



PROCEDIMENTOS DE QUANTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA ANÁLISE TERMO-FISIOLÓGICA EM ESPAÇOS ABERTOS

Leonardo Marques Monteiro (1); Marcia Peinado Alucci (2)

Departamento de Tecnologia, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil, tel: 55 11 3091-4538 r.214, fax: 55 11 3091-4539,
e-mail: (1) leo.mm@uol.com.br (2) marcialu@usp.br

RESUMO

Este artigo apresenta os procedimentos realizados para a quantificação das variáveis ambientais (temperatura do ar, pressão parcial de vapor, velocidade do ar e temperatura radiante média), individuais (metabolismo, trabalho mecânico, isolamento térmico e resistência evaporativa da roupa) e subjetivas (percepção e preferência de sensação térmica) para avaliação de resultados de modelos preditivos de conforto térmico em espaços abertos. São considerados desde os preparativos para levantamento de campo até o tratamento dos dados obtidos, segundo normas internacionais e trabalhos relevantes na área. A contribuição deste artigo é fornecer um método para a determinação das variáveis envolvidas na análise termo-fisiológica de conforto e estresse em espaços abertos, fornecendo embasamento para pesquisas futuras.

ABSTRACT

This paper presents the procedures taken for determining the environmental physical quantities (air temperature, vapor pressure, air speed and mean radiant temperature), individual characteristics (metabolism, external work, thermal insulation and evaporative resistance of clothing) and subjective answers (thermal sensation perception and preference) to assessment of outdoor thermal comfort predictive models results. Since field research preparation until data treatment are considered, following international standards and relevant scientific works. This paper's contribution is a method for determining outdoor thermal comfort and stress quantities, helping future researches in the area.

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos que serão apresentados foram elaborados para a realização de pesquisa de conforto térmico em espaços abertos que tem como objetivo avaliar resultados fornecidos por modelos preditivos. Apresentar-se-á inicialmente a organização geral dos levantamentos de campo realizados. Em seguida, serão considerados os procedimentos para determinação de cada uma das variáveis ambientais (temperatura do ar, pressão parcial de vapor, velocidade do ar e temperatura radiante média), individuais (metabolismo, trabalho mecânico, isolamento térmico e resistência evaporativa da roupa) e subjetivas (percepção e preferência de sensação térmica). Este artigo foca os procedimentos realizados, desde o levantamento em campo até o tratamento dos dados obtidos. A comparação destes com os resultados de modelos preditivos baseados em balanço termo-fisiológico será objeto de publicação futura.

2. LEVANTAMENTO DE CAMPO

Para os levantamentos em campo, definiu-se o seguinte procedimento. Foram estabelecidas três bases para determinação das diversas variáveis: uma primeira a céu aberto, uma segunda sob copa de árvores e uma terceira sob cobertura têxtil tensionada. Uma base, a 10m de altura, foi estabelecida para referenciar as variáveis ambientais, situando-se espacialmente entre as três bases citadas. No total, cento e cinquenta pessoas foram entrevistadas em cada uma das três bases, em seis horários diferentes.

A execução operacional dos levantamentos foi realizada da seguinte maneira. Estabeleceram-se dois grupos de setenta e cinco pessoas. Realizaram-se os procedimentos com o primeiro grupo nos três primeiros horários, repetindo-se os procedimentos com o segundo grupo nos três horários seguintes. Cada grupo foi subdividido em três, cada um de vinte e cinco integrantes. Cada subgrupo dirigiu-se a uma base. Na primeira base, todas as pessoas receberam etiquetas identificadoras (A01-A25, B01-B25, C01-C25), responderam um questionário para verificação de características gerais (sexo, idade, peso, altura) e aclimação (locais onde já viveu e por quanto tempo) e foram fotografadas (em grupos de cinco) para posterior identificação da vestimenta. Após esses procedimentos iniciais, todos ficaram vinte minutos expostos às condições ambientais locais, para em seguida receberem um questionário de percepção e preferência de sensação térmica. Neste questionário, perguntou-se também se alguma peça de roupa foi alterada desde o momento do registro fotográfico. Depois de respondidos, os questionários foram recolhidos e cada grupo se dirigiu à próxima base, onde permaneceram por mais vinte minutos, realizando o mesmo procedimento até terem passado pelas três bases. O segundo grupo de setenta e cinco pessoas passou pelos mesmos procedimentos, trocando de bases em sentido inverso ao do primeiro grupo. Os levantamentos foram realizados para dias de verão e de inverno.

