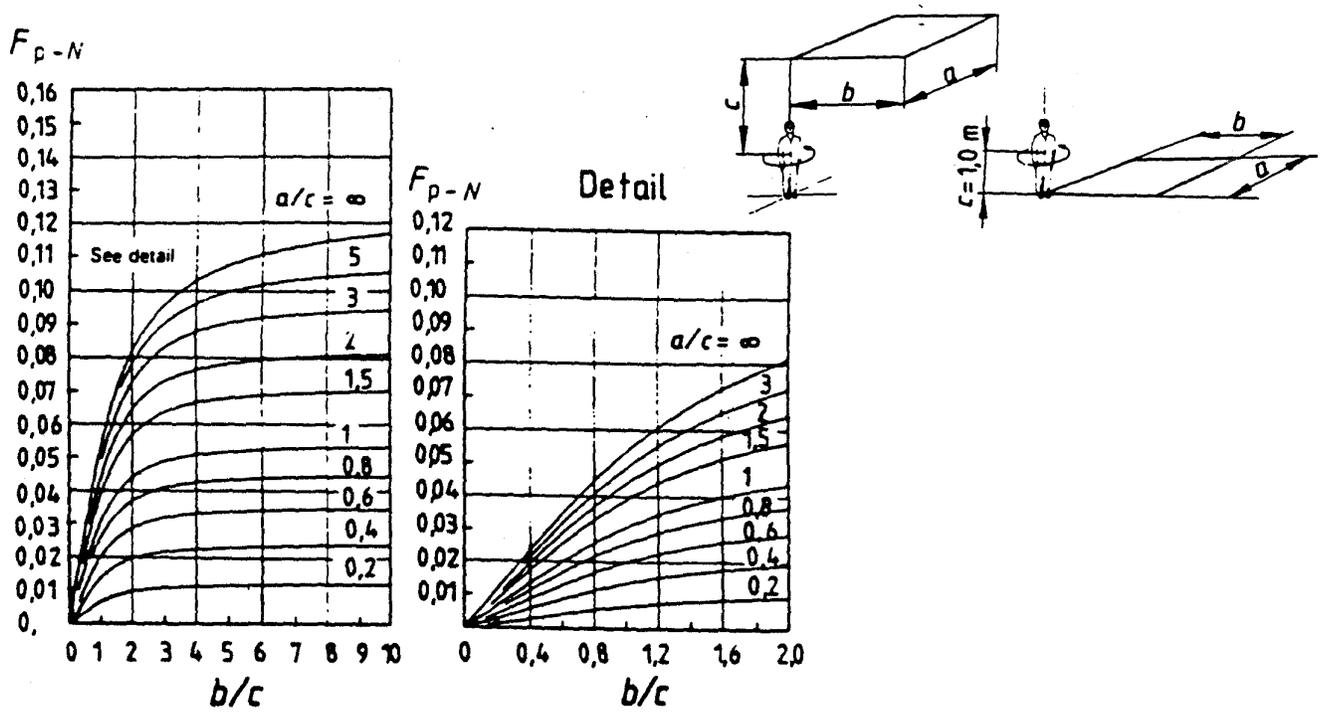


Figura 1.6.4: Valores médios dos fatores de forma entre uma pessoa em pé e um retângulo horizontal.

Tabela 1.6.7: Equações para cálculos dos fatores de forma:

FATORES DE FORMA:		$= F_{\text{máx}} \cdot (1 - e^{-(a/c)/\tau}) \cdot (1 - e^{-(b/c)/\gamma})$				
onde: $\tau = A + B (a/c)$						
$\gamma = C + D \cdot (b/c) + E \cdot (a/c)$						
	$F_{\text{máx}}$	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, ver item 1.6.9 Anexo C, 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 1.6.6, 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:

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

Para pessoas em pé:

$$t_r = \frac{0,08(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,23(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda]) + 0,35(t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras])}{2(0,08 + 0,23 + 0,35)} \quad [31]$$

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:

$$t_r = 0,13(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,185(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda]) + t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras] \quad [32]$$

Para pessoas em pé:

$$t_r = 0,06(t_{pr}[cima] + t_{pr}[baixo]) + 0,22(t_{pr}[direita] + t_{pr}[esquerda]) + t_{pr}[frente] + t_{pr}[tras] \quad [33]$$

*1.6.8.5 - Exemplo de aplicação:*

Em um ambiente interno, cujas medições em planta baixa são de 3,0 x 4,0m e pé direito de 3 m, encontra-se uma pessoa sentada exatamente no centro do ambiente. As temperaturas superficiais do ambiente são: Paredes verticais = 23 °C, Teto = 29 °C e Piso = 21 °C. Determinar a temperatura média radiante sobre a pessoa.

*1º Passo: Determinação dos fatores de forma:*

Pelas figuras 1.6.1 e 1.6.2, os fatores de forma são:

Parede frontal:	$F_p = 0,11$
Parede posterior:	$F_p = 0,11$
Parede lateral 1:	$F_p = 0,17$
Parede lateral 2:	$F_p = 0,17$
Teto:	$F_p = 0,11$
Piso:	$F_p = 0,33$

*2º Passo: Verificação dos fatores de forma:*

Como a pessoa está totalmente rodeada pelas superfícies a somatória de seus fatores de forma sobre a pessoa deve ser igual a unidade.

$$0,11+0,11+0,17+0,17+0,11+0,33 = 1,00$$

*3º Passo: Determinação da temperatura média radiante:*

Pela equação 29:

$$T_r = (296 \times 0,11 + 296 \times 0,11 + 296 \times 0,17 + 296 \times 0,17 + 302 \times 0,11 + 294 \times 0,33) - 273 \quad T_r = 23 \text{ °C}$$

## 1.6.9 - Anexo C: Medição da temperatura radiante plana:

### 1.6.9.1 - 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,  $\Delta t_{pr}$ , é utilizado. Ela é dada pela diferença entre a temperatura radiante plana em 2 direções opostas de um pequeno elemento plano.

### 1.6.9.2 - 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:

$$T_{pr}^4 = T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma \cdot (\epsilon_b - \epsilon_p)} \quad [34]$$

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  $W/m^2$   
 $\epsilon_p$  = emissividade do disco polido  
 $\epsilon_b$  = emissividade do disco negro  
 $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann, em  $W/m^2.K^4$

*b) Disco a temperatura do ar constante:*

Neste método, em pequeno elemento plano é mantido a mesma temperatura que a do ar ao redor, não havendo desta maneira trocas 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:

$$T_{pr}^4 = T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma \cdot \epsilon_s} \quad [35]$$

onde:

$T_{pr}$  = temperatura radiante plana, em Kelvins  
 $T_s$  = temperatura do disco, em Kelvins  
 $P_s$  = Suprimento de calor (ou resfriamento), em  $W/m^2$   
 $\epsilon_s$  = emissividade do disco  
 $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann, em  $W/m^2.K^4$

*1.6.9.3 Método para a medição da temperatura radiante plana e assimetria, utilizando o radiômetro:*

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

Consiste de 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:

$$P = \sigma \cdot (T_{pr1}^4 - T_{pr2}^4) \quad [36]$$

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

A assimetria da temperatura radiante, é dada por:

$$\Delta t_{pr} = T_{pr1} - T_{pr2} \quad [37]$$

onde:

$\Delta t_{pr}$  = 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:

$$P = 4 \cdot \sigma \cdot T_n^3 \cdot (T_{pr1} - T_{pr2}) \quad [38]$$

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:

$$\Delta t_{pr} = \frac{P}{4 \cdot \sigma \cdot T_n^3} \quad [39]$$

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

$$P_1 = \sigma \cdot T_{pr1}^4 - \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_n^4 \quad [40]$$

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

$$T_{pr1} = \sqrt[4]{0,95 \cdot T_n^4 + \frac{P_1}{\sigma}} \quad [41]$$

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

#### 1.6.9.4 - 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, e,

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 a pessoa.

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

A temperatura radiante plana é assim calculada:

$$T_{pr}^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N} \quad [42]$$

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 figuras 1.6.5 e 1.6.6, ou 1.6.7 e 1.6.8, para casos de superfícies retangulares.

Se as diferenças entre as temperaturas superficiais forem pequenas, a temperatura radiante plana pode assim ser simplificada:

$$T_{pr} = T_1 \cdot F_{p-1} + T_2 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N \cdot F_{p-N} \quad [43]$$

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 43, sempre fornece uma temperatura radiante plana levemente inferior à fornecida pela equação 42, porém na maioria dos casos essa diferença é pequena.

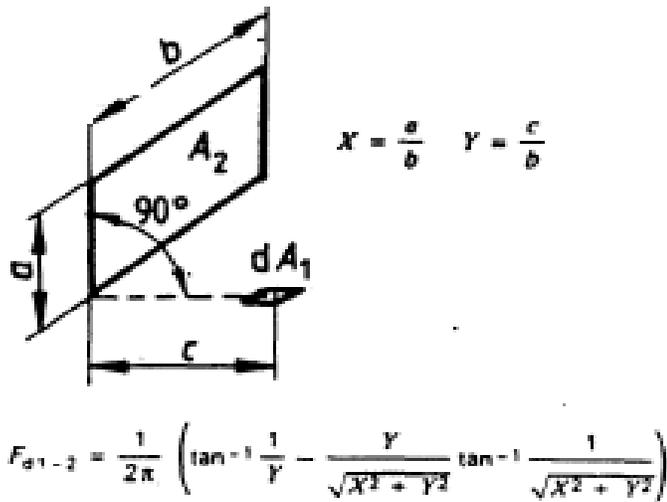
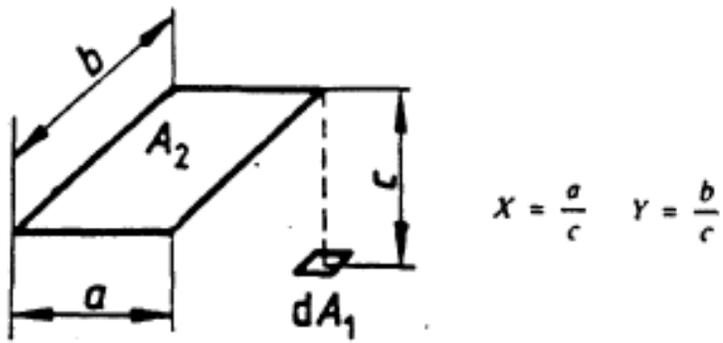


Figura 1.6.5: Fórmula analítica para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano perpendicular a uma superfície retangular



$$F_{dA_1-2} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right)$$

Figura 1.6.6: Fórmula analítica para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano paralelo a uma superfície retangular

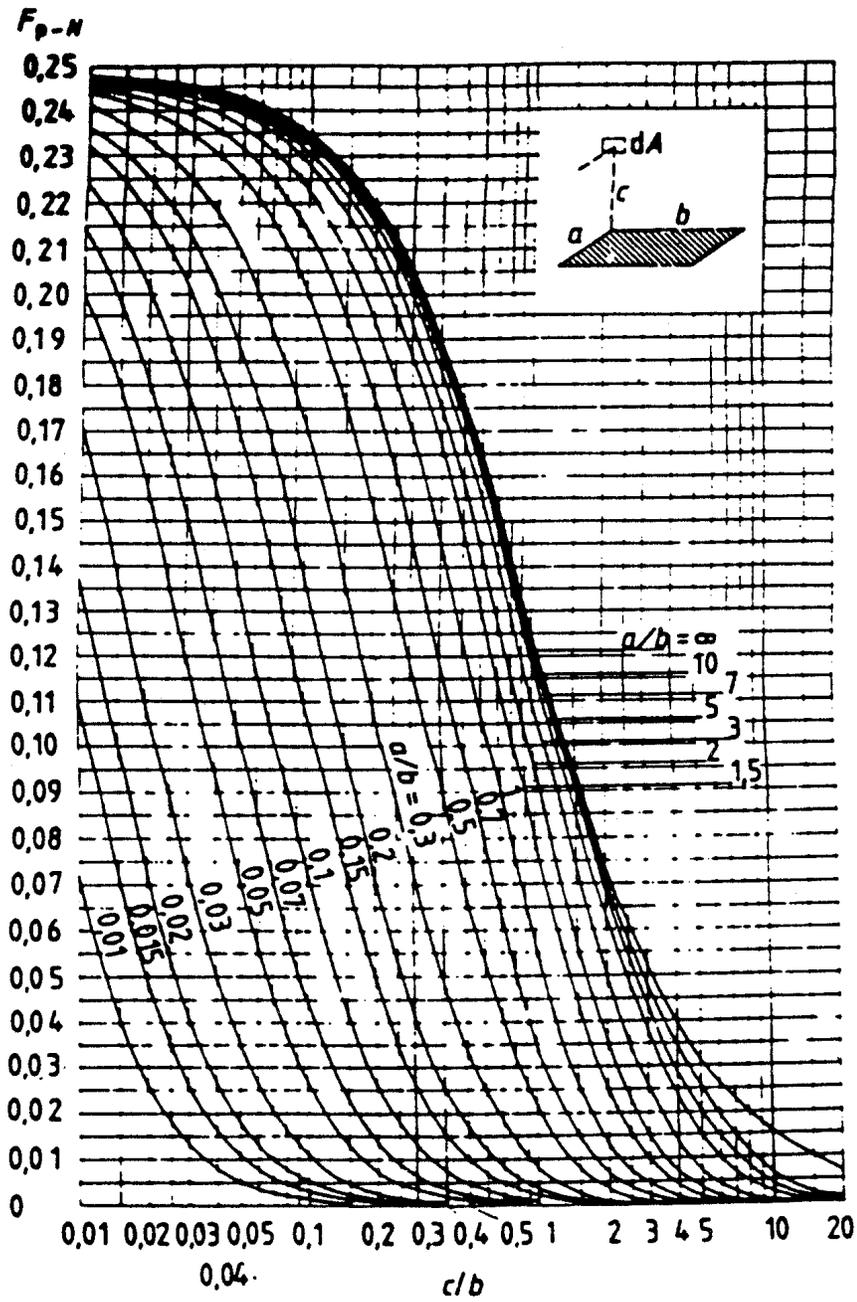


Figura 1.6.7: Ábaco para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano perpendicular a uma superfície retangular