Os equipamentos utilizados em cada base serão aqui sucintamente descritos. Na base a céu aberto, foi utilizada uma estação meteorológica marca ELE modelo EMS com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento modelo e piranômetro Eppley, registrando-se os dados em data logger marca ELE modelo MM900 EE 475-016. Na base sob cobertura arbórea utilizou-se estação meteorológica Huger Eletronics modelo GmbH WM918, com sensores de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, armazenando-se os dados diretamente em microcomputador portátil. Na base sob cobertura têxtil tensionada utilizou-se estação Innova 7301, com módulo de conforto (sensores de temperatura, umidade e velocidade do ar) e de estresse térmico (do qual se utilizou o termômetro de globo) registrando-se os dados em data logger de conforto térmico da mesma marca, modelo 1221. Na base a 10m de altura utilizou-se estação meteorológica semelhante (modelo GmbH WM921) à da base sob copas de árvores, enviando-se os dados para microcomputador portátil através de ondas de rádio. Os registros realizados pelos equipamentos se deram em intervalos de um minuto.

Em cada uma das três bases, foi montado um set com dois termômetros de globo. Os globos de latão utilizados apresentam diâmetro de 17 cm. Em cada set, pintou-se um globo de preto fosco e outro de cinza médio fosco. Os termômetros utilizados em cada globo são de mercúrio. A leitura e o registro dos dados deram-se a cada dez minutos. Dada o grande número de pessoas mobilizadas para o levantamento de campo em questão, decidiu-se pela realização de medições extras das variáveis ambientais caso houvesse algum problema com o registro eletrônico em curso. Assim montou-se um set com um termohigrômetro marca Homis modelo 229 e um set com quatro anemômetros marca Homis modelo 209 em cada uma das bases. Os dados de temperatura e umidade do ar foram registrados a cada dez minutos. Os dados de velocidade do ar foram registrados de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos. A seguir, serão discutidos os procedimentos para as variáveis consideradas.

3. VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Segundo a Norma ISO 7726 (1998), as especificações dos instrumentos para determinação de quantidades físicas do ambiente dividem-se em duas classes: tipo C (conforto), para ambientes moderados; e tipo S (estresse), para ambientes onde há risco de estresse térmico. As especificações referentes à faixa de medição e precisão são apresentadas na Tabela 1. O tempo de resposta do sensor depende da massa, da área superficial, da presença de protetor e das características do ambiente (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica). As condições ambientais padrão para a determinação das constantes de tempos para os sensores de medição são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Características requerida e desejável dos instrumentos (adaptada de ISO 7726, 1998)

Variáveis	Faixa para Conforto	Precisão para conforto	Faixa para estresse	Precisão para estresse
Temperatura do ar (tar)	10–40 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–120 °C	Requerida: $\pm 0,5$ °C (0-50°C) Desejada: $\pm 0,25$ °C (0-50°C)
Temperatura radiante (trm)	10–40 °C	Requerida: ± 2 °C Desejada: $\pm 0,2$ °C	-40–150 °C	Requerida: ± 5 °C (0-50°C) Desejada: ± 5 °C (0-50°C)
Velocidade do ar (var)	0,05–1,0 m/s	Requerida: $\pm [0,05 + 0,05v]$ Desejada: $\pm [0,02 + 0,07v]$	0,2–20 m/s	Requerida: $\pm [0,1 + 0,05v]$ Desejada: $\pm [0,05 + 0,05v]$
Umidade absoluta (par)	0,5–3,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ tar-trm < 10^\circ C$)	0,5–6,0 kPa	$\pm 0,15$ kPa ($ tar-trm < 20^\circ C$)

Tabela 2: Condições ambientais de referência para a determinação das constantes de tempo dos sensores de medição (ISO 7726, 1998)

Medição do tempo de resposta dos sensores de	tar	trm	par	var
Temperatura do ar (tar)	-	$\approx tar$	qualquer	$< 0,25$ m/s
Temperatura radiante média (trm)	$\approx tar$	-	qualquer	$< 0,25$ m/s
Umidade absoluta (par)	≈ 20 °C	$\approx tar$	-	depende do método
Velocidade do ar (var)	≈ 20 °C	$\approx tar$	qualquer	-

Os métodos de medições devem levar em consideração a homogeneidade e a heterogeneidade das variáveis medidas. Deve-se também levar em consideração o caráter estacionário e variacional do tempo das grandezas medidas. Para o critério de conforto, diz-se que um ambiente é homogêneo se verificado uma diferença, para cada medição com relação à média de todas as medições, de no máximo 3 vezes o valor da precisão requerida para temperatura do ar e de no máximo 2 vezes para as demais variáveis. Para o critério de estresse, admite-se no máximo 4 vezes para temperatura do ar, 3 vezes para temperatura radiante média e 2 vezes para as demais variáveis. Precisão requerida das medidas feitas em relação à média. O caráter estacionário e variacional é avaliado de maneira análoga. Quando o ambiente é muito heterogêneo, as quantidades físicas devem ser medidas em diversos pontos, levando em conta os resultados parciais obtidos para determinar o valor médio das quantidades a serem consideradas na avaliação do conforto ou do estresse térmico. A tabela 3 apresenta as posições a serem usadas na medição das quantidades físicas e os coeficientes de ponderação a serem usados no cálculo do valor médio destas quantidades.

Tabela 3: Altura de medição para as variáveis do ambiente (ISO 7726, 1998).

	Coeficiente de Ponderação				Altura recomendada	
	Ambiente Homogêneo		Ambiente Heterogêneo			
Posição	Classe C	Classe S	Classe C	Classe S	Sentado	De pé
Cabeça			1	1	1,1 m	1,7 m
Abdômen	1	1	1	2	0,6 m	1,1 m
Calcanhar			1	1	0,1 m	0,1 m

Com base nos resultados do pré-teste realizado anteriormente ao levantamento, considerou-se que os ambientes eram homogêneos, ainda que para as variáveis temperatura radiante média e velocidade do ar tenham sido encontrados, nas medições realizadas a 0,1m, alguns desvios ligeiramente maiores do que o especificado pela norma. Assim, no levantamento propriamente dito, realizaram-se medições apenas a 1,1 m de altura (a aplicação dos questionários de avaliação subjetiva deu-se com as pessoas paradas e de pé).

3.1 Temperatura do ar

A temperatura do ar que envolve o corpo humano é um parâmetro básico que pode ser medido por vários métodos, dependendo do sensor utilizado. Podemos aqui exemplificar: termômetro de mercúrio, resistência de platina e termopar. Entretanto a temperatura do sensor pode diferir da temperatura do

meio devido a efeitos radiativos. Assim deve-se proteger o sensor da radiação sem comprometer a circulação de ar ao seu redor. A norma ISO 7726 (1998) aconselha três providências para diminuir o efeito da radiação: reduzir o fator de emissão do sensor, polindo-o quando for metálico ou utilizando tinta reflexiva quando não for; reduzir a diferença de temperatura entre o sensor e o meio circundante através da distribuição de superfícies refletivas com espessura de 0,1 a 0,2 mm; aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção, aumentando mecanicamente a velocidade do ar em torno do sensor e/ou reduzindo o tamanho do sensor.

No levantamento em questão, os sensores utilizados para determinação da temperatura do ar são do tipo semicondutor. A faixa de leitura é de -20 °C a +60 °C, com resolução de 0,1 °C, precisão de ± 0,4 °C e tempo de resposta de 0,1 °C/s.

3.2 Pressão parcial de vapor

O ar úmido é uma mistura de vários gases que podem ser divididos em dois grupos: os gases que compõem o ar seco (oxigênio, nitrogênio, etc.) e o vapor de água. A umidade absoluta do ar caracteriza a quantidade de vapor d'água contida num dado volume de ar a uma certa temperatura e é freqüentemente expressa na forma de pressão parcial de vapor. Os instrumentos comumente utilizados na determinação da umidade do ar podem ser classificados como *psicrômetro*: resfriamento de um termômetro de bulbo úmido por evaporação através de corrente de ar forçada; *higrômetros de ponto de orvalho*: através da condensação do vapor de água contido no ar em um espelho resfriado ao ponto de orvalho da mistura; *higrômetro de absorção* (fio de cabelo): deformação de material orgânico causado pela tensão superficial da água nos poros do material, determinando a umidade relativa (deve ser calibrado freqüentemente); *higrômetros de variação de condutibilidade elétrica*: *higrômetro a cloreto de lítio*: determina a umidade absoluta medindo a variação na temperatura devida à variação na condutibilidade elétrica do sensor; *higrômetro de capacitância*: determina a umidade relativa medindo a variação na capacidade elétrica do sensor.

No levantamento realizado, os sensores para determinação de umidade são de capacitância, obtendo-se a umidade relativa. A faixa de leitura é de 10% a 95%, com resolução de 0,1%, precisão de ± 3% (a 25 °C, entre 30% e 95%) e ± 5% (a 25 °C, entre 10% e 30%) e tempo de resposta de 3 minutos para mudança de 45% a 95% e de 5 minutos para o inverso. A partir da umidade relativa e da temperatura do ar, obtém-se a pressão parcial de vapor, seguindo os conceitos doravante apresentados. Conforme já colocado, a umidade absoluta caracteriza a quantidade de vapor d'água no ar e pode ser expressa por:

$$\omega_{ar} = m_v / m_{ar} \quad [Eq.01]$$

onde: ω_{ar} = umidade absoluta, em kg de água / kg de ar seco; m_v = massa do vapor de água, em kg; m_{ar} = massa do ar seco, em kg

A umidade relativa caracteriza a quantidade de vapor d'água no ar em relação à máxima quantidade que pode ser mantida, numa dada temperatura:

$$ur = 100 \cdot p_v / p_{v,s} \quad [Eq.02]$$

onde: ur = umidade relativa, em %; p_v = pressão parcial do vapor de água, em kPa; $p_{v,s}$ = pressão de saturação do vapor de água, em kPa.

A pressão parcial de vapor de água (p_v) do ar úmido é a pressão que o vapor exerceria se sozinho ocupasse o volume ocupado pelo ar úmido na mesma temperatura. Considerando gás perfeito, tem-se:

$$p_v = [(p_{atm} / 0,622) / \omega_{ar}] + 1 \quad [Eq.03]$$

onde: p_{atm} = pressão atmosférica total, em kPa.