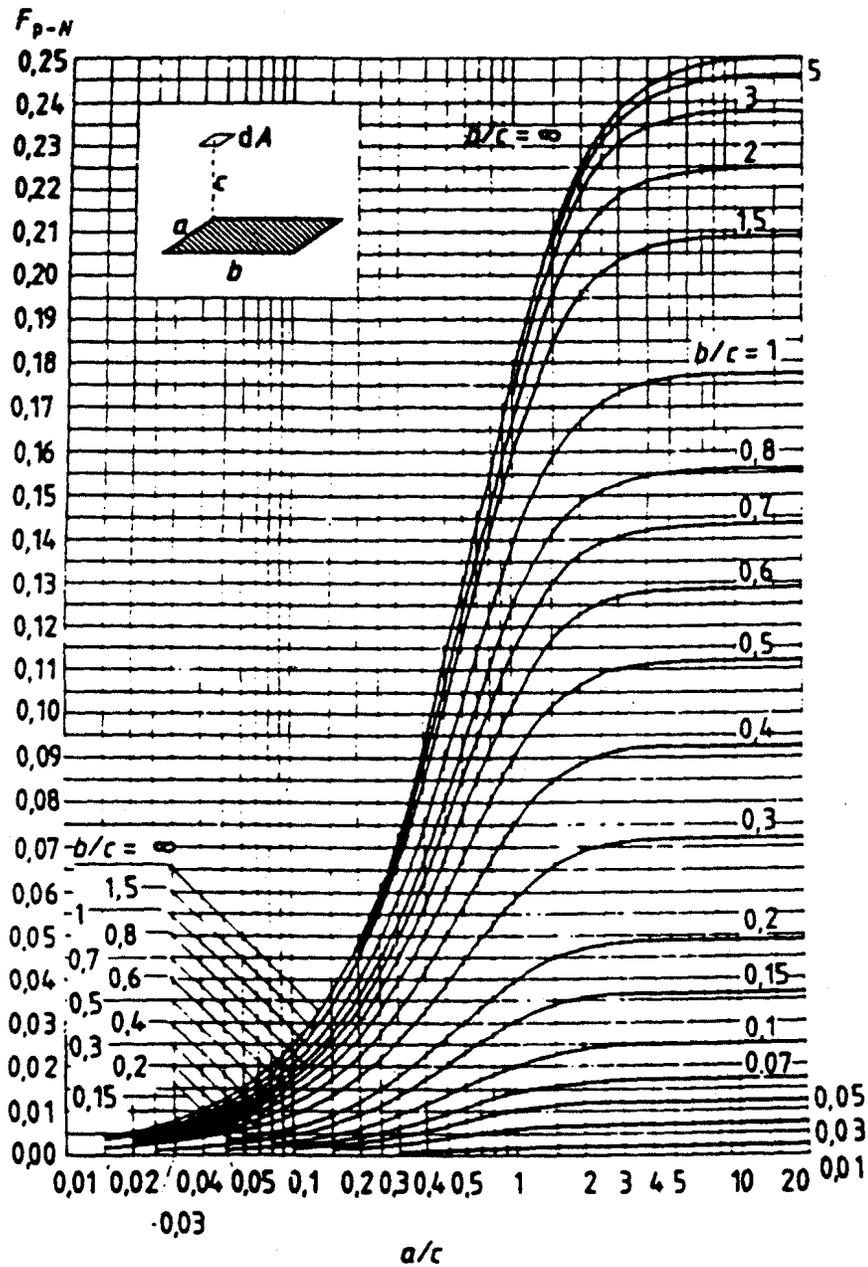


Figura 1.6.8: Ábaco para o cálculo do fator de forma no caso de um pequeno elemento plano paralelo a uma superfície retangular

1.6.9.5 - Exercício proposto:

Determinar a temperatura radiante média, da situação apontada no exemplo do item 1.6.8.4, através da determinação das temperaturas radiante planas com a respectiva utilização dos ábacos das figuras 1.6.7 e 1.6.8 e dos coeficientes da tabela 1.6.7.

1.6.10 - Anexo D: Medição da umidade absoluta e relativa do ar:

### 1.6.10.1 - 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.

### 1.6.10.2 - 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 uma certa temperatura, o ar não pode conter mais do que uma 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:

$$W_a = \frac{M_v}{M_a} \quad [44]$$

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:

$$W_a = 0,6220 \cdot \frac{p_a}{p - p_a} \quad [45]$$

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 tabelado 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.

$$e = \frac{p_a}{p_{as}} \quad [46]$$

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

$$UR = 100.e \quad [47]$$

Para se analisar as trocas de calor por evaporação entre o homem e o ambiente, é a umidade absoluta 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 (ver figura 1.6.9). 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, conforme a apresentada na figura 1.6.9 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.

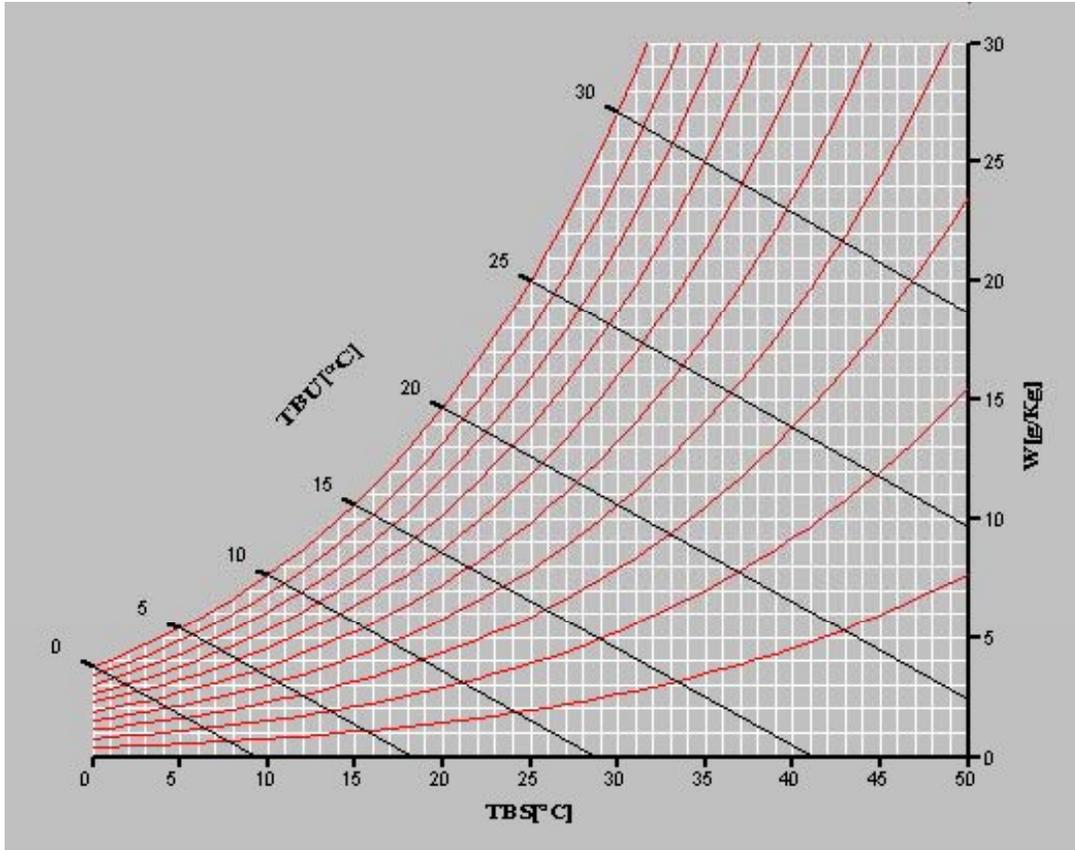


Figura 1.6.9: Carta psicrométrica.

Tabela 1.6.8: 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	$- p_{as,w} - 6,67 * 10^{-4} * (t_a - t_w)$	* (3)	kPa
	$= 0,01 * Pas * RH$	(4)	kPa
	$= \frac{p}{\frac{0,6220}{W_a} + 1}$	(5)	kPa
t <sub>d</sub>	$= 38 * \log \frac{1000 * W_a}{4,8}$	* (6)	°C
	$= 234,3 \frac{\ln \frac{Pa}{0,611}}{17,27 - \ln \frac{Pa}{0,611}}$	* (7)	°C
W <sub>a</sub>	$= 4,8 * 10^{-3} * 10^{\frac{t_d}{38}}$	* (8)	kg/kg
	$= 0,6220 \frac{Pa}{P - pa}$	(9)	kg/kg
RH	$= 100 * \frac{Pa}{Pas}$	(10)	%
* Approximated equations      p = Atmospheric pressure			

c.1) Exemplo de aplicação:

Em uma localidade com a pressão atmosférica,  $p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$ , foram executadas medições, com:  $t_a = 40 \text{ °C}$ ,  $p_a = 3,6 \text{ kPa} = 27 \text{ Torr}$ . Determinar a razão de umidade do ar, bem como a umidade relativa:

Pela equação 45:  $W_a = 0,6220 \cdot p_a / (p - p_a)$   
Pela tabela 1.6.8:  $p_{as} = 0,611 \cdot e^{17,27 \cdot t_a / (t_a + 237,3)}$   
Pela equação 46:  $e = p_a / p_{as}$   
Pela equação 47:  $UR = 100 \cdot e$   
Pelo cruzamento das linhas da carta da figura 1.6.9:

$W_a = 0,0232 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar}}$   
 $p_{as} = 7,38 \text{ kPa} = 55,5 \text{ Torr}$   
 $e = 0,49$   
 $UR = 49\%$   
 $UR = 49\%$

### 1.6.10.3: Medição da umidade relativa utilizando-se o psicrômetro:

#### a) Princípios de medição:

Um psicrômetro consiste de dois termômetros e um dispositivo para garantir uma mínima velocidade de ar (ver figura 1.6.10). 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.

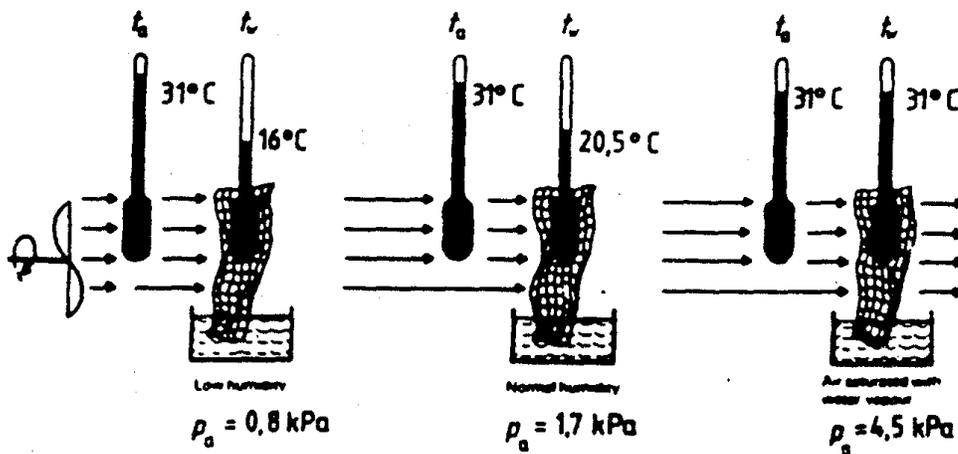


Figura 1.6.10: Princípio de operação de um psicrômetro.

#### 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:

$$p_a = p_{asw} - A \cdot p(t_a - t_{bu}) \quad [48]$$

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 °C<sup>-1</sup>  
 t<sub>a</sub> = temperatura do ar (bulbo seco), em °C  
 t<sub>bu</sub> = temperatura do bulbo úmido, em °C

A expressão pode também ser escrita:

$$p_a = -A \cdot p \cdot t_a + A \cdot p \cdot t_{bu} + p_{asw} \quad [49]$$

ou

$$p_a = -A \cdot p \cdot t_a + f(t_{bu}) \quad [50]$$

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<sub>bu</sub>), com as linhas verticais da temperatura do ar (t<sub>a</sub>), fornece um ponto representativo da umidade do ar considerado. A razão de umidade (W<sub>a</sub>) e a pressão parcial do vapor de água (p<sub>a</sub>) 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 anti-radiante.

A mecha ou pavio em torno do termômetro de bulbo úmido deve se prolongar além da parte sensível do sensor, a fim de se evitar erros devido à condução térmica no termômetro.

Tabela 1.6.9: 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]

*1.6.10.4 - 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 cloridro (medição de umidade relativa)  
Higrômetro de adsorção (tipo fio de cabelo)  
Psicrômetro

### **1.6.11 - Anexo E: Medição da velocidade do ar:**

#### *1.6.11.1 - 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 tem 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 um certo período de integração.

#### *1.6.11.2 - 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 freqüência das flutuações das velocidades necessitam períodos de medição maiores que fluxos com baixa intensidade de turbulência e alta frqüência das flutuações das velocidades.

#### *1.6.11.3 - 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:

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad [51]$$

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 descoberto através de teste 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).

#### 1.6.11.4 - 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:

$$p = h_c \cdot (t_c - t_a) \quad [52]$$

onde:

$p$  = potência de aquecimento recebida pelo elemento

$h_c$  = coeficiente de troca de calor por convecção entre o elemento e o ar, em função da velocidade do ar.

$t_c$  = é a temperatura do elemento

$t_a$  = é a temperatura do ar.

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 possuir a sensibilidade com relação à direção do fluxo de ar reduzida, enquanto o anemômetro de fio quente possui uma grande sensibilidade com relação à direção do fluxo.

1.6.11.5 -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 (ver figura 1.6.11). O anemômetro de fio quente tem uma alta sensibilidade à direção do fluxo de ar (ver figura 1.6.12).

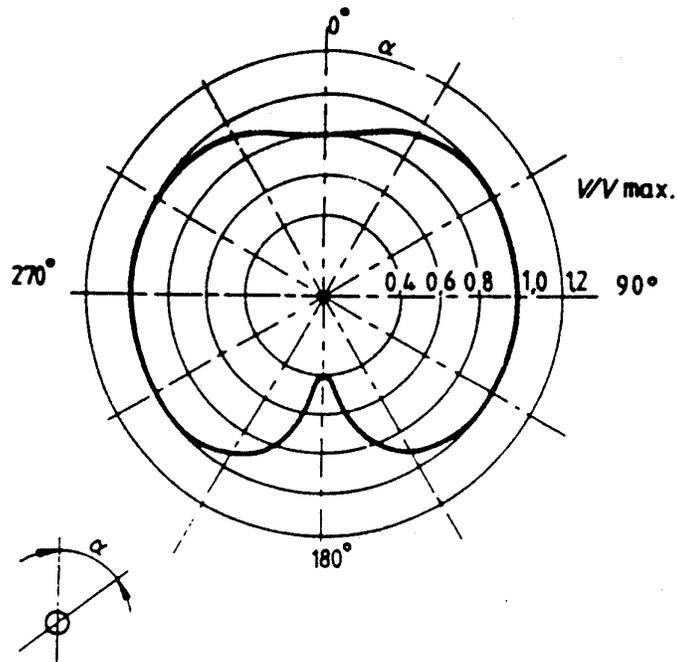


Figura 1.6.11: Efeito da direção do fluxo do ar em um anemômetro de bulbo quente

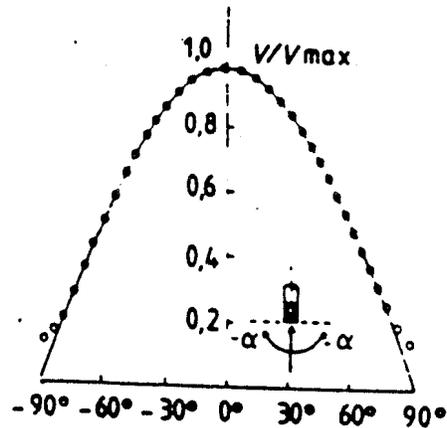


Figura 1.6.12: Efeito da direção do fluxo de ar em um anemômetro de fio quente.

## **1.6.12 - Anexo F: Medição da temperatura superficial:**

### *1.6.12.1 - 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.

### *1.6.12.2 - Termômetros de contato:*

Consiste de 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.

### *1.6.12.3 - Radiômetros infra-vermelhos:*

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 diminuem com o decréscimo da temperatura do objeto.