Para a determinação da pressão de saturação de vapor de água, utiliza-se:

$$p_{v,s} = 0,611 \cdot \exp [17,27 \cdot t_a / (t_a + 237,3)] \quad [Eq.04]$$

onde: t_a = temperatura do ar, em °C.

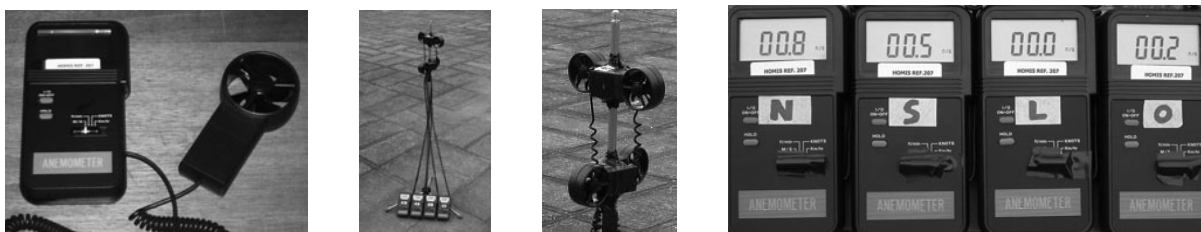
Considerando-se os conceitos anteriores, e especificamente as equações 2 e 4, pode-se determinar a pressão parcial de vapor a partir de valores de umidade relativa e de temperatura do ar:

$$p_v = 6,11 \cdot 10^{-3} \cdot ur \cdot \exp [17,27 \cdot t_a / (t_a + 237,3)] \quad [\text{Eq.05}]$$

3.3 Velocidade do ar

A velocidade do ar é uma variável descrita por sua magnitude e direção/sentido. Os instrumentos comumente utilizados para aferi-la são os anemômetros de copo, de hélice, de fio quente, de esfera quente, ultrasônico e laser-doppler. A norma 7726 (1998) aponta para a necessidade da consideração da direção do fluxo e da flutuação da velocidade e da obtenção da velocidade média e desvio padrão durante um certo período de tempo. Abaixo são descritos os procedimentos adotados no levantamento de campo e o tratamento dos dados obtidos para satisfazer as indicações da norma.

Cada um dos três sets de anemômetros empregados utilizou quatro sensores de hélice. Estes sensores apresentam faixa de leitura de 0,4 a 30,0m/s, com resolução de 0,1m/s, e precisão de $\pm 2\%+d$. As estações meteorológicas utilizadas, possuem sensores de velocidade do ar compostos por copo (magnitude) e pá (direção/sentido), apresentando faixa de leitura de 0,3 a 30,0m/s, resolução de 0,1m/s, e precisão de $\pm 2\%+d$. O registro dos dados das estações meteorológicas foi realizado a cada minuto, considerando-se a média das leituras realizadas a cada segundo, obtendo-se o valor médio da velocidade no minuto e o desvio padrão. O registro dos dados dos sets se realizou de cinco em cinco segundos durante um minuto, a cada dez minutos. Como os sensores de hélice utilizados (Figura 1) são direcionais e com sentido determinado, foram empregados quatro sensores, orientados para norte, sul, leste e oeste (Figuras 2 e 3). Os sensores registram corretamente a magnitude da velocidade do ar na direção e sentido corretos, sendo que o sensor na direção correta e sentido oposto realiza uma leitura abaixo do real, devido à aerodinâmica da hélice. Desta forma, para a anotação dos dados, considerou-se apenas o maior valor encontrado entre as leituras de norte e sul e entre as leituras de leste e oeste, indicando ainda quais foram as direções e sentidos dominantes. As figuras a seguir ilustram estes procedimentos.



Figuras 1, 2, 3 e 4: anemômetro de hélice, set montado, detalhe do set, detalhe das leituras.

No exemplo da figura 4, seriam anotados, como medida instantânea, os valores N 0,8m/s e O 0,2m/s. Para obtenção dos resultados instantâneos vetoriais, aplica-se a lei dos co-senos após o cálculo da resultante numérica:

$$v_{ar,i} = (v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2)^{1/2} \quad [\text{Eq.06}]$$

onde: $v_{ar,i}$ = velocidade instantânea do ar, em m/s; $v_{x,i}$ = velocidade instantânea do ar na direção leste-oeste, em m/s; e $v_{y,i}$ = velocidade instantânea do ar na direção norte-sul, em m/s.

A velocidade do ar (v_{ar}) a ser considerada é a média aritmética das velocidades instantâneas obtidos de cinco em cinco segundos ao longo de um minuto. Para considerar a flutuação da velocidade, determina-se o desvio padrão da amostra:

$$dp = [1/(n-1)]^{1/2} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{ar,i} - v_{ar})^2 \quad [\text{Eq.07}]$$

onde: dp = desvio padrão; n = número de medições instantâneas, com Σ de $i = 1$ até $i = n$

O cálculo da intensidade da turbulência (i_t), em porcentagem, é dado por:

$$i_t = 100 \cdot dp/v_{ar} \quad [\text{Eq.08}]$$

3.4 Temperatura radiante média

A temperatura radiante média é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação do corpo humano é igual à troca de calor por radiação num ambiente real não uniforme. Pode ser calculada através procedimentos baseados em termômetro de globo, em radiômetro de 2 esferas, em sensor com temperatura constante ou através da temperatura superficial e fatores de ângulo.

No levantamento em questão, utilizou-se o procedimento baseado em termômetro de globo, o qual requer ainda a temperatura e velocidade do ar para determinação da temperatura radiante média. Utilizou-se em cada base dois globos de 17 cm de diâmetro, um preto fosco e outro cinza médio fosco, com emissividade próxima a 0,95. Para a determinação da temperatura do ar no interior dos globos foram empregados termômetros de mercúrio.

A norma ISO 7726 (1998) alerta para a utilização da cor cinza médio quando o globo for exposto ao sol, dada a sua absorção de radiação térmica de onda curta semelhante à das pessoas normalmente vestidas. Optou-se por utilizar os dois globos simultaneamente para posterior comparação de resultados, uma vez que se tem observado, nas pesquisas na área, o emprego do globo preto, apesar da sobre estimação da temperatura de globo causada pela maior absorção de radiação de onda curta. Para o cálculo da temperatura radiante média, realiza-se o balanço das trocas térmicas entre o globo e o ambiente em questão. Como resultado, têm-se as seguintes formulações, respectivamente para convecção natural e convecção forçada:

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 + [(0,25 \cdot 10^8)/\epsilon_g] \cdot (|t_g - t_{ar}| / D)^{1/4} \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad [\text{Eq.09}]$$

$$t_{rm} = \{(t_g + 273)^4 - [(1,1 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6}) / (\epsilon_g \cdot D^{0,4})] \cdot (t_g - t_{ar})\}^{1/4} - 273 \quad [\text{Eq.10}]$$

onde: t_{rm} = temperatura radiante média, em °C; t_g = temperatura de globo, em °C; ϵ_g = emissividade do globo, adimensional; D = diâmetro do globo; v_{ar} = velocidade do ar, em m/s.

O tempo de resposta de um termômetro de globo é, segundo a norma referida, de aproximadamente 20 a 30 minutos, dependendo das características do globo e do ambiente em avaliação. Vale ainda ressaltar que os dados obtidos com a utilização de globos são aproximações, devido à diferença entre a forma de uma pessoa e a do globo. Para melhores resultados, deveriam ser empregados elipsóides com áreas de projeção de 0,08, 0,28 e 0,28. O elipsóide é utilizado na vertical para considerar a pessoa em pé, inclinado a 30° para a pessoa sentada, e na horizontal para a pessoa deitada.

4. VARIÁVEIS INDIVIDUAIS

4.1 Metabolismo e trabalho mecânico

A taxa metabólica é o resultado da conversão de energia química em mecânica e térmica. O metabolismo a que aqui se refere diz respeito ao fluxo de calor liberado em função dos processos metabólicos. Parte da energia metabólica produzida pelo corpo pode ainda ser gasta com trabalho mecânico realizado pelos músculos. Assim, pode-se estabelecer a definição de eficiência mecânica (η) através da razão entre trabalho mecânico (W) e taxa metabólica (M).

$$\eta = W / M \quad [\text{Eq.11}]$$

A tabela 4 apresenta diversos valores de taxa metabólica e de eficiência mecânica de interesse para situações em espaços abertos.

Tabela 4: Taxa metabólica e eficiência mecânica

Atividade	Velocidade (km/h)	Inclinação do plano (%)	Velocidade relativa (m/s)	Taxa metabólica (W/m ²)	Eficiência mecânica
Deitado	0	-	-	41	0
Sentado	0	-	-	58	0
Em pé, relaxado	0	-	-	70	0
Andando	3,2	0	0,9	116	0
	4,0	0	1,1	140	0
	4,8	0	1,3	151	0
	5,6	0	1,6	186	0
	6,4	0	1,8	221	0
	8,0	0	2,2	337	0
	1,6	5	0,6	140	0,07
	3,2	5	0,9	174	0,10
	4,8	5	1,3	233	0,11
	6,4	5	1,8	355	0,10
	1,6	15	0,4	169	0,15
	3,2	15	0,9	268	0,19
	4,8	15	1,3	291	0,19
	1,6	25	0,4	209	0,20
	3,2	25	0,9	390	0,21

Observando-se a tabela em questão, pode-se afirmar que em situações gerais a eficiência mecânica é desprezível, podendo-se adotar um valor igual a zero. Apenas quando houver esforços físicos mecânicos maiores, como é o caso de atividades onde se tem um aumento da energia potencial, é que o valor da eficiência mecânica passa a ser considerado.