## **1.6.12 – Tipos de equipamentos e sensores para medições ambientais:**



Figura 1.6.13: Psicrômetro giratório – Temperatura de bulbo seco (ar) e Temperatura de bulbo úmido com ventilação



Figura 1.6.14: Termômetro de globo negro



Figura 1.6.15: Termoanemômetro (temperatura do ar e velocidade do ar)



Figura 1.6.16: Equipamento para medição de conforto e estresse BABUC – Itália

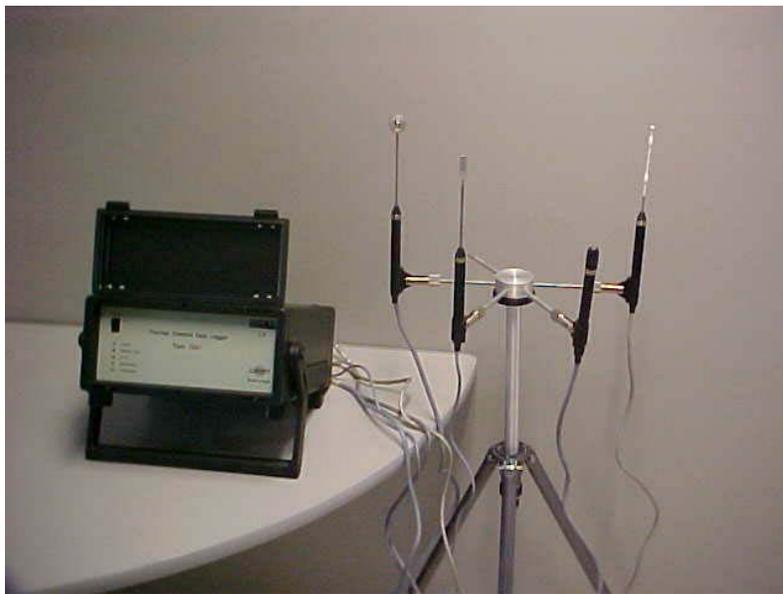


Figura 1.6.17: Equipamento para medição de conforto e estresse B&K – Dinamarca



Figura 1.6.18: Equipamento para medição de IBUTG – B&K



Figura 1.6.19: Psicrômetro com ventilação forçada, BABUC



Figura 1.6.20: Radiômetro de dupla face – BABUC

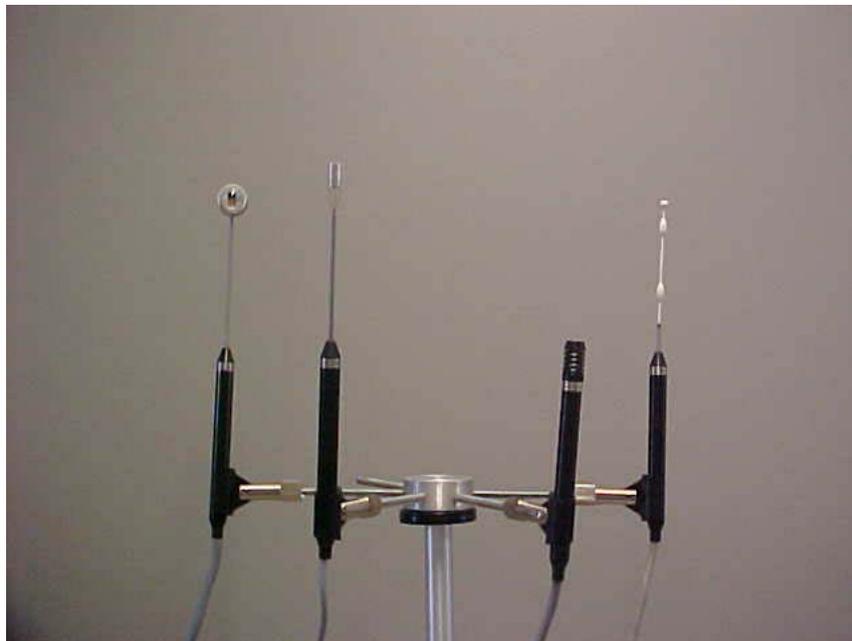


Figura 1.6.21: Sensores para medição de conforto - B&K

## 2 - ESTRESSE (STRESS) TÉRMICO.

### 2.1 - INTRODUÇÃO:

O “stress” é uma expressão derivada da língua inglesa, que tem por definição: “*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, quais sejam: Ambientes Quentes, stress por calor, e ambientes frios, stress por frio.

### 2.2 - AMBIENTES QUENTES:

Esses ambientes são caracterizados por condições ambientais que levem a ocorrência de stress por calor. Vários estudos e pesquisas tem 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 levem 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 encontram-se 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, os quais causem danos à saúde do trabalhador, foram objeto de estudos e pesquisas com o intuito de se padronizar a obtenção dos índices de stress térmico bem como os procedimentos necessários a se adotar quando da 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. Se aplica 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 tempos 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.

*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.

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

Esta norma internacional, descreve 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 em frios.

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

Este relatório técnico internacional (não é uma norma), 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.

Devido aos objetivos dos estudos aqui tratados, não será entrado em maiores detalhes na avaliação de tensão térmica através de medições fisiológicas, sendo que os preceitos das demais normas citadas serão melhor detalhadas 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 de:

- 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, podem ser estimadas através de medições de parâmetros ambientais derivados, os quais são 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:

$$\text{IBUTG} = 0,7.t_{\text{bun}} + 0,3.t_g \quad [53]$$

2) Ambientes externos com radiação solar direta:

$$\text{IBUTG} = 0,7.t_{\text{bun}} + 0,2.t_g + 0,1.t_a \quad [54]$$

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 sendo 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 que, sob determinadas condições especificadas e tabeladas, qualquer pessoa possa ficar exposta, sem qualquer prejuízo à sua saúde, excetuando-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 psicossensoriais, os quais 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 ( $t_{\text{bun}}$ e $t_g$ ):

A temperatura de bulbo úmido com ventilação natural ( $t_{\text{bun}}$ ), é a temperatura fornecida por um sensor de temperatura coberto por um pavio molhado, o qual é ventilado naturalmente. É portanto, diferente da temperatura termo-dinâmica ou de bulbo úmido ( $t_{\text{bu}}$ ), 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 mm  $\pm$  1 mm;
- 3) Comprimento do sensor: 30 mm  $\pm$  5 mm;
- 4) Faixa de medição: 5° C a 40° C;
- 5) Precisão de medição:  $\pm$  0,5° 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 2.5.1 abaixo, 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 1.6 anterior, propícios a ocorrência de stress térmico, (conforme definido nos tópicos de conforto 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, abdome 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:

$$IBUTG = \frac{IBUTG_{cabeca} + (2 \cdot IBUTG_{abdomem}) + IBUTG_{tornozelo}}{4} \quad [55]$$

Em casos de pequena heterogeneidade,  $\leq 5\%$ , pode ser feita apenas 1 medição, ao nível do abdome da pessoa, levando-se em consideração se ela se encontra sentada ou em pé. Em ambientes onde a heterogeneidade seja superior a 5%, porém necessite-se uma rápida determinação, pode ser executada apenas 1 medição, ao 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 2.5.1: 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 media		Exemplos
	Relativos à unidade de área da pele (W/m <sup>2</sup> )	Relativo à uma área da pele de 1,8m <sup>2</sup> (W)	W/m <sup>2</sup>	W	
<b>0</b> Descanso	M≤65	M≤117	65	117	<b>Descanso ou repouso</b>
<b>1</b> Baixa taxa metabólica	65<M≤130	117<M≤234	100	180	<b>Sentado:</b> leve atividade manual, trabalho com mãos e braços, trabalho com braços e pernas. <b>De pé:</b> Em bancadas leve, caminhando levemente 3,5km/h
<b>2</b> Moderada taxa metabólica	130<M≤200	234<M≤360	165	297	<b>De pé,</b> moderado trabalho de mão e braços, braços e pernas, caminhar de 3,5 a 5,5 km/h
<b>3</b> 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
<b>4</b> 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:

$$\bar{p} = \frac{p_1 \cdot t_1 + p_2 \cdot t_2 + \dots + p_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad [56]$$

onde:

$p_1, p_2, p_n$  = parâmetro que se esteja medindo, podendo ser:  $t_{\text{bun}}$ ,  $t_g$ , 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, seu valor médio é retirado diretamente da tabela 2.5.1. 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 (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 2.5.2.

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 2.5.2, 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 requerem uma diminuição dos valores de referência, enquanto a utilização de vestimentas reflexivas, de baixa emissividade, podem permitir um aumento destes. É recomendado, em 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 2.5.2: 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 <sup>2</sup> )	Taxa total (W)	Pessoas aclimatadas ao calor (°C)		Pessoas não aclimatadas ao calor (°C)	
<b>0</b>	M≤65	M≤117	33		32	
<b>1</b>	65<M≤130	117<M≤234	30		29	
<b>2</b>	130<M≤200	234<M≤360	28		26	
<b>3</b>	200<M≤260	360<M≤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
<b>4</b>	M>260	M>468	23	25	18	20

A figura 2.5.1 abaixo, 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 encontra-se 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.

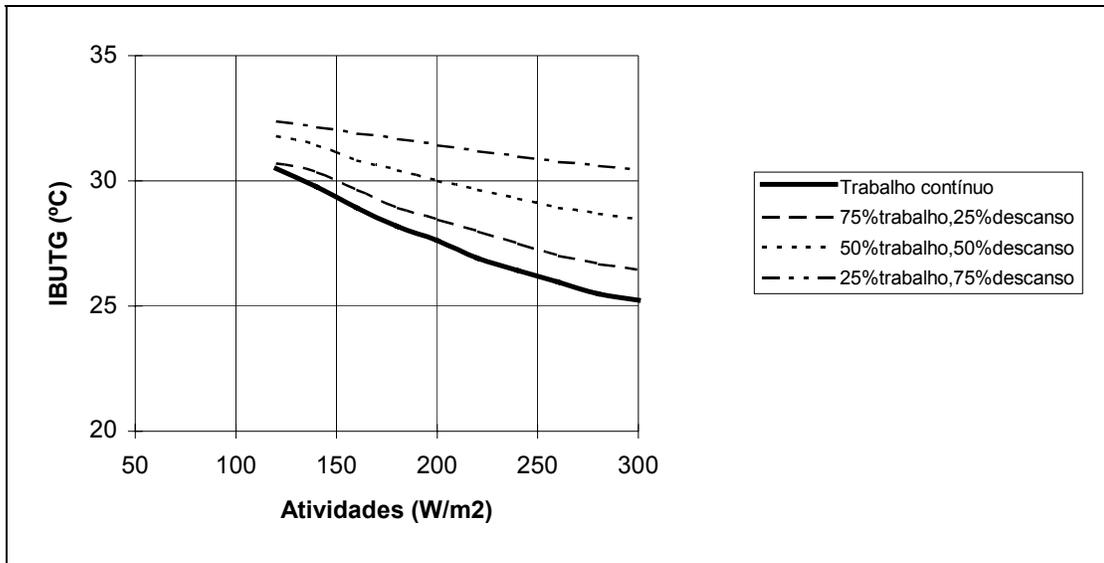


Figura 2.5.1: Curvas de valores de referência de IBUTG, para vários ciclos de trabalho/descanso. (Figura B.1 da ISO 7243/89)

### 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:

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

*1º Passo: Atividade metabólica:*

$M = 2,4$  met, mas como 1 met =  $58,20$  W/m<sup>2</sup>

$M = 140$  W/m<sup>2</sup>

De acordo com a tabela 1 anterior, essa atividade é classificada como de moderada atividade metabólica, classe 2.

*2º Passo: Cálculo do IBUTG.*

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

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

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

De acordo com a tabela 2.5.2 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 2.5.1 anterior, o IBUTG máximo para trabalho contínuo, com uma atividade metabólica de 140W/m<sup>2</sup> 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:

$$\text{IBUTG} = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,3 t_{\text{g}} \quad [57]$$

Ambientes externos com carga solar:

$$\text{IBUTG} = 0,7 t_{\text{bun}} + 0,2 t_{\text{g}} + 0,1 t_{\text{a}} \quad [58]$$

onde:

$t_{\text{bun}}$  = temperatura de bulbo úmido natural

$t_{\text{g}}$  = temperatura de globo

$t_{\text{a}}$  = 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 a tabela 2.6.1 abaixo:

Tabela 2.6.1: 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 descanso	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos de trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos de trabalho 45 minutos 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 2.6.2 abaixo.

Tabela 2.6.2: Taxas de metabolismo por tipo de atividade. (Quadro 3 da NR-15)

Tipo de atividade	M (kcal/h)	M (W)
<b>SENTADO, EM REPOUSO.</b>	100	117
<b>Trabalho leve:</b>		
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
<b>Trabalho moderado:</b>		
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
<b>Trabalho pesado:</b>		
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 2.6.3 abaixo:

Tabela 2.6.3: 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:

$$M = \frac{M_t \cdot T_t + M_d \cdot T_d}{60} \quad [59]$$

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:

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

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 2.6.2.
- 4) Os períodos de descanso serão considerados como tempo de serviço para todos os efeitos legais.

### 7.6.3 - Exemplo de aplicação:

Analisar a situação de stress térmico, pela NR -15, da mesma condição de trabalho do item 7.5.8:

*1º Passo: Atividade Metabólica:*

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

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

*2º Passo: Cálculo do IBUTG:*

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

$$IBUTG = 39,16 \text{ °C}$$

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

De acordo com a tabela 2.6.1 anterior, o IBUTG de referência máximo é de 31,1 °C, para um regime de trabalho de 45 min com 15 min 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 kcal/h; t<sub>g</sub> = 24°C; t<sub>bun</sub> = 19°C; e trabalho intermitente com 30 min de trabalho e 30 min de descanso por hora:

$$\text{Atividade metabólica ponderada: } M_m = (215 \times 30 + 100 \times 30) / 60$$

$$M_m = 157,50 \text{ kcal/h}$$

Pela tabela 2.6.3 anterior, o máximo IBUTG para essa atividade metabólica ponderada é de 30,5°C.

$$\text{IBUTG do local de descanso é: } IBUTG_d = 19 \times 0,7 + 24 \times 0,3$$

$$IBUTG_d = 20,50 \text{ °C}$$

$$\text{IBUTG ponderado é: } IBUTG_m = (39,16 \times 30 + 20,5 \times 30) / 60$$

$$IBUTG_m = 29,83 \text{ °C}$$

*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<sub>g</sub> = 24 °C e t<sub>bun</sub> = 19 °C.

## 2.7 - ISO 7933/1989 - Ambientes Quentes - Determinação e interpretação

## **analíticas do stress térmico, utilizando o cálculo da taxa requerida de suor :**

Esta norma internacional especifica um método de avaliação e interpretação analítica do stress térmico a que está sujeita uma pessoa, em um ambiente quente.

O método propõe a determinação do balanço de calor entre o homem e o ambiente, bem como o cálculo da taxa de suor que o corpo humano deveria produzir para manter este equilíbrio, sendo essa taxa denominada “taxa de suor requerida”. Como os termos utilizados para a determinação do balanço térmico mostram a influência dos diversos parâmetros ambientais físicos, na situação de stress vivida por uma pessoa, é possível determinar que parâmetro ou grupos de parâmetros poderiam ser modificados, a fim de reduzir os riscos do stress.

Os principais objetivos dessa norma, são:

- a) A avaliação do stress térmico em condições muito próximas a levar a um aumento excessivo da temperatura corporal ou a uma perda de água excessiva por parte de uma pessoa;
- b) A determinação das modificações a serem feitas na situação de trabalho, a fim de se reduzir ou excluir os riscos citados anteriormente;
- c) A determinação do tempo máximo de exposição requerido como limite aceitável para evitar-se o surgimento de disfunções fisiológicas.

Esta norma internacional leva em consideração os preceitos da norma “ISO 7243/89”, que trata do stress por calor baseado no índice IBUTG, e também os da norma “ISO 7726/85”, referentes aos instrumentos e métodos de medição de parâmetros físicos.

### **2.7.1 - Princípios do método de avaliação:**

O balanço térmico entre o homem e o ambiente, é determinado através de:

- a) Parâmetros ambientais típicos, medidos e determinados em conformidade com a ISO 7726:

Temperatura do ar,  $t_a$ , (°C);  
Temperatura média radiante,  $t_{rm}$ , (°C);  
Pressão parcial do vapor de água,  $p_a$ , (kPa);  
Velocidade do ar,  $v_a$ , (m/s).