Nos casos em que for necessária maior precisão na determinação da produção metabólica, pode-se recorrer à norma internacional ISO 8996 (1990), que trata especificamente do assunto. Esta norma propõe três níveis de precisão na determinação da taxa metabólica e diferentes métodos para obtê-la. No primeiro nível, que oferece baixa precisão, apresenta (a) classificação de acordo com atividade e (b) classificação de acordo com a ocupação. O segundo nível, segundo a norma, oferece precisão de $\pm 15\%$ e apresenta métodos de (a) avaliação de taxas de grupos específicos, (b) estimativas de atividades específicas e (c) taxa cardíaca em condições definidas. O terceiro nível, segundo a norma, oferece precisão de $\pm 5\%$ e realiza-se através de medição de taxa de consumo de oxigênio. Os métodos Ia, Ib, IIa e IIb apresentam valores tabelados, os quais podem ser consultados nos anexos da norma em questão. O método IIc será aqui apresentado, devido à facilidade de sua utilização. Para estimar o metabolismo a partir da taxa cardíaca, é necessário que a atividade que esteja sendo realizada exija esforço físico considerável da maior parte dos grandes músculos corporais, fazendo com que a taxa metabólica devida à carga muscular estática seja pequena. As taxas metabólicas devidas à carga mental e ao esforço térmico também devem ser desprezíveis. Dentro deste contexto, este método apresenta precisão bem superior aos métodos que utilizam valores tabelados. Apresenta ainda a vantagem de um sistema de medição bem mais simples do que o método de medição de consumo de oxigênio. A equação a seguir foi obtida através da regressão de dados medidos:

$$M = M_B + (HR - HR_0) / R_M \quad [\text{Eq.12}]$$

onde: M = metabolismo, em W/m²; M_B = metabolismo basal, em W/m²; HR = taxa cardíaca, em bpm; HR₀ = taxa cardíaca em descanso, posição pronada e neutralidade térmica, em bpm; R_M = aumento da taxa cardíaca por unidade da taxa metabólica, em bpm m²/W.

A linearidade da equação se mantém para: HR > 120 bpm (porque acima deste valor o componente mental pode ser desprezado) e para 20 bpm abaixo da taxa cardíaca máxima (a qual pode ser estimada através do valor 200 menos a idade do indivíduo). Acima deste valor, o aumento da taxa cardíaca tende a desaparecer. A referida norma propõe também, ainda que com perda de precisão, uma simplificação no procedimento de medição, através da simplificação da equação anterior:

$$M = 4 \cdot HR - 255 \quad [\text{Eq.13}]$$

No levantamento realizado, as pessoas ficavam em pé vinte minutos em cada base antes de responder o questionário. Assim, adotou-se taxa metabólica de 70W/m² e eficiência mecânica nula.

4.2 Isolamento térmico e resistência evaporativa da roupa

As características térmicas da roupa podem ser descritas através de seu isolamento térmico, ou resistência à troca de calor sensível, e sua resistência evaporativa. A norma internacional ISO 9920 (1995) trata especificamente da estimativa destas variáveis, discutindo ainda a influência da movimentação do corpo e da penetração de ar em seus valores resultantes. A resistência sensível da roupa é tradicionalmente apresentada na unidade *clo*, tal que $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{C/W}$. Outra grandeza relacionada é o fator de incremento de área pela roupa (f_{cl}), que é definido como a razão entre a área do corpo vestido (incluindo-se as partes não vestidas) sobre a área do corpo nu. As tabelas 5 e 6 apresentam compilação de valores encontrados na norma já referida e na ASHRAE (1997).

Tabela 5: I_{cl} e f_{cl} para conjunto de vestimentas (adaptação de ISO 9920, 1995; ASHRAE, 1997).

Conjunto de Vestimentas	I_{cl}	f_{cl}
Calção para caminhada, camisa de manga curta	0,36	1,10
Calças, camisa de manga curta	0,57	1,15
Calças, camisa de manga longa	0,61	1,20
Calças, camisa de manga longa, paletó	0,96	1,23
Calças, camisa de manga longa, paletó, camiseta de manga curta, camiseta sem manga	1,14	1,32
Calças, camisa de manga longa, blusa (suéter) de manga longa, camiseta de manga curta	1,01	1,28
Calças, camisa de manga longa, blusa de manga longa, camiseta de manga curta, paletó, ceroula	1,30	1,33
Calças de lã, camisa de lã	0,74	1,19
Pijama com camisa de manga longa e calça longa, robe curto, chinelos de tecido, sem meias	0,96	1,32
Saia até o joelho, camisa de manga curta, meia calça, sandálias	0,54	1,26
Saia até o joelho, camisa de manga longa, meia calça, combinação	0,67	1,29
Saia até o joelho, camisa de manga longa, meia calça, anágua, blusa (suéter) de manga longa	1,10	1,46
Saia até o joelho, camisa de manga longa, meia calça, anágua, paletó	1,04	1,30
Saia longa, camisa de manga longa, meia calça, paletó	1,10	1,46
Sobretudo de manga longa, camiseta de manga curta	0,72	1,23
Macacão, camisa de manga longa, camiseta de manga curta	0,89	1,27
Sobretudo de lã, blusa de frio de manga longa, ceroula	1,37	1,26

Tabela 6: I_{cl} para peças de vestuários (adaptação de ISO 9920, 1995; ASHRAE, 1997).