- b) Características pessoais dos indivíduos expostos ao ambiente:

Calor metabólico produzido pelo organismo,  $M$ , ( $W/m^2$ );  
Isolamento térmico das roupas,  $I_{cl}$ , ( $m^2.K/W$ )

### **2.7.2 - Principais etapas de cálculo:**

A equação do balanço térmico, pode assim ser escrita:

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad [60]$$

onde:

$M$  = taxa de produção de calor metabólico, em função da atividade, ( $W/m^2$ );  
 $W$  = trabalho mecânico ou eficiência mecânica, podendo ser considerado nulo na maioria das situações industriais, ( $W/m^2$ );  
 $C_{res}$  = Perda de calor por convecção, pela respiração, ( $W/m^2$ );  
 $E_{res}$  = Perda de calor por evaporação da respiração, ( $W/m^2$ );  
 $K$  = Perda de calor por condução, da pele para a superfície externa das roupas, ( $W/m^2$ );  
 $C$  = Perda de calor por convecção na superfície da pele, ( $W/m^2$ );  
 $R$  = Perda de calor por radiação da superfície da pele, ( $W/m^2$ );  
 $E$  = Perda de calor por evaporação na superfície da pele, ( $W/m^2$ );  
 $S$  = Calor armazenado no organismo, ( $W/m^2$ ).

#### 2.7.2.1 - Taxa de produção de calor metabólico, $M$ , ( $W/m^2$ ).

Sua determinação ou estimativa, pode ser feita utilizando-se as tabelas da ISO 7730/94 e da ASHRAE Fundamentals, cap. 8, ou para determinações mais precisas e apuradas, através da ISO 8996/90.

#### 2.7.2.2 - Perda de calor por convecção, pela respiração, $C_{res}$ , ( $W/m^2$ ).

Esta troca de calor, é dada por:

$$C_{res} = \frac{c_p \cdot v_{res} \cdot (t_{ex} - t_a)}{A_{Du}} \quad [61]$$

onde:

$c_p$  = calor específico do ar seco, a pressão constante, ( $J/kg_{ar\ seco}$ );  
 $v_{res}$  = taxa de ventilação da respiração, ( $kg_{ar}/s$ );  
 $t_{ex}$  = temperatura do ar expirado, ( $^{\circ}C$ );  
 $t_a$  = temperatura do ar ambiente, ( $^{\circ}C$ );  
 $A_{du}$  = área da superfície corporal de DuBois, ( $m^2$ ).

#### 2.7.2.3 - Perda de calor por evaporação da respiração, $E_{res}$ , ( $W/m^2$ ).

É dada por:

$$E_{res} = \frac{c_e \cdot v_{res} \cdot (w_{ex} - w_a)}{A_{Du}} \quad [62]$$

onde:

$c_e$  = calor latente da evaporação da água, ( $J/kg$ );  
 $w_{ex}$  = razão de umidade do ar expirado, ( $kg_{\acute{a}gua}/kg_{ar\ seco}$ );  
 $w_a$  = razão de umidade do ar inalado, ( $kg_{\acute{a}gua}/kg_{ar\ seco}$ ).

#### 2.7.2.4 - Perda de calor por condução, através da superfície da pele, $K$ , ( $W/m^2$ ).

Na prática, este fluxo de calor pode ser quantitativamente assimilado pelas perdas de calor por convecção e radiação que ocorrem quando a pele não está em contato com superfícies sólidas. Assim sendo, esta perda de calor não é levada em conta diretamente.

2.7.2.5 - Perda de calor por convecção, na superfície da pele,  $C$ , ( $W/m^2$ ).

É dada por:

$$C = h_c \cdot F_{cl} \cdot (t_{sk} - t_a) \quad [63]$$

onde:

$h_c$  = coeficiente de transferência de calor por convecção, ( $W/m^2.K$ );

$F_{cl}$  = fator de redução para trocas de calor sensível, devido ao uso de roupas, (adimens);

$t_{sk}$  = temperatura média da pele, ( $^{\circ}C$ )

2.7.2.6 - Perda de calor por radiação da superfície da pele,  $R$ , ( $W/m^2$ ).

É dada por:

$$R = h_r \cdot F_{cl} \cdot (t_{sk} - t_{rm}) \quad [64]$$

onde:

$h_r$  = coeficiente de transferência de calor por radiação, ( $W/m^2.K$ );

$t_{rm}$  = temperatura radiante média, ( $^{\circ}C$ ).

2.7.2.7 - Perda de calor por evaporação da superfície da pele,  $E$ , ( $W/m^2$ ).

a) No caso da pele estar totalmente molhada,  $E_{m\acute{a}x}$ , ( $W/m^2$ ):

$$E_{max} = \frac{(p_{sk,s} - p_a)}{R_T} \quad [65]$$

onde:

$p_{sk,s}$  = pressão saturada de vapor, à temperatura da pele, (kPa);

$p_a$  = pressão parcial do vapor de água no ambiente considerado, (kPa);

$R_T$  = resistência do ar e roupas à evaporação, ( $m^2.kPa/W$ ).

b) No caso da pele estar parcialmente molhada,  $E$ , ( $W/m^2$ ):

$$E = w \cdot E_{max} \quad [66]$$

onde:

$w$  = parte da pele molhada, fração equivalente da superfície da pele que pode ser considerada totalmente molhada, (adimensional)

2.7.2.8 - Calor armazenado no organismo,  $S$ , ( $W/m^2$ ).

O calor armazenado no organismo, é dado pela soma algébrica dos fluxos de calor apresentados anteriormente.

$$S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - E \quad [67]$$

2.7.2.9 - Cálculo da taxa requerida de evaporação,  $E_{req}$ , fração requerida de pele molhada,  $w_{req}$ , e taxa requerida de suor,  $SW_{req}$ .

Analisando-se a equação 8 acima, podemos transportar a perda de calor por evaporação da pele, E, para o primeiro membro, o qual apresentaria a seguinte soma algébrica, S + E. Para o estado de equilíbrio térmico do corpo, S = 0, e a perda de calor por evaporação da pele, E, nesse caso, é chamada de taxa requerida de evaporação para a manutenção do equilíbrio térmico do corpo,  $E_{req}$ . A equação 67 poderia então ser reescrita da seguinte maneira:

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R \quad [68]$$

A fração requerida de pele molhada,  $w_{req}$ , é definida como a razão entre a taxa requerida de evaporação e a taxa de evaporação máxima. Assim sendo:

$$w_{req} = \frac{E_{req}}{E_{max}} \quad [69]$$

A taxa requerida de suor,  $SW_{req}$ , será determinada com base na taxa requerida de evaporação, porém também será influenciada pelo tipo e quantia de suor, o qual eventualmente pode escorrer ou pingar sem evaporar, não apresentando dessa maneira um resfriamento eficaz devido à evaporação. Dessa forma:

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}} \quad [70]$$

onde:

$r_{req}$  = é a eficiência da evaporação do suor, (adimensional), correspondente à fração requerida de pele molhada,  $w_{req}$ .

### 2.7.3 - Interpretação da taxa requerida de suor:

A interpretação dos valores calculados pelo método analítico, estão baseados em 2 critérios de stress;

- a) A máxima fração de pele molhada,  $w_{máx}$ , (adimensional)
- b) A máxima taxa de suor,  $SW_{máx}$ , ( $W/m^2$  ou g)
  - e sobre dois limites máximos permitidos para não haver danos à saúde:
    - a) O máximo calor armazenado pelo corpo,  $Q_{máx}$ , ( $W.h/m^2$ )
    - b) A máxima perda de água do organismo,  $D_{máx}$ , ( $W.h/m^2$  ou g)

Nota: A tabela 2.7.1 do anexo C, apresenta esses valores máximos permitidos.

A taxa requerida de suor,  $SW_{req}$ , não pode ultrapassar a taxa de suor máxima admitida para a pessoa,  $SW_{máx}$ . A fração requerida de pele molhada,  $w_{req}$ , não pode ultrapassar a fração de pele molhada máxima,  $w_{máx}$ . Esses valores máximos, apresentados na tabela 2.7.1, são função da aclimatação da pessoa.

Quando o organismo não encontra-se em equilíbrio térmico, o calor armazenado no corpo,  $S$ , deve ser limitado a um valor máximo,  $Q_{máx}$ , de maneira que o aumento de temperatura corporal resultante não cause nenhum efeito patológico. Ainda, qualquer que seja a situação de balanço térmico, em equilíbrio ou não, a perda de água do organismo deve ser limitada a um valor máximo,  $D_{máx}$ , compatível com a manutenção do equilíbrio hidromineral do organismo.

### 2.7.3.1 - Análise da situação de trabalho:

Essa análise consiste na determinação dos valores esperados de fração de pele molhada, taxa de evaporação e taxa de suor para a situação real,  $w_p$ ,  $E_p$  e  $SW_p$ , levando-se em conta os valores requeridos,  $w_{req}$ ,  $E_{req}$  e  $SW_{req}$ , bem como os limites máximos permitidos,  $w_{máx}$  e  $SW_{máx}$ .

Na situação em que:  $w_{req} < w_{máx}$  e  $SW_{req} < SW_{máx}$ , o corpo encontra-se em equilíbrio térmico, e os valores esperados para a situação real de trabalho são:

$$w_p = w_{req} \quad [71]$$

$$E_p = E_{req} \quad [72]$$

$$SW_p = SW_{req} \quad [73]$$

Na situação em que,  $w_{req} > w_{máx}$ , os valores esperados são:

$$w_p = w_{max} \quad [74]$$

$$E_p = w_p \cdot E_{max} \quad [75]$$

$$SW_p = \frac{E_p}{r_p} \quad [76]$$

onde:

$r_p$  = eficiência na evaporação do suor, correspondente à  $w_p$ .

Na situação em que,  $SW_{req} > SW_{máx}$ , os valores esperados são:

$$w_p = \frac{SW_{max} \cdot r_p}{E_{max}} \quad [77]$$

onde deve-se considerar a relação entre  $w_p$  e  $r_p$ , apresentada no anexo A da norma.

$$E_p = w_p \cdot E_{max} \quad [78]$$

$$SW_p = SW_{max} \quad [79]$$

### 2.7.3.2 - Determinação do tempo de exposição permitido, DLE, (min):

Esse tempo de exposição pode ser determinado em função dos valores máximos permitidos para calor armazenado no corpo,  $Q_{m\acute{a}x}$ , e perda de água do organismo,  $D_{m\acute{a}x}$ , apresentados na tabela 2.7.1 do anexo C.

Quando,  $E_p = E_{req}$  e  $SW_p < D_{m\acute{a}x}/8$  não é necessário se estipular limite de tempo de exposição em uma jornada de trabalho de 8 horas.

Nos casos em que qualquer uma das condições anteriores não for atendida, deve-se calcular o tempo de exposição permitido, DLE.

Em situações em que,  $E_{req} > E_p$ , onde a diferença ( $E_{req} - E_p$ ) representa um acúmulo de calor no organismo, levando a um aumento da temperatura corporal, o tempo limite de exposição pode ser assim calculado:

$$DLE_1 = \frac{60 \cdot Q_{max}}{E_{req} - E_p} \quad [80]$$

Em situações em que,  $SW_p > D_{m\acute{a}x}/8$ , isto é, esteja ocorrendo uma excessiva perda de água do organismo, o tempo limite de exposição é assim calculado:

$$DLE_2 = \frac{60 \cdot D_{max}}{SW_p} \quad [81]$$

Nota: Após a determinação dos tempos limites de exposição, adota-se aquele que apresentar o menor valor entre os encontrados pelas equações 81 e 82.

#### **PRECAUÇÕES:**

Em casos onde  $E_{m\acute{a}x}$ , é negativo, levando a uma condensação do vapor de água na pele, ou o tempo limite de exposição é inferior a 30 min, onde o fenômeno do suor representa o principal papel na perda por evaporação de uma pessoa, é necessário medições com precauções especiais, feitas direta e individualmente sobre os trabalhadores com contínuo acompanhamento.

### 2.7.3.3 - Organização do trabalho, sob os efeitos do calor.

Quando o tempo limite de exposição determinante é aquele encontrado por uma perda de água excessiva do organismo (equação 81), não se permite mais nenhuma exposição ao ambiente durante o dia, do que o tempo calculado.

Quando o tempo limite de exposição determinante é aquele encontrado por um aumento da temperatura corporal (equação 80) é permitido que se intercalem períodos de trabalho/descanso, de tal maneira que essa combinação afaste qualquer risco de stress térmico. No caso da situação de trabalho envolver diferentes condições de exposição, com períodos de trabalho/descanso, a interpretação deve ser feita usando-se os valores médios ponderados pelo tempo de exposição, entre  $E_{req}$  e  $E_{m\acute{a}x}$ .

## 2.7.4 - Anexos:

### 2.7.4.1 - ANEXO A: Dados necessários para o cálculo do balanço térmico.

#### A.1) Perda de calor sensível pela respiração (Convecção):

Pode ser determinada em função da taxa metabólica:

$$C_{\text{res}} = 0,0014.M.(t_{\text{ex}} - t_a)$$

onde, na prática  $t_{\text{ex}}$  pode ser considerado constante e igual a 35°C

#### A.2) Perda de calor latente pela respiração (Evaporação):

Pode também ser determinada em função da taxa metabólica:

$$E_{\text{res}} = 0,0173.M.(p_{\text{ex}} - p_a)$$

onde, na prática, a pressão saturada do vapor de água do ar expirado,  $p_{\text{ex}}$ , pode ser considerada constante e igual a 5,624 kPa, para a temperatura do ar expirado de 35°C

#### A.3) Coeficiente de troca de calor por convecção:

a) Em convecção natural:

$$h_c = 2,38.(t_{\text{sk}} - t_a)^{0,25}$$

b) Em convecção forçada:

$$h_c = 3,5 + 5,2.v_{\text{ar}} \quad \text{para } v_{\text{ar}} < 1 \text{ m/s}$$

$$h_c = 8,7.v_{\text{ar}}^{0,6} \quad \text{para } v_{\text{ar}} > 1 \text{ m/s}$$

sendo  $v_{\text{ar}}$ , a velocidade relativa do ar, dada por:  $v_{\text{ar}} = v_a + 0,0052(M-58)$

É recomendado que o aumento da velocidade do ar, devido ao movimento no trabalho, seja restrito a 0,7 m/s.

É recomendado também que o coeficiente de convecção seja calculado para ambos os casos, natural e forçada, e que se adote o mais alto deles para as trocas por convecção.

#### A.4) Coeficiente de troca de calor por radiação:

É dado pela seguinte expressão:

$$h_r = \sigma.\epsilon_{\text{sk}}.A_r/A_{\text{Du}}.[(t_{\text{sk}}+273)^4 - (t_{\text{rm}}+273)^4] / (t_{\text{sk}} - t_r)$$

onde:

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman, igual a  $5,67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]

$\epsilon_{\text{sk}}$  = Emissividade da pele, igual a 0,97

$A_r/A_{\text{Du}}$  = Fração da superfície da pele envolvida nas trocas por radiação, igual a 0,67 para pessoas agachadas, 0,70 para pessoas sentadas e 0,77 para pessoas em pé.

#### A.5) Fator de redução para trocas de calor sensível:

Pode ser determinado por:

$$F_{\text{cl}} = 1 / [(h_c+h_r).I_{\text{cl}} + 1/f_{\text{cl}}]$$

onde:

$I_{\text{cl}}$  = Isolamento térmico das roupas, (m<sup>2</sup>.K/W), cujos valores são apresentados na tabela do anexo B desta norma ou através das tabelas constantes na ISO 7730/94, ASHRAE Fundamentals, cap. 8, ou ISO 9920/95.

$f_{\text{cl}}$  = razão entre a área vestida pela área do corpo nu, igual a:  $f_{\text{cl}} = 1 + 1,97.I_{\text{cl}}$  (adimen.)

#### A.6) Resistência das roupas à evaporação:

É calculado com base no índice de permeabilidade das roupas, dado por, para roupas leves e porosas:

$$R_T = 1 / (h_e \cdot F_{pcl})$$

onde:

$h_e$  = coeficiente de transferência de calor por evaporação, igual a:  $h_e = 16,7 \cdot h_c$

$F_{pcl}$  = fator de redução para trocas de calor latente, igual a:

$$F_{pcl} = 1 / \{1 + 2,22 \cdot h_c \cdot [I_{cl} - (1 - 1/f_{cl}) / (h_c + h_r)]\}$$

*A.7) Eficiência na evaporação do suor:*

A eficiência na evaporação do suor é derivada da fração de pele molhada, e dada por:

$$r = 1 - w^2/2$$

*A.8) Temperatura operativa:*

É determinada por:

$$t_o = (h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_{rm}) / (h_c + h_r)$$

#### 2.7.4.2 - ANEXO B: Estimativa do isolamento térmico de vestimentas:

Este anexo da norma, apresenta duas tabelas, uma com o isolamento térmico,  $I_{cl}$ , para combinações típicas de vestimentas (trajes) e outra com o isolamento térmico das vestimentas individuais (peças de roupas).

#### 2.7.4.3 - ANEXO C: Critérios de stress térmico e valores limites para disfunções térmicas:

*C.1) Determinação da temperatura média da pele:*

É dada por:

$$t_{sk} = 30,0 + 0,093 \cdot t_a + 0,045 \cdot t_{rm} - 0,571 \cdot v_a + 0,254 \cdot p_a + 0,00128 \cdot M - 3,57 \cdot I_{cl}$$

Em situações práticas de trabalho, para efeito de simplificação, a temperatura média da pele pode ser considerada como sendo igual a 36°C

*C.2) Diferenças entre pessoas e aclimação:*

É necessário se considerar, para efeito da fixação dos valores limites apresentados na tabela 2.7.1 a seguir, 2 níveis diferenciados, os quais levam em conta a grande diferença entre as pessoas:

C.2.1) Um nível de “precaução”, que não apresenta qualquer risco para uma pessoa fisicamente adaptada a execução do trabalho analisado e gozando de boa saúde;

C.2.2) Um nível de “perigo”, que para determinadas pessoas, mesmo adaptadas ao trabalho analisado e gozando de boa saúde, podem representar realmente um risco.

Os níveis de precaução e de perigo correspondem a valores limites diferenciados, caso os trabalhadores estejam ou não aclimatados ao calor.

A tabela 2.7.1 fornece, em função das características médias das pessoas expostas (aclimatadas ou não aclimatadas) e dos critérios adotados (precaução ou perigo), os valores máximos referentes à:

- Fração de pele molhada máxima,  $w_{máx}$  (adimensional)

- Taxa de suor máxima,  $SW_{máx}$ , em  $W/m^2$  ou em  $g/h$  para um trabalhador padrão com área corporal igual a  $1,8 m^2$
- Calor armazenado no corpo máximo,  $Q_{máx}$ , em  $W.h/m^2$ . Os valores máximos recomendados são aqueles que correspondem a um aumento na temperatura corporal de  $0,8^\circ C$  e  $1^\circ C$  para os critérios de precaução e perigo, respectivamente. Esse aumento da temperatura corporal é por sua vez, oriunda de um aumento na temperatura da pele de  $3,5^\circ C$  e  $4,0^\circ C$  respectivamente.
- Perda de água máxima,  $D_{máx}$ , em  $W.h/m^2$  ou em  $g$ . Os valores máximos recomendados são correspondentes a uma máxima desidratação do corpo de 4% a 6% da massa corporal, com uma normal reidratação durante a exposição, dependendo do grau de aclimação das pessoas.

Tabela 2.7.1 - Valores de referência para os diferentes critérios de stress térmico e disfunções.(C.2 - ISO)

CRITÉRIOS	Pessoas não aclimatadas		Pessoas aclimatadas	
	Precaução	Perigo	Precaução	Perigo
<b>Fração de pele molhada máxima</b> $w_{máx}$	0,85	0,85	1,0	1,0
<b>Taxa de suor máxima</b>				
Descanso				
M < 65 $W/m^2$	$SW_{máx}$ (W/m <sup>2</sup> ) 100	150	200	300
	(g/h) 260	390	520	780
Trabalho				
M > 65 $W/m^2$	$SW_{máx}$ (W/m <sup>2</sup> ) 200	250	300	400
	(g/h) 520	650	780	1.040
<b>Máximo calor armazenado</b> $Q_{máx}$ (W.h/m <sup>2</sup> )	50	60	50	60
<b>Máxima perda de água</b> $D_{máx}$ (W.h/m <sup>2</sup> ) (g)	1.000 2.600	1.250 3.250	1.500 3.900	2.000 5.200

#### 2.7.4.4 - ANEXO D: Programa computacional para o cálculo da taxa de suor requerida e do tempo de exposição permitido para qualquer ambiente térmico

O programa de cálculo é composto de quatro partes distintas e encontra-se escrito em linguagem BASIC.

#### 2.7.5 - Exemplo de aplicação:

Sendo apresentados os seguintes dados extraídos de uma medição em um posto de trabalho em uma indústria, determinar a possibilidade de ocorrência de stress térmico, através do método da taxa requerida de suor, proceder a respectiva interpretação dos resultados, bem como a apresentação dos máximos tempos permitidos para a exposição humana.

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

#### 1º Passo: Determinação dos dados higrométricos:

*Pressão de saturação do ar ambiente:*

$$p_{as} = 0,6105 \cdot e^{(17,27 \cdot t_a / (t_a + 237,3))} \quad \text{logo: } p_{as} = 9,87 \text{ kPa.}$$

*Pressão de saturação para a temperatura de bulbo úmido:*

$$p_{as,w} = 0,6105 \cdot e^{(17,27 \cdot t_{bu} / (t_{bu} + 237,3))} \quad p_{as,w} = 5,12 \text{ kPa.}$$

*Pressão parcial do vapor de água no ambiente:*

$$p_a = p_{as,w} - 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t_a - t_{bu}) \quad p_a = 4,29 \text{ kPa.}$$

*Umidade relativa do ar ambiente:*

$$RH = p_a / p_{as} \cdot 100 \quad RH = 43,46\%.$$

Com os dados de  $t_{bs}$  ( $t_a$ ) e  $t_{bu}$ , pode-se alternativamente consultar a carta psicrométrica, onde a umidade relativa,  $RH = 43\%$ .

2º Passo: Determinação da temperatura média da pele, através da equação empírica:

$$t_{sk} = 30,0 + 0,093 \cdot t_a + 0,045 \cdot t_{rm} - 0,571 \cdot v_a + 0,254 \cdot p_a + 0,00128 \cdot M - 3,57 \cdot I_{cl}$$

*Temperatura média radiante*, considerando-se que a temperatura de globo tenha sido coletada com globo negro, com emissividade = 0,95 e diâmetro = 15 cm.

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(1,10 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6}) / (\epsilon \cdot D^{0,4})] \cdot (t_g - t_a)\}^{0,25} - 273 \quad t_{rm} = 55,97^\circ\text{C}$$

*Taxa metabólica:*

$$M = 2,4 \text{ met, porém como a relação é: } 1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2 \quad M = 140,0 \text{ W/m}^2$$

*Isolamento das roupas:*

$$I_{cl} = 0,7 \text{ clo, porém como a relação é: } 1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} \quad I_{cl} = 0,109 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

*Temperatura média da pele:*

substituindo esses valores na equação acima:

$t_{sk} = 37,25^\circ\text{C}$
--------------------------------

3º Passo: Determinação da taxa máxima de evaporação,  $E_{m\acute{a}x}$ :

$$E_{m\acute{a}x} = (p_{sk,s} - p_a) / R_T$$

*Pressão de saturação para a temperatura da pele:*

$$p_{sk,s} = 0,6105 \cdot e^{(17,27 \cdot t_{sk} / (t_{sk} + 237,3))} \quad p_{sk,s} = 6,36 \text{ kPa}$$

*Resistência da roupa à evaporação:*

$$R_T = 1 / (h_e \cdot F_{pcl})$$

onde:

$$h_e = 16,7 \cdot h_c, \text{ mas calculando } h_c = 2,38 \cdot |t_{sk} - t_a|^{0,25} = 9,52 \text{ (convecção natural)}$$

$$h_c = 3,5 + 5,2 \cdot v_{ar} = 9,22 \text{ (convecção forçada),}$$

$$\text{logo } h_e = 16,7 \cdot 9,52, \text{ onde: } h_e = 158,98$$

$$F_{pcl} = 1 / \{1 + 2,22 \cdot h_c [I_{cl} - (1 - 1/f_{cl}) / (h_c + h_r)]\}, \text{ mas } h_r = \sigma \cdot \epsilon_{sk} \cdot (A_r / A_{Du}) [(t_{sk} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] / (t_{sk} - t_{rm})$$

considerando a pessoa em pé:  $h_r = 5,53$

$$f_{cl} = 1 + 1,197 \cdot I_{cl}, \quad f_{cl} = 1,13$$

$$\text{logo: } F_{pcl} = 0,3204$$

$$\text{Assim sendo, } R_T = 1 / (158,98 \cdot 0,3204)$$

$$R_T = 0,0196 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$$

*Taxa de evaporação máxima:*

substituindo os valores encontrados na equação da evaporação:

$E_{m\acute{a}x} = 105,61 \text{ W/m}^2$
--

4º Passo: Determinação da taxa requerida de evaporação,  $E_{req}$ :

$$E_{req} = M - C_{res} - E_{res} - C - R$$

*Perda de calor por convecção pela respiração:*

$$C_{\text{res}} = 0,0014 \cdot M \cdot (t_{\text{ex}} - t_a), \text{ como pela norma } t_{\text{ex}} = 35^\circ\text{C} \quad C_{\text{res}} = -2,07 \text{ W/m}^2$$

*Perda de calor por evaporação da respiração:*

$$E_{\text{res}} = 0,0173 \cdot M \cdot (p_{\text{ex}} - p_a), \text{ como pela norma } p_{\text{ex}} = 5,624, \text{ para a } t_{\text{ex}} \quad E_{\text{res}} = 3,23 \text{ W/m}^2$$

*Perda de calor por convecção na pele:*

$$C = h_c \cdot F_{\text{cl}} \cdot (t_{\text{sk}} - t_a), \text{ mas o fator de redução é: } F_{\text{cl}} = 1 / [(h_c + h_r) \cdot I_{\text{cl}} + (1/f_{\text{cl}})]; F_{\text{cl}} = 0,398$$

dessa maneira:  $C = -31,56 \text{ W/m}^2$

*Perda de calor por radiação da pele:*

$$R = h_r \cdot F_{\text{cl}} \cdot (t_{\text{sk}} - t_{\text{rm}}) \quad R = -41,20 \text{ W/m}^2$$

*Taxa requerida de evaporação:*

substituindo os valores na equação correspondente:  $E_{\text{req}} = 211,60 \text{ W/m}^2$

5º Passo: Cálculo da fração requerida de pele molhada,  $w_{\text{req}}$ , e da eficiência requerida na evaporação,  $r_{\text{req}}$ :

*Fração requerida de pele molhada:*

$$w_{\text{req}} = E_{\text{req}} / E_{\text{máx}} \quad w_{\text{req}} = 2,00$$

*Eficiência requerida na evaporação:*

$$r_{\text{req}} = 1 - (w_{\text{req}}^2 / 2)$$

$w_{\text{req}} = 1,00$
-------------------------

$r_{\text{req}} = 0,50$
-------------------------

6º Passo: Determinação da taxa requerida de suor,  $SW_{\text{req}}$ :

$$SW_{\text{req}} = (E_{\text{req}} / r_{\text{req}})$$

$SW_{\text{req}} = 423,2 \text{ W/m}^2$
---

7º Passo: Análise da situação de trabalho:

Como a fração de pele molhada requerida,  $w_{\text{req}}$ , é superior a fração de pele molhada máxima,  $w_{\text{máx}}$ , que pela tabela 2.7.1 é igual a 1,0 então:

$$w_p = w_{\text{máx}} = 1,0$$

$$E_p = w_p \cdot E_{\text{máx}} = 105,61 \text{ W/m}^2$$

$$SW_p = E_p / r_p, \text{ e como } r_p = 0,50, \text{ logo } SW_p = 211,22$$

Como a taxa requerida de suor,  $SW_{\text{req}} = 423,2$  é superior a  $SW_{\text{máx}} = 400$  (Situação de perigo na tabela C.1), então:

$$w_p \cdot E_{\text{máx}} = SW_{\text{máx}} \cdot r_p \text{ e de acordo com a relação da norma: } w_p \cdot E_{\text{máx}} = SW_{\text{máx}} \cdot (1 - w_p^2 / 2)$$

$$w_p = 1,17, \text{ logo } w_p = 1,0$$

$$E_p = w_p \cdot E_{\text{máx}}, \text{ logo } E_p = 123,56 \text{ W/m}^2$$

$$SW_p = SW_{\text{máx}} = 400 \text{ W/m}^2$$

A situação mais desfavorável do posto de trabalho, será:

$$w_p = 1,0$$

$$E_p = 105,61 \text{ W/m}^2$$

$$SW_p = 400 \text{ W/m}^2$$

8º Passo: Determinação do tempo de exposição máximo permitido:

Condições a serem verificadas:

$$E_p = E_{\text{req}}$$
$$SW_p < D_{\text{máx}} / 8$$

Como nenhuma das condições de equilíbrio térmico é verificada, determinam-se os tempos máximos de exposição permitidos, levando-se em conta o aumento da temperatura corporal e a perda de água sofrida pelo organismo:

Determinação do tempo de exposição levando-se em conta o aumento da temperatura corporal:

$$DLE_1 = 60 \cdot Q_{\text{máx}} / (E_{\text{req}} - E_p)$$

$$DLE_1 = 33,97 \text{ min}$$

Determinação do tempo de exposição levando-se em conta a perda de água do organismo:

$$DLE_2 = 60 \cdot D_{\text{máx}} / SW_p$$

$$DLE_2 = 300 \text{ min}$$

9º Passo: Conclusões:

Como o fator determinante para o tempo máximo de exposição foi o aumento da temperatura corporal, deve-se prever períodos de descanso a fim de moderar o aumento da temperatura corporal, porém nas condições ambientais do posto de trabalho o funcionário não pode trabalhar mais do que 300 minutos por dia.

10º Passo: Alternativa de regime de trabalho:

Conforme dito anteriormente, pode-se prever situação de trabalho intermitente com períodos de descanso, a fim de moderar o aumento da temperatura corporal. Dessa maneira propõem-se um regime intermitente com 30 minutos de trabalho por 30 minutos de descanso por hora, sendo o descanso realizado em um ambiente bem mais ameno, com as seguintes características:

$$M = 65 \text{ W/m}^2; t_{\text{bs}} = 24^\circ\text{C}; t_{\text{bu}} = 18^\circ\text{C}; t_g = 24^\circ\text{C}; v_a = 0,2 \text{ m/s.}$$

Repetindo-se os passos 1º a 4º anteriores, para a situação de repouso, temos:

$$E_{\text{máx, repouso}} = 127,93 \text{ W/m}^2 \text{ e } E_{\text{req, repouso}} = 15,19 \text{ W/m}^2.$$

Efetuando-se uma média ponderada entre o ambiente de trabalho e o de repouso:

$$E_{\text{máx, médio}} = (105,61 \times 30 + 127,93 \times 30) / 60$$

$$E_{\text{máx, médio}} = 116,77 \text{ W/m}^2$$

$$E_{\text{req, médio}} = (211,60 \times 30 + 15,19 \times 30) / 60$$

$$E_{\text{req, médio}} = 113,40 \text{ W/m}^2$$

Com esses valores médios das taxas de evaporação, temos conforme o 5º e 6º passos desse exemplo:

$$w_{\text{req}} = 0,97$$

$$r_{\text{req}} = 0,53$$

$$SW_{\text{req}} = 213,96 \text{ W/m}^2$$

Conforme consta da Norma, como  $w_{\text{req}}=0,97 < w_{\text{máx}}=1,0$   
 $SW_{\text{req}}=213,96 < SW_{\text{máx}}=300$  (Situação de atenção pela Tabela 2.7.1), o corpo encontra-se em equilíbrio térmico.