Roupas íntimas	I_{cl}	Vestidos, saias	I_{cl}	Calções, calças, macacão	I_{cl}
Cuecas	0,04	Saia fina	0,14	Calção curto	0,06
Calcinhas	0,03	Saia grossa	0,23	Calção para caminhada	0,08
Sutiã	0,01	Vestido manga longa fino	0,33	Calças de tecido fino	0,15
Camiseta	0,08	Vestido manga longa grosso	0,47	Calças de tecido grosso	0,24
Combinação	0,16	Vestido de manga curta fino	0,29	Calças de lã	0,28
Anágua	0,14	Pullover fino	0,23	Macacão	0,30
Camiseta de manga longa	0,20	Pullover grosso	0,27		
Ceroula	0,15			Pijamas, roupões, robes	
		Suéteres, blusas de lã		Pijama fino de manga curta	0,42
Meias		Suéter fino sem mangas	0,13	Pijama grosso manga longa	0,57
Meias esportivas curtas	0,02	Suéter grosso sem mangas	0,22	Roupão fino curto	0,18
Meias finas até a coxa	0,03	Suéter fino manga longa	0,25	Roupão fino longo	0,20
Meias grossas até o joelho	0,06	Suéter grosso manga longa	0,36	Roupão hospitalar de mangas curtas	0,31
Meia calça	0,02			Roupão grosso longo	0,46
		Coletes, paletós, jaquetas		Robe fino curto de manga curta	0,34
Camisas ou blusas femininas		Colete fino	0,10	Robe fino trespassado de manga	0,48
Camisa colarinho s/mangas	0,12	Colete grosso	0,17	Robe grosso trespassado de manga	0,69
Camisa de manga curta	0,19	Paletó fino	0,36		
Camisa de manga longa	0,25	Paletó grosso	0,44	Calçados	
Camisa de flanela manga longa	0,34	Jaquetão fino	0,42	Sandálias de couro ou borracha	0,02
Camisa de tricô manga curta	0,17	Jaquetão grosso	0,48	Chinelos de tecido	0,03
Camisa de lã manga longa	0,34	Sobretudo	0,49	Botas	0,10

Para se determinar o isolamento do conjunto de roupas (I_{cl}) a partir de valores de peças individuais ($I_{cl,i}$), a ISO 9920 (1995) propõe a seguinte formulação:

$$I_{cl} = \sum I_{cl,i} \quad [\text{Eq.14}]$$

Para a obtenção do fator de roupa (f_{cl}), a seguinte equação, resultante da regressão de dados empíricos, é proposta, considerando-se o isolamento da roupa (I_{cl}) em *clo*:

$$f_{cl} = 1 + 0,31 \cdot I_{cl} \quad [\text{Eq.15}]$$

A determinação da resistência evaporativa da roupa (R_T) é estimada baseando-se no isolamento térmico e fator de roupa, considerando-se os coeficientes de trocas convectivas (h_c) e radiativas (h_r). Considerando-se a maioria dos conjuntos de vestuários permeáveis, com uma ou duas camadas de roupas, a ISO 9920 (1995) propõe a seguinte simplificação para determinação genérica da resistência evaporativa da roupa:

$$R_T = 0,06/(f_{cl} \cdot h_c) + 0,18 \cdot I_{cl} \quad [\text{Eq.16}]$$

No levantamento realizado, para a determinação do isolamento térmico e evaporativo das vestimentas, as pessoas foram identificadas através de etiquetas adesivas com código de referência individual, realizando-se registro fotográfico de todos, para posterior identificação das características da roupa.

5. VARIÁVEIS SUBJETIVAS

5.1 Percepção e preferência de sensação térmica

O levantamento das respostas subjetivas se deu baseado nos princípios estabelecidos pela norma ISO 10551 (1995). Utilizaram-se os critérios de ponto central e escalas de intensidades positivas e/ou negativas. Contudo, a norma em questão propõe um questionário com cinco perguntas padrão, as quais não foram diretamente transcritas para o português. Respeitando as peculiaridades lingüísticas de cada idioma, optou-se por reinterpretar as cinco perguntas originais, dando origem a um questionário em português com quatro questões. Além destas quatro questões de avaliação global do ambiente, foram propostas outras quatro para a tentativa de verificação da percepção e preferência relativas às variáveis ambientais específicas. A Figura 5 traz as questões relativas à avaliação subjetiva do questionário proposto e aplicado. Além destas questões, havia um cabeçalho de identificação e de verificação da possível mudança no vestuário em relação ao momento do registro fotográfico. Aplicou-se também um questionário inicial para verificação de informações pessoais (sexo, idade, altura, peso) e verificação da aclimatação, perguntando-se sobre as cidades em que já viveu e por quanto tempo.