A situação de trabalho pode assim ser definida:

$$\begin{aligned}w_p &= w_{req} = 0,97 \\E_p &= E_{req} = 113,40 \text{ W/m}^2 \\SW_p &= SW_{req} = 213,96 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

Para se determinar o tempo máximo de exposição, deve-se verificar as 2 condições:

$$\begin{aligned}E_p &= E_{req} \\SW_p &< D_{m\acute{a}x}/8 & D_{m\acute{a}x}/8 &= 187,50 \text{ (tabela C.1)}\end{aligned}$$

Como a segunda condição não foi satisfeita, calcula-se assim o tempo máximo de exposição:

$$DLE = 60 \cdot D_{m\acute{a}x} / SW_p \quad \boxed{DLE = 420,63 \text{ min}}$$

Dessa maneira, com essa nova configuração do regime de trabalho, o tempo máximo que o trabalhador deve ficar submetido durante o dia é de 420,63 min.

## **2.8 - ISO/TR 11079/1993 - Avaliação de ambientes frios - Determinação do isolamento requerido de roupas.**

Este relatório técnico da ISO, propõe métodos e estratégias para a verificação do stress térmico a que possam estar sujeitas as pessoas em ambientes frios, quer desempenhando atividades contínuas ou intermitentes e em ambientes internos ou externos. Os aspectos relativos aos efeitos específicos causados por fenômenos meteorológicos, como precipitações e outros, não estão cobertos por este método.

O método aqui apresentado, baseia-se em estudos realizados anteriormente, e em dizeres das seguintes normas internacionais já publicadas até então:

- ISO 7726/85 - Instrumentos e métodos de medição de parâmetros ambientais;
- ISO 7730/84 - Determinação do PMV e PPD em ambientes moderados;
- ISO 8996/90 - Determinação da produção do calor metabólico;
- Estudos sobre isolamento das roupas que vieram a ser publicados pela ISO 9920/95.

### **2.8.1 - Simbologia utilizada:**

Os cálculos e determinações analíticas aqui apresentados, utilizam a seguinte simbologia:

$A_{du}$	Área da superfície corporal de DuBois [ $m^2$ ]
$A_r$	Área da superfície corporal que troca calor por radiação [ $m^2$ ]
$C$	Troca de calor por convecção [ $W/m^2$ ]
$c_e$	Calor latente de evaporação [ $J/kg$ ]
$c_p$	Calor específico do ar seco a pressão constante [ $J/kg_{ar\ seco}$ ]
$C_{res}$	Troca de calor por convecção da respiração [ $W/m^2$ ]
$DLE$	Tempo limite de exposição [h]
$E$	Troca de calor por evaporação do suor [ $W/m^2$ ]
$E_{res}$	Troca de calor por evaporação da respiração [ $W/m^2$ ]

$f_{cl}$	Razão da superfície da área vestida pela área do corpo nú [adimensional]
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]
$h_r$	Coefficiente de transferência de calor por radiação [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]
$I_a$	Isolamento da camada de ar limite [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
$I_{cl}$	Isolamento básico das vestimentas [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
$I_{clr}$	Isolamento das vestimentas resultante [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
$I_T$	Isolamento total de roupas e camada de ar limite [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
$I_{Tr}$	Isolamento total resultante [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
$i_m$	Índice de permeabilidade [adimensional]
IREQ	Isolamento requerido das roupas [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
IREQ <sub>min</sub>	Isolamento mínimo requerido das roupas [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
IREQ <sub>neutro</sub>	Isolamento neutro requerido das roupas [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]
K	Troca de calor por condução [ $W/m^2$ ]
M	Calor metabólico gerado pelo organismo [ $W/m^2$ ]
$p_a$	Pressão parcial de vapor no ambiente, para a temperatura do ar [kPa]
$p_{ex}$	Pressão saturada de vapor para a temperatura do ar expirado [kPa]
$p_{sk}$	Pressão parcial de vapor, para a temperatura da pele [kPa]
$p_{sk,s}$	Pressão saturada de vapor para a temperatura da pele [kPa]
Q	Ganho ou perda de calor pelo corpo [ $W \cdot h/m^2$ ]
Q <sub>lim</sub>	Valor limite para Q [ $W \cdot h/m^2$ ]
R	Troca de calor por radiação [ $W/m^2$ ]
$R_T$	Resistência das roupas e da camada de ar à evaporação [ $m^2 \cdot kPa/W$ ]
RT	Tempo de recuperação [h]
S	Taxa de calor armazenado no corpo [ $W/m^2$ ]
$t_a$	Temperatura do ar ambiente [ $^\circ C$ ]
$t_{ch}$	Temperatura de resfriamento [ $^\circ C$ ]
$t_{cl}$	Temperatura média da superfície das roupas [ $^\circ C$ ]
$t_{ex}$	Temperatura do ar expirado [ $^\circ C$ ]
$t_o$	Temperatura operativa [ $^\circ C$ ]
$t_{rm}$	Temperatura radiante média [ $^\circ C$ ]
$t_{sk}$	Temperatura local da pele [ $^\circ C$ ]
$t_{skm}$	Temperatura média da pele [ $^\circ C$ ]
V	Taxa de ventilação da respiração [kg/s]
$v_a$	Velocidade do ar [m/s]
$v_{ar}$	Velocidade relativa do ar [m/s]
W	Trabalho muscular realizado, ou eficiência mecânica, [ $W/m^2$ ]
w	Fração de pele molhada [adimensional]
$W_a$	Razão de umidade do ar inalado [ $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$ ]
$W_{ex}$	Razão de umidade do ar expirado [ $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$ ]
WCI	Índice de resfriamento do vento [ $W/m^2$ ]

### 2.8.2 - Princípios dos métodos de avaliação:

Sugere-se avaliar o stress por frio, em termos de resfriamento geral do corpo e resfriamento local de específicas partes do corpo, mãos e face por exemplo.

Para o resfriamento geral do corpo, apresenta-se um método analítico de avaliação e interpretação, baseado nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente e o respectivo isolamento de roupas (IREQ) para manter o equilíbrio térmico. Para o resfriamento localizado, devem ser analisadas separadamente as exposições em ambientes internos e ambientes externos. A avaliação do desconforto ou stress por frio em ambientes internos pode ser feita adotando-se os mesmos critérios contidos na ISO 7730 para ambientes moderados, e a avaliação do efeito do stress por frio em ambientes externos, deve ser feita através da determinação do resfriamento local devido ao vento, isto é, através do índice WCI, índice de resfriamento do vento, a respectiva temperatura de resfriamento,  $t_{ch}$ , e a temperatura mínima das mãos.

### 2.8.3 - Resfriamento geral do corpo e determinação do IREQ:

Como já dito anteriormente, o método sugere a determinação do isolamento requerido para as roupas (IREQ) a fim de que se mantenha o balanço térmico do corpo dentro de condições específicas. Como existe um limite superior para o valor que isolamento térmico das vestimentas podem fornecer, deve também ser determinado o tempo limite de exposição (DLE), tendo por base os limites aceitáveis de esfriamento do corpo.

O método envolve os seguintes passos:

Medições dos parâmetros térmicos do ambiente;  
 Determinação do nível de atividade (taxa metabólica);  
 Cálculo do isolamento térmico requerido das roupas (IREQ);  
 Comparação com o isolamento fornecido pelas roupas existentes;  
 Avaliação das condições para o balanço térmico e determinação do tempo máximo de exposição (DLE).

O índice IREQ, pode ser aplicado como:

- Uma medida de stress por frio, que leva em conta a temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade, velocidade do ar e taxa metabólica;
- Um método de análise dos efeitos de parâmetros específicos e avaliação das medidas de retrofit;
- Um método de especificação do isolamento das roupas necessário, bem como a seleção das roupas a serem utilizadas sob determinadas condições ambientais.

Sua determinação se dá através da resolução da equação do balanço térmico:

$$M - W = E_{res} + C_{res} + E + K + R + C + S \quad [82]$$

onde:

$$C_{res} = c_p \cdot V \cdot (t_{ex} - t_a) / A_{du}$$

$$E_{res} = c_e \cdot V \cdot (W_{ex} - W_a) / A_{du}$$

$$E = w \cdot (p_{sk,s} - p_a) / R_T$$

K = é geralmente pequeno e pode ser absorvido pelas trocas por convecção e radiação.

$$C = f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a)$$

$$R = f_{cl} \cdot h_r (t_{cl} - t_r)$$

As trocas de calor entre o corpo e o ambiente, balanço térmico, podem ser analisadas em duas etapas. “*Trocas do corpo para a superfície externa das roupas*” e “*trocas da superfície externa das roupas para o ambiente (por convecção e radiação)*”. Assim sendo a equação 82 anterior, pode ser reescrita:

$$M - W - E_{res} - C_{res} - E = \frac{t_{skm} - t_{cl}}{I_{clr}} = R + C \quad [83]$$

Substituindo-se  $I_{clr}$  por IREQ, e analisando-se a parte da esquerda da equação com a parte central, temos:

$$IREQ = \frac{t_{skm} - t_{cl}}{M - W - E_{res} - C_{res} - E} \quad [84]$$

onde essa equação apresenta 2 incógnitas que são IREQ e  $t_{cl}$ .

Comparando-se a parte da esquerda da equação com a parte da direita, temos:

$$M - W - E_{res} - C_{res} - E = R + C \quad [85]$$

onde essa equação apresenta uma incógnita que é  $t_{cl}$  a qual é determinada iterativamente.

Substituindo-se o valor de  $t_{cl}$  na equação 84, tem-se o valor de IREQ

### 2.8.3.1 - Interpretação do IREQ:

#### a) IREQ como um índice de frio:

IREQ é uma medida de stress térmico, que leva em conta os efeitos combinados da produção interna de calor e as perdas para o ambiente. Quanto maior o poder de resfriamento do ambiente, maior é o valor do IREQ para uma determinada atividade. O stress térmico, ou o IREQ, para um conjunto de condições ambientais é diminuído com o aumento da atividade metabólica, devido à demanda extra de dissipação do calor orgânico.

#### b) IREQ como um índice de disfunção fisiológica:

É sugerido que o índice seja definido para 2 níveis de disfunções fisiológicas:

$IREQ_{mínimo}$ , o qual representa o mínimo isolamento térmico para manter o corpo em equilíbrio, para um nível sub-normal de temperatura corporal. Ele representa o mais alto resfriamento admissível para o corpo durante atividade ocupacional.

$IREQ_{neutro}$ , que representa o isolamento térmico requerido para manter o corpo em neutralidade térmica, isto é, o equilíbrio é mantido em condições normais de temperatura corporal. Representa uma faixa admissível de resfriamento corporal.

#### c) IREQ e isolamento de roupas existentes:

Por ser um índice de isolamento de roupas requerido para enfrentar as situações reais existentes, ele serve como um guia de escolha de roupas, por comparação com seus valores medidos de isolamento térmico. O intervalo entre o  $IREQ_{min}$  e  $IREQ_{neutro}$ , corresponde a uma zona reguladora de vestimentas, onde podem ser escolhidas as vestimentas. Roupas com isolamento inferiores ao  $IREQ_{min}$ , podem acarretar o risco de progressivo resfriamento do corpo, com hipotermia, enquanto que as com valores maiores que o  $IREQ_{neutro}$ , poderão levar a um superaquecimento.

### 2.8.3.2 - Definição e cálculo do tempo máximo de exposição:

Quando o isolamento das roupas utilizadas é inferior ao IREQ determinado, é necessário se fixar o tempo máximo de exposição para prevenir um resfriamento progressivo do corpo. Uma certa redução no calor armazenado no organismo,  $Q$ , é aceitável durante a exposição de poucas horas, e esse valor pode ser utilizado para a determinação do limite de exposição, quando é conhecida a taxa de calor armazenada no organismo. O tempo máximo é assim determinado:

$$DLE = Q_{lim} / S \quad [85]$$

onde

$Q_{lim}$  = valor máximo de perda de calor admitida (tabelado)

$S = M - W - C_{res} - E_{res} - E - R - C$ , sendo que essa equação é resolvida a partir da equação 24, onde a respectiva  $t_{cl}$  é calculada iterativamente.

Depois da exposição, um período de recuperação,  $RT$ , deveria permitir o restabelecimento do balanço de calor normal para o corpo. Esse período é calculado da mesma maneira que o tempo de exposição máximo, apenas com a substituição das condições frias por condições amenas num local de recuperação. Dessa maneira, o período de recuperação mínimo pode ser determinado por:

$$RT = Q_{lim} / S' \quad [86]$$

onde:

$S' = \dot{E}$  a taxa de calor armazenada (positiva), durante as condições de recuperação.

#### 2.8.4 - Resfriamento localizado e cálculo do WCI:

Resfriamento local de alguma parte do corpo, com ênfase às mãos, pés e cabeça, podem produzir desconforto, deterioração da performance manual e física e necrose por frio. Os efeitos desse resfriamento devem ser analisados separadamente para ambientes internos e externos. A exposição à temperaturas muito baixas merecem cuidados e proteções especiais para as mãos e para o trato respiratório.

##### 2.8.4.1 - Condições internas:

A avaliação e atuação sobre o stress térmico local por frio em ambientes internos, deve ser realizado utilizando-se os mesmos critérios que para ambientes moderados, constantes na ISO 7730, sobre o desconforto localizado por correntes de ar.

##### 2.8.4.2 - Condições externas:

Em atividades realizadas em condições externas, o stress térmico localizado deve ser determinado através do cálculo do efeito local do vento, isto é, o cálculo do índice de resfriamento do vento, através da seguinte equação:

$$WCI = (h_c + h_r) \cdot (t_{sk} - t_a) \quad [87]$$

onde, os valores de  $h_c$  e  $h_r$  são aqueles referentes ao segmento local de pele.

## 2.8.5 - Verificação prática de ambientes frios:

- Medição dos parâmetros ambientais de acordo com a ISO 7726: temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade do ar e velocidade do ar
- Determinação da taxa de calor metabólico de acordo com a ISO 8996
- Determinação do isolamento térmico requerido, IREQ, de acordo com a equação 25 apresentada anteriormente ou devido à dificuldade operacional dos cálculos iterativos, através da leitura direta dos gráficos apresentados nas figuras 2.8.1 a 2.8.2 abaixo.
- Determinação do isolamento básico das vestimentas,  $I_{clr}$ , de acordo com a ISO 9920
- Avaliação das condições de balanço térmico, tendo em vista a comparação do IREQ calculado e do isolamento das roupas resultante  $I_{clr}$

$$\text{Se } I_{clr} < IREQ_{min}$$

A roupa selecionada não fornece o isolamento térmico mínimo necessário. Há sério risco de hipotermia com a exposição continuada.

$$\text{Se } IREQ_{min} < I_{clr} < IREQ_{neutro}$$

A vestimenta selecionada fornece suficiente isolamento térmico. As condições térmicas das pessoas é percebida como “levemente frio” ou “neutra”.

$$\text{Se } I_{clr} > IREQ_{neutro}$$

A vestimenta selecionada fornece mais isolamento térmico que o necessário. Há risco de superaquecimento.

- Determinação de tempo de exposição máximo, DLE, e de tempo de recuperação mínimo, RT, os quais podem ser calculados tanto para altos riscos fisiológicos como para baixos riscos fisiológicos.

- A qualquer nível de IREQ, deve ser dada devida atenção ao resfriamento das mãos, pés e face.

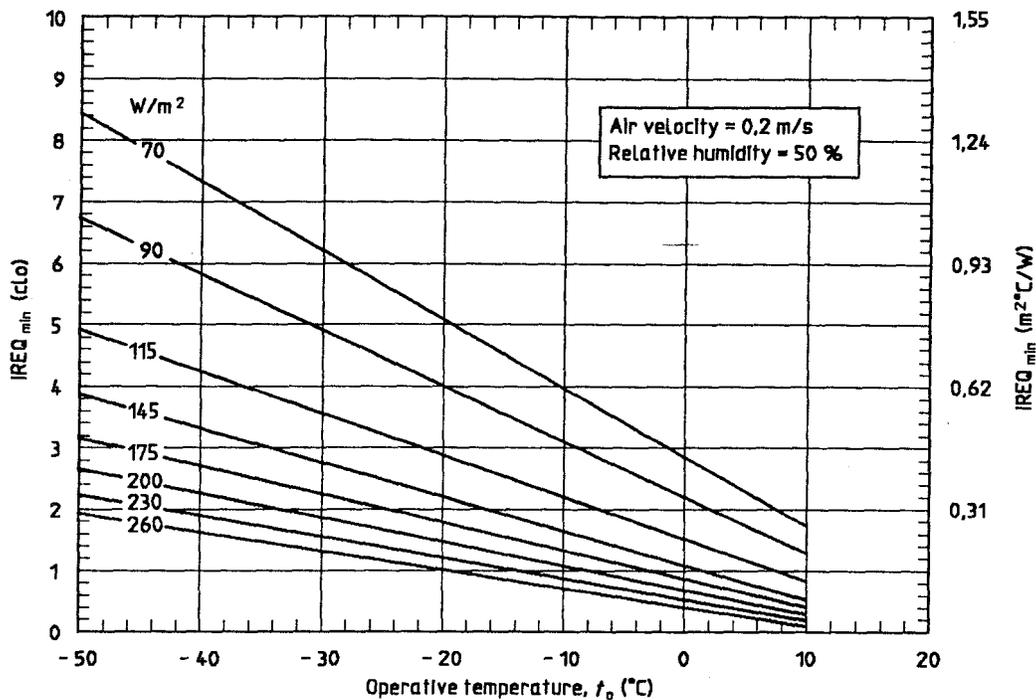


Figura 2.8.1 - IREQ<sub>min</sub> em função da temperatura operativa para 8 tipos de atividade

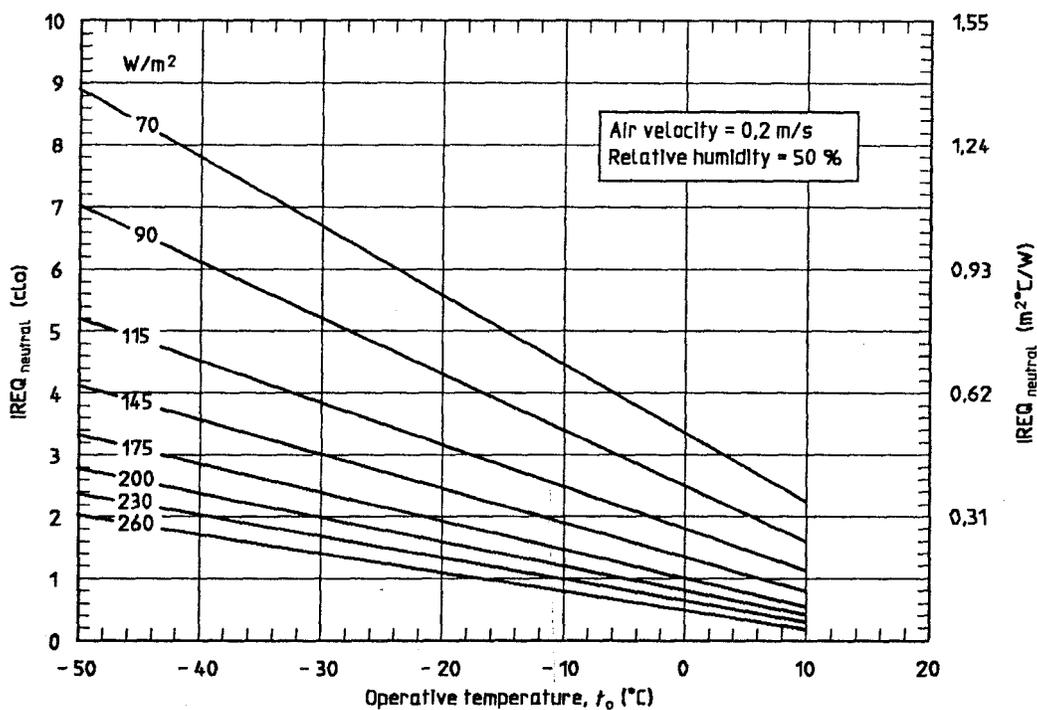


Figura 2.8.2 - IREQ<sub>neutro</sub> em função da temperatura operativa para 8 tipos de atividade

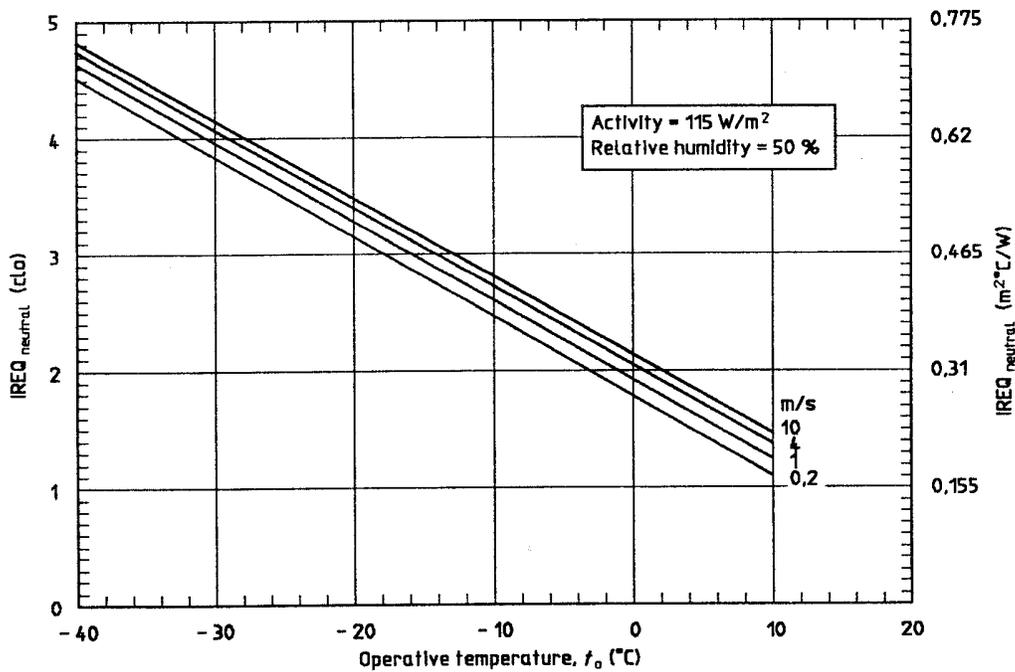


Figura 2.8.3 - Efeito da velocidade do ar sobre o IREQ<sub>neutro</sub>, para a atividade de 115 W/m<sup>2</sup>

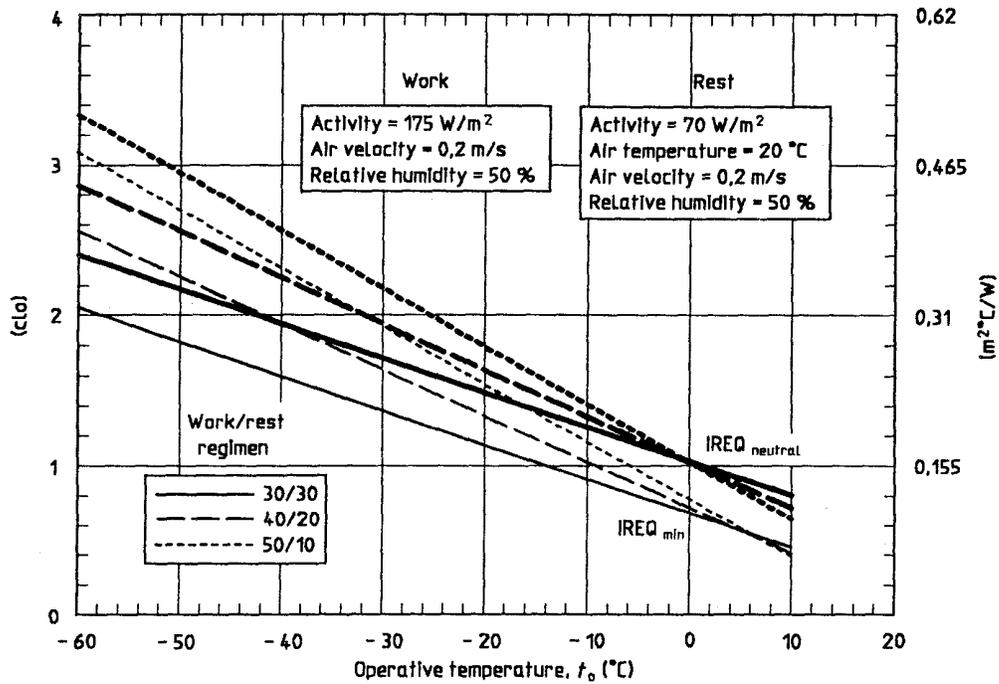


Figura 2.8.4.-  $IREQ_{min}$  e  $IREQ_{neutro}$  médios ponderados para 3 regimes de trabalho/descanso. Trabalho no frio e descanso a  $20^{\circ}C$

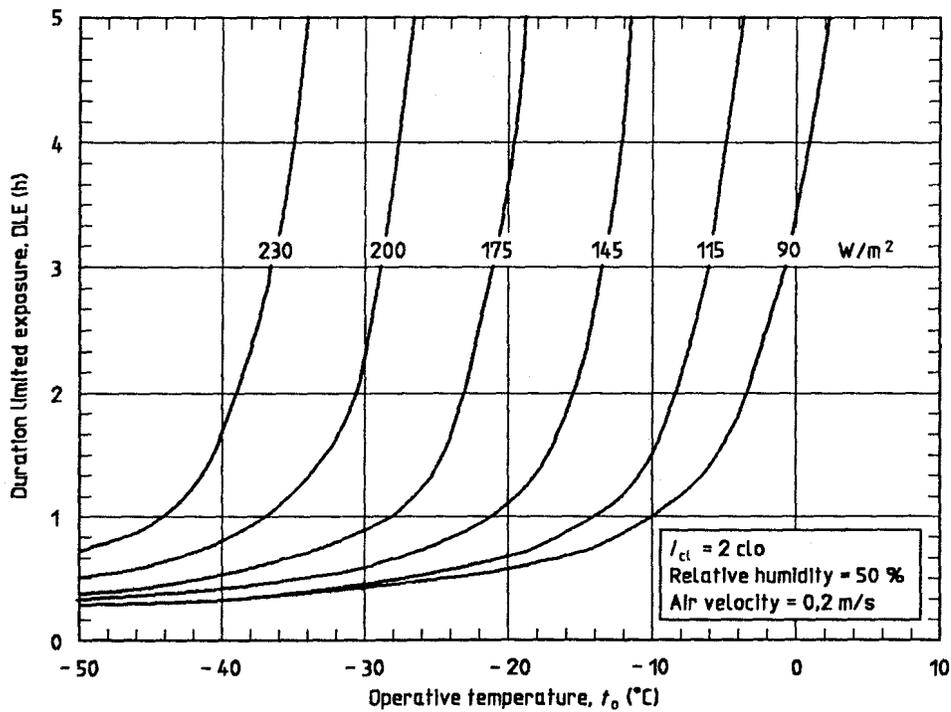


Figura 2.8.5 - Tempo máximo de exposição recomendado, DLE, para altos riscos, para 6 tipos de atividade, quando o valor do isolamento básico das roupas é de  $0,32 m^2 \cdot C/W$ , (2 clo)

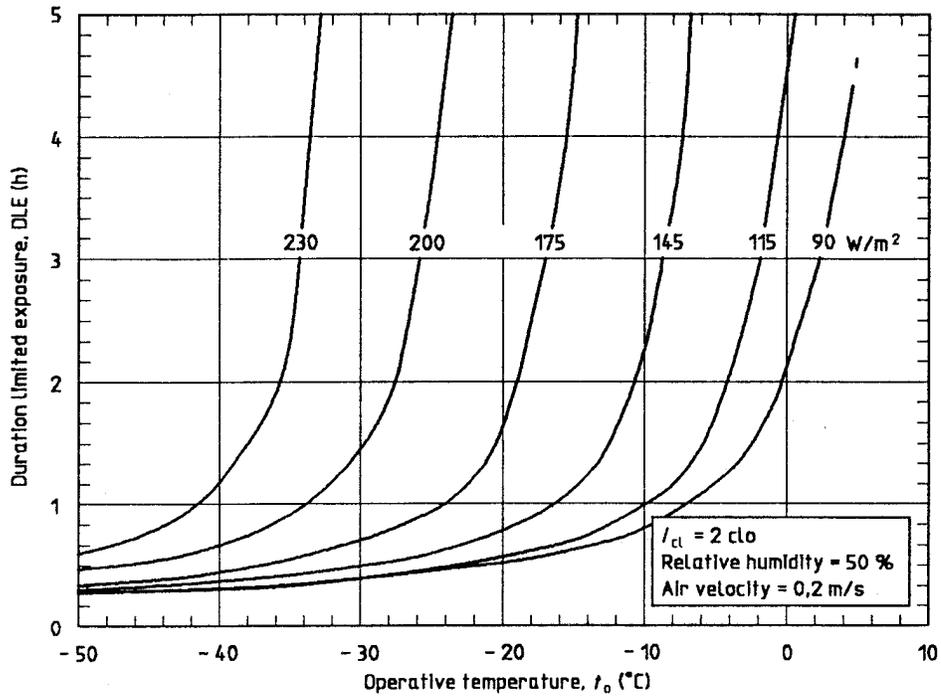


Figura 2.8.6 - Tempo máximo de exposição recomendado, DLE, para baixos riscos, para 6 tipos de atividade, quando o valor do isolamento básico das roupas é de  $0,32 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ , (2 clo)

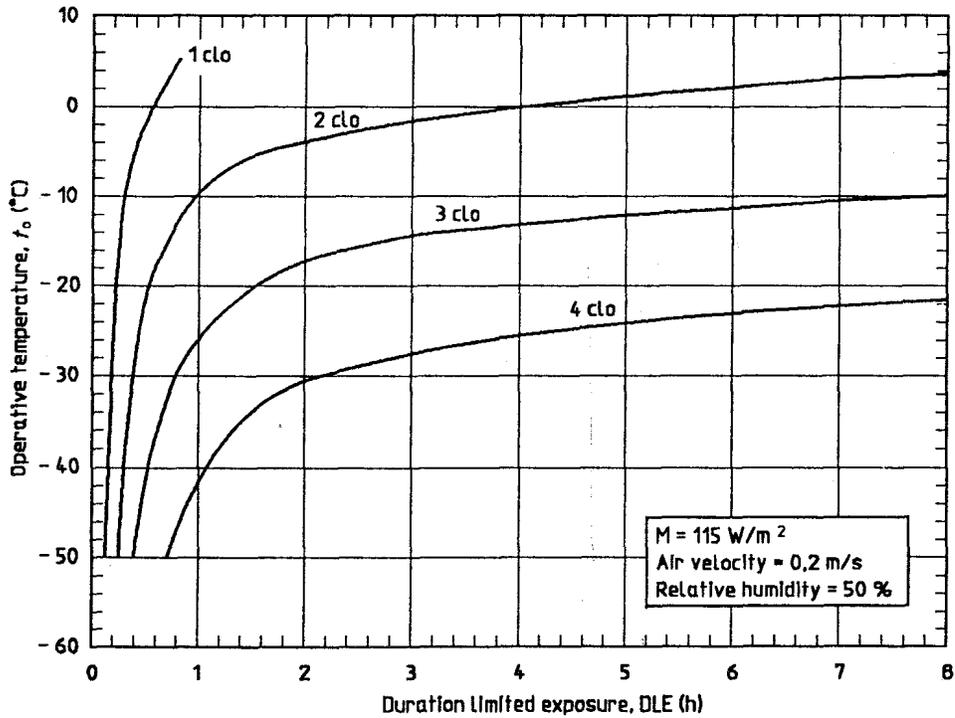


Figura 2.8.7 - Tempo máximo de exposição recomendado, DLE, para 4 níveis de isolamento básico de roupas, para atividade de  $115 \text{ W}/\text{m}^2$