1. Neste exato momento, eu estou sentindo:

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
muito frio	frio	um pouco de frio	nem frio nem calor	um pouco de calor	calor	muito calor

2. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, eu estou:

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
confortável	um pouco desconfortável	desconfortável	muito desconfortável

3. Neste exato momento, eu preferiria estar sentindo:

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
muito mais frio	mais frio	um pouco mais de frio	sem mudanças	um pouco mais de calor	mais calor	muito mais calor

4. Neste exato momento, com relação às condições climáticas, na minha opinião estar neste local é:

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
perfeitamente tolerável	facilmente tolerável	dificilmente tolerável	intolerável

5. Com relação à temperatura do ar,
eu preferiria que esta estivesse: mais baixa como está mais alta não sei dizer

6. Com relação à umidade do ar,
eu preferiria que o ar estivesse: mais seco como está mais úmido não sei dizer

7. Com relação ao vento,
eu preferiria que este estivesse: mais fraco como está mais forte não sei dizer

8. Com relação à radiação solar,
eu preferiria que esta estivesse: mais branda como está mais intensa não sei dizer

Figura 5: Questionário para verificação de percepção e preferência de sensação térmica

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tabela 7 apresenta um resumo das variáveis, quantificadas através dos procedimentos descritos ao longo deste artigo, que são consideradas na análise termo fisiológica.

Tabela 7: Variáveis da análise termo-fisiológica.

Balço termo fisiológico		t_{ar}	ω_{ar}	v_{ar}	t_{rm}	I_{cl}	R_e	M	W
Produção interna de calor	M-W								
Troca por radiação	R								
Troca por convecção	C								
Troca por convecção pela respiração	C_{res}								
Evaporação pela respiração	E_{res}								
Evaporação pela pele	E_{sk}								

Outras variáveis precisam ser também consideradas para o cálculo das diversas trocas: o coeficiente de trocas convectivas h_c (função da velocidade relativa entre o ar e o indivíduo, dependendo portanto da velocidade do ar e da movimentação do corpo); o coeficiente de trocas radiantes h_r , a emissividade e absorção de onda curta da pele e roupa (a absorção irá variar principalmente em função da cor), o fator de trocas radiativas (função da posição do corpo), o coeficiente de trocas evaporativas h_e (que varia de acordo com as características dos tecidos e a camada de ar circundando a pele), a área superficial do corpo (função da altura e peso, determinado pela equação de Dubois; ISO 9920, 1995). Com os dados obtidos através dos procedimentos apresentados ao longo deste trabalho de pesquisa, é possível, a partir de modelos específicos, determinarem-se estas outras variáveis recém apresentadas. Contudo, a determinação destes coeficientes e adoção de valores para as características físicas arroladas é bastante controversa, gerando resultados bastante díspares, em função do modelo de cálculo e dos valores adotados. Futuramente, será realizada publicação sobre os resultados da pesquisa que está se desenvolvendo nesse sentido, comparando proposições de diversos autores.

Por fim, além da consideração das variáveis citadas na tabela 7, propôs-se também um questionário para avaliação subjetiva, realizada através de perguntas concernentes a percepção e preferência de sensação térmica. A aplicação do questionário é importante para avaliação específica de ambientes por seus usuários. Com os resultados encontrados, é possível, através de análise termo-fisiológica, a verificação de possíveis cenários alternativos para melhorar as condições de conforto. Nesta pesquisa em específico, a aplicação de questionário foi realizada visando comparar os resultados da avaliação subjetiva com os resultados de índices de conforto térmico em espaços abertos, cujos modelos foram processados computacionalmente. A discussão da comparação de resultados do levantamento de campo e das simulações computacionais será objeto de publicação futura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE (1997). Handbook of fundamentals. ASHRAE, Atlanta, USA.
- ISO (1998). ISO 7726. Ergonomics: instruments for measuring physical quantities. ISO, Genève, Switzerland.
- ____ (1995). ISO 9920. Ergonomics of the thermal environment: estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. ISO, Genève, Switzerland.
- ____ (1995). ISO 10551. Ergonomics of the thermal environment: assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. ISO, Genève, Switzerland.
- ____ (1990). ISO 8996. Ergonomics: metabolic heat production. ISO, Genève, Switzerland.

8. AGRADECIMENTOS

O autor agradece: à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro; aos professores Denise Duarte, José Cremonesi e Joana Gonçalves por possibilitarem a realização desta pesquisa com seus alunos e os monitorarem durante o levantamento; às professoras Anésia Frota e Márcia Alucci pelos equipamentos cedidos e orientação; e aos pesquisadores do LABAUT/FAUUSP, os pós-graduandos Alessandra Prata, Andrea Vosgueritchian, Anna Miana, Cecília Mueller, Daniel Cóstola, Gisele Benedetto, José Ovídio Ramos, Norberto Moura e Rafael Brandão, os graduandos Bruna Luz, Luciana Ferreira e Rodrigo Cavalcante, e Gustavo Bruneli e Mônica Marcondes pelo apoio na realização dos levantamentos de campo.