## 2.8.6 - Anexos:

### 2.8.6.1 - ANEXO A - Equações de trocas de calor:

A.1) Trocas de calor sensível e latente pela respiração:

$$C_{res} = 0,0014.M.(t_{ex} - t_a)$$

$$E_{res} = 0,0173.M.(p_{ex} - p_a)$$

$$t_{ex} = 29 + 0,2.t_a$$

A.2) Trocas de calor latente pela pele (evaporação):

$$E = w.(p_{sk,s} - p_a)/R_T$$

onde:

$$R_T = 0,16.(I_a/f_{cl} + I_{clr}), \text{ sendo:}$$

$$I_a = 1/(h_c + h_r)$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,97.I_{clr}$$

e:

$$h_c = 3,5 + 5,2.v_{ar} \quad \text{para } v_{ar} < 1 \text{ m/s}$$

$$h_c = 8,7.v_{ar}^{0,6} \quad \text{para } v_{ar} > 1 \text{ m/s}$$

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58)$$

$$h_r = 4,15.10^{-8} \{[(t_{cl}+273)^4 - (t_{rm}+273)^4]/[(t_{cl}-t_{rm})]\}$$

### 2.8.6.2 - ANEXO B - Critérios fisiológicos em exposições ao frio:

B.1) Resfriamento geral do corpo:

Nível Mínimo: Caracterizado por vaso constricção periférica e ausência de regulação pelo suor.

Nível Neutro: Caracterizado pelo estado de neutralidade térmica do organismo.

O cálculo do  $IREQ_{min}$  sugere que o balanço térmico é mantido com o corpo “levemente resfriado” com relação às condições normais. Se a exposição começa das condições neutras, há um período de resfriamento inicial de 20 a 40 min, onde o calor armazenado na periferia do corpo, pele e extremidades seja reduzido. O equilíbrio térmico é então restabelecido para essas novas condições, com um débito de calor armazenado de  $40W.h/m^2$ . Neste novo nível o balanço térmico é mantido com uma temperatura da pele de  $30^\circ C$ , sem presença de suor. As trocas por evaporação nesse estado são feitas apenas por difusão ( $w=0,06$ ). Este estado do corpo coincide com uma sensação subjetiva de “levemente frio”, e é tolerado para exposições longas. O  $IREQ_{min}$  pode então ser considerado como o mais alto resfriamento aceitável do corpo para exposições prolongadas.

B.2) Resfriamento local:

O resfriamento local, causado por convecção, radiação ou perdas de calor por contato, não deveria resultar em temperaturas das mãos e da pele inferiores a  $15^\circ C$  e  $24^\circ C$  respectivamente. Para temperaturas inferiores a  $-40^\circ C$ , devem ser tomados

cuidados com a proteção dos olhos e do sistema respiratório, particularmente a altos níveis de atividade e com ventos fortes.

B.3) Tempo máximo de exposição:

Quando o valor resultante do isolamento das roupas disponível é inferior ao IREQ, o corpo não pode manter o equilíbrio durante exposições prolongadas. O limite da duração da exposição, DLE, isto é, o tempo para perder 40 W.h/m<sup>2</sup>, deve ser calculado pela equação 5.

Tabela 2.8.1: Critérios fisiológicos para a determinação do IREQ, DLE e resfriamento local.(Tab B.1 ISO)

Tipo de resfriamento	Parâmetro	IREQ <sub>min</sub>	IREQ <sub>neutro</sub>
Geral do corpo	IREQ		
	t <sub>sk,s</sub> (°C)	30	35,7-0,0285.M
	w (adimens)	0,06	0,001.M
Geral do corpo	DLE		
	Q <sub>min</sub> (W.h/m <sup>2</sup> )	-40	-40
Local	Temperatura das mãos (°C)	15	24
	WCI (W/m <sup>2</sup> )	1600	-
	Cuidados olhos e resp. (°C)	t <sub>a</sub> < -40	-

#### 2.8.6.3 - ANEXO C: Isolamento térmico das roupas:

Para a interpretação do IREQ, é sugerido que I<sub>cl</sub> básico, seja reduzido em 20% para a maioria das atividades desenvolvidas em ambientes frios (M > 100 W/m<sup>2</sup>). Isso quer dizer, por exemplo, que um valor de IREQ de 0,37 m<sup>2</sup>.°C/W (2,4 clo), corresponde a um I<sub>cl</sub> de 0,47 m<sup>2</sup>.°C/W (3,0 clo), ou seja, I<sub>cl</sub> = 1,25.IREQ. Para atividades sedentárias, predominantemente com os braços (M < 100 W/m<sup>2</sup>) é recomendado uma redução de 10%.

Os isolamentos térmicos das roupas devem ser retirados das tabelas da ISO 9920.

#### 2.8.6.4 - ANEXO D: Valores para o cálculo do índice de resfriamento de vento:

O índice de resfriamento de vento, WCI, é calculado pela equação:

$$WCI = 1,16.[10,45 + (v_{ar})^{0,5} - v_{ar}].(33 - t_a)$$

Uma interpretação prática do WCI, é a temperatura de resfriamento, t<sub>ch</sub>, a qual pode ser expressa por:

$$t_{ch} = 33 - WCI / 25,5$$

Tabela 2.8.2: Poder de resfriamento do vento sobre a pele exposta, expressa como temperatura de resfriamento,  $t_{ch}$  (tab. D.1 ISO 11079/93)

Velocidade do vento (m/s)	Leitura do termômetro real										
	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
1,8	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
2	-1	-6	-11	-16	-21	-27	-32	-37	-42	-47	-52
3	-4	-10	-15	-21	-27	-32	-38	-44	-49	-55	-60
5	-9	-15	-21	-28	-34	-40	-47	-53	-59	-66	-72
8	-13	-20	-27	-34	-41	-48	-55	-62	-69	-76	-83
11	-16	-23	-31	-38	-46	-53	-60	-68	-75	-83	-90
15	-18	-26	-34	-42	-49	-57	-65	-73	-80	-88	-96
20	-20	-28	-36	-44	-52	-60	-68	-76	-84	-92	-100

Tabela 2.8.3: Índice de resfriamento do vento, WCI, temperatura de resfriamento,  $t_{ch}$  e efeitos sobre a pele exposta. (Tab. D.2 ISO 11079/93)

WCI W/m <sup>2</sup>	$t_{ch}$ °C	Efeito
1200	-14	Muito frio
1400	-22	Extremamente frio
1600	-30	Pele exposta congela dentro de 1 hora
1800	-38	
2000	-45	Pele exposta congela dentro de 1 minuto
2200	-53	
2400	-61	Pele exposta congela dentro de 30 segundos
2600	-69	

### 2.8.7 - Exemplo de aplicação:

Analisar a condição de stress por frio, bem como determinar o isolamento requerido de roupas mínimo e neutro, os isolamentos básicos recomendados para altos riscos de stress e baixos riscos de stress, e os tempos máximos de exposição recomendados para as mesmas condições de riscos, do seguinte posto de trabalho industrial:

$$M = 115 \text{ W/m}^2; t_a = -10^\circ\text{C}; t_{rm} = -10^\circ\text{C}; v_a = 0,2\text{m/s}; UR = 50\%; I_{clr} \text{ (disponível)} = 2,0 \text{ clo}$$

1º Passo: Determinação da temperatura operativa:

Como a temperatura operativa é uma ponderação entre  $t_a$  e  $t_{rm}$ , e as 2 são iguais, logo a temperatura operativa é igual a ambas:

$t_o = -10^\circ\text{C}$
---------------------------

2º Passo: Determinação do  $IREQ_{min}$ :

Pela figura 2.8.1 anterior, com os valores de  $t_o$ ,  $M$ ,  $v_a$  e  $UR$ :

$IREQ_{min} = 2,2 \text{ clo}$
--------------------------------

3º Passo: Determinação do  $IREQ_{neutro}$ :

Pela figura 2.8.2 anterior, com os mesmos dados:

$$\text{IREQ}_{\text{neutro}} = 2,5 \text{ clo}$$

4º Passo: *Determinação do isolamento básico recomendado:*

4.1) Para a situação de alto risco:

Como  $\text{IREQ}_{\text{min}} = 2,2 \text{ clo}$ , e pelo Anexo C da Norma,  $I_{\text{cl}} = 1,25 \cdot \text{IREQ}$

$$I_{\text{cl}} = 2,8 \text{ clo}$$

4.2) Para a situação de baixo risco:

Como  $\text{IREQ}_{\text{neutro}} = 2,5 \text{ clo}$ :

$$I_{\text{cl}} = 3,1 \text{ clo}$$

5º Passo: *Determinação do tempo máximo de exposição recomendado:*

5.1) Para a situação de alto risco:

Pela figura 2.8.5, com  $t_o$ ,  $I_{\text{clr}}$ , UR e  $v_a$ :

$$\text{DLE} = 1,5 \text{ horas}$$

5.2) Para a situação de baixo risco:

Pela figura 2.8.6, com os mesmos parâmetros:

$$\text{DLE} = 1,0 \text{ hora}$$



## ROTEIRO PARA O TRABALHO DE CONFORTO TÉRMICO

O trabalho referente a medições e avaliações de conforto térmico de um ambiente interno, deverá conter no mínimo os seguintes passos:

- 1) Todas as variáveis ambientais deverão ser medidas, ou seja, temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar, pelo menos em dois períodos do dia, um de manhã (no mínimo 1 hora e 20 minutos) e um à tarde (no mínimo 1 hora e 20 minutos), com registros de medições a cada 5 minutos.
- 2) O ambiente a ser escolhido pelo aluno ou grupo de no máximo 2 alunos, deverão conter no mínimo 5 pessoas em seu interior, para que se possa aplicar o questionário de avaliação subjetiva.
- 3) O isolamento térmico das vestimentas das pessoas, deverão ser determinadas de acordo com a ASHRAE Fundamentals, cap. 8 – THERMAL COMFORT
- 4) O valor da taxa metabólica também deverá ser estimado de acordo com a ASHRAE, sendo que a atividade deve ser bem detalhada no relatório final.
- 5) As medições deverão seguir rigorosamente os preceitos da ISO/DIS 7726, no que diz respeito a todas as variáveis ambientais.
- 6) É imprescindível a verificação da homogeneidade do ambiente, cujos resultados deverão constar do relatório final;
- 7) O PMV e PPD deverão ser calculados segundo equação da ISO 7730 (1994), podendo também ser utilizado algum software que esteja disponível, como Analysis, Thermal Comfort, ou algum outro, sendo que a indicação da determinação deve constar do relatório;
- 8) Todos os resultados referentes às medições de variáveis ambientais e de PMV e PPD deverão ser apresentados de forma analítica (tabelas) e gráficas.
- 9) Para efeito de ser verificado que as medições não apresentaram erros, deverão ser apresentados os resultados de normalidade das variáveis medidas, exceto com relação à velocidade do ar;
- 10) O PMV e o PPD, também devem ser calculados, levando-se em consideração todas as imprecisões das medições, conforme norma ISO 7726;
- 11) Deverá ser comparado os resultados analíticos do conforto (PMV) com as sensações relatadas pelas pessoas, a fim de se verificar a aplicabilidade do modelo normalizado;
- 12) As características do ambiente analisado deverão constar do relatório final;
- 13) As sensações térmicas e preferências térmicas das pessoas pesquisadas deverão ser obtidas por questionários como o apresentado em anexo, sendo que deverão ser coletados os dados a cada 20 minutos após o início das medições;
- 14) Todas as conclusões a respeito das medições, análises e avaliação do ambiente, serão de responsabilidade do aluno ou grupo, devendo fazer parte integrante do relatório final a ser avaliado.

## AVALIAÇÃO DE CONFORTO E ACEITABILIDADE TÉRMICA

Avaliação das condições, sensações e aceitabilidade dos ambientes:

O preenchimento dessas tabelas tem a função da avaliação da situação de conforto térmico através do julgamento subjetivo. As respectivas análises e comparações dessa avaliação com os dados ambientais coletados pelos equipamentos servirão de valiosos subsídios para a análise térmica dos ambientes da edificação.

Os quesitos nº 3, 4 e 5 devem ser devidamente anotados a cada horário marcado. Os quesitos de nº 1, 2, devem ser anotados apenas uma vez, quando do primeiro horário de anotação. No caso de ter havido mudanças nas vestimentas entre um horário de anotação e outro, favor apontar após a tabela do quesito 2.

### Quesito 1) Dados do respondente:

Idade:..... Altura:..... Peso:..... Sexo:..... Data:.....

### Quesito 2) Marque as vestimentas que está utilizando:

(Tabela conforme ISO 9920/95)

Roupas de baixo e Acessórios		Blusa leve fina, manga curta	
Sapato com sola fina		Camiseta	
Sapato com sola grossa		Calças	
Botinas		Calça curta (bermuda)	
Meia soquete fina		Calça tecido fino	
Meia soquete grossa		Calça jeans	
Meia até o joelho		Calça grossa, de lã ou flanela	
Meia de nylon longa fina		Vestidos e Saias	
Meia calça com pernas longas		Saia leve, de verão	
Meia calça com pernas curtas		Saia pesada, de inverno	
Cueca		Vestido de verão, mangas curtas	
Calcinha		Vestido de inverno, manga longa	
Soutien		Vestido completo, fechado	
Camiseta de baixo		Casacos e Suéteres	
Camiseta de baixo manga longa		Colete sem mangas fino	
Gravata		Colete sem mangas grosso	
Camisas e Blusas		Suéter manga longa fino	
Camisa de manga curta		Suéter manga longa grosso	
Camisa manga longa tecido fino		Jaqueta leve	
Camisa manga longa normal		Jaqueta/japona, normal	
Camisa de flanela ou moletom		Paletó	
Blusa leve fina, manga longa		Paletó de verão, blazer	

Houve alguma mudança de vestimentas entre um horário e outro? Qual?

**Quesito 3) Tabela de percepção (ISO 10551/95)**  
*“Com relação a sua sensação térmica, como você está se sentindo nesse momento?”*

Com muito calor				
Com calor				
Levemente com calor				
Neutro				
Levemente com frio				
Com frio				
Com muito frio				

**Quesito 4) Tabela de avaliação (ISO 10551/95)**  
*“De que maneira você se encontra nesse momento?”*

Confortável				
Levem. desconfortável				
Desconfortável				
Muito desconfortável				

**Quesito 5) Tabela de preferências térmicas (ISO 10551/95)**  
*“Como você preferia estar se sentindo agora?”*

Bem mais aquecido				
Mais aquecido				
Um pouco mais aquecido				
Assim mesmo				
Um pouco mais resfriado				
Mais resfriado				
Bem mais resfriado				