

## **CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS ABERTOS COM DIFERENTES ABRANGÊNCIAS MICROCLIMÁTICAS. PARTE 1: VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELOS PREDITIVOS**

**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) leo4mm@gmail.com (2) marcialu@usp.br

### **RESUMO**

Com relação à ambiência térmica, espaços abertos apresentam características comumente não encontradas em espaços fechados, trazendo maior complexidade para a análise termo-fisiológica: radiação solar, ventos, atividades físicas diferenciadas, possíveis taxas de suor elevadas, etc. O objetivo desta pesquisa foi verificar a aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto térmico em espaços abertos, considerando diferentes abrangências micro-climáticas. O método adotado foi indutivo experimental (levantamentos de campo) e dedutivo (simulação de modelos). Os levantamentos empíricos foram realizados em mais de 70 cenários microclimáticos com a aplicação de aproximadamente 2.000 questionários. Os resultados dos levantamentos empíricos foram correlacionados com os das simulações, determinando-se as capacidades preditivas de vinte modelos e trinta e dois índices. Apresentam-se os resultados finais para diferentes abrangências micro-climáticas, propiciando a verificação da aplicabilidade de diversos modelos de conforto térmico em espaços abertos da cidade de São Paulo. O artigo "*Conforto térmico em espaços abertos em diferentes abrangências microclimáticas. Parte 2: proposição de calibração de modelos preditivos*" considera, com relação aos índices dos modelos considerados, os procedimentos e resultados da proposição de calibração com base nos resultados encontrados nesta avaliação empírica comparativa.

### **ABSTRACT**

Considering the thermal environment, open spaces require the consideration of additional factors commonly not present in indoor conditions, such as solar radiation, winds, different activities, sweat rates, among others. The objective of this research is to verify the applicability of different predictive models of outdoor thermal comfort, considering different microclimatic situations. The method adopted is experimental inductive (field research of micro-climatic variables and subjective answers) and deductive (simulation of predictive models). The field research consists of over 70 different micro-climatic scenarios and closely 2000 applied questionnaires. The simulations consider twenty predictive models and thirty-two different indexes. All the predictive models were computationally processed and the results of the simulations were compared to the results of the empirical field research. The final results are presented considering different ranges of microclimatic conditions, allowing the verification of predictive models applicability in open spaces of the city of São Paulo. The following paper presents, considering all the models and indexes studied, the procedure and results of calibrations done based on the results found on the presented empirical comparative assessment.

# 1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste artigo os resultados e a discussão relativos a estudo comparativo entre e resultados de simulação de modelos preditivos de adequação térmica e resultados de levantamentos empíricos realizados na cidade de São Paulo. Para a realização das simulações, foram processados computacionalmente 20 modelos preditivos, levando em consideração 32 índices distintos. A Tabela 1 traz os modelos utilizados para as simulações assim como as referências bibliográficas em que podem ser encontradas suas formulações matemáticas. Estas podem também ser encontradas em Monteiro e Alucci (2005a). A tabela traz ainda as diversas variáveis independentes que foram utilizadas na consideração de cada um dos modelos em estudo. Com relação aos levantamentos de campo, estes foram realizados em 72 cenários microclimáticos distintos com a aplicação de aproximadamente 2000 questionários. A descrição dos levantamentos realizados pode ser encontrada em Monteiro e Alucci (2005b). Resultados preliminares da presente pesquisa podem ser encontrados em Monteiro e Alucci (2006). Os resultados finais são aqui considerados, através da seguinte estrutura: apresentação sumária dos diversos modelos, índices e variáveis envolvidas; uma proposta de classificação dos modelos; os critérios de comparação adotados; e apresentação e discussão dos resultados.

**Tabela 1: Modelos processados computacionalmente para simulação comparativa**

Referência	Modelo	Índices	Variáveis														
			individuais				micro-climáticas				derivadas		climáticas				
			M	W	I <sub>cl</sub>	R <sub>e</sub>	t <sub>ar</sub>	p <sub>ar</sub>	v <sub>ar</sub>	t <sub>rm</sub>	t <sub>g</sub>	t <sub>bu</sub>	t <sub>bs</sub>	ur	v <sub>10</sub>	R	
Houghten, 1923	ET	ET*					x	x									
Vernom & Warner, 1932	ET	CET*					x	x			x						
ASHRAE, 2001	OT	OT					x		x	x							
Szokolay, 2001	ET+OT	EOT*					x	x	x	x							
Siple & Passel, 1945	WCT	WCTI											x		x		
Belding & Hatch, 1955	HSI	HSI					x	x	x	x							
Yaglou & Minard, 1957	WBGT	WBGT					x				x	x					
Gagge, 1967	Gagge	SET*	x	x	x	x	x	x	x	x							
Givoni, 1969	ITS	ITS					x	x	x	x							
Masterton, 1979	Humidex	HU					x	x									
Jendritzky, 1979, 1991	KMM	PMV	x	x	x	x	x	x	x	x							
		PPD	x	x	x	x	x	x	x	x							
ISO 7933, 1989	Vogt	Sw <sub>req</sub>	x	x	x	x	x	x	x	x							
		w	x	x	x	x	x	x	x	x							
		S	x	x	x	x	x	x	x	x							
		Sw <sub>req g/h</sub>	x	x	x	x	x	x	x	x							
Dominguez, 1992	Sevilha	Sw <sub>req</sub> '	x	x	x	x	x	x	x	x					x		
Brown & Gillespie, 1995	Comfa	S'	x	x	x	x	x	x	x	x							
Aroztegui, 1995	Tne	Tne											x		x	x	
Blazejczyk, 1996,2000,2002	MENEX	HL	x	x	x	x	x	x	x	x							
		PhS	x	x	x	x	x	x	x	x							
		R'			x												x
		STI	x	x	x	x	x	x	x	x							
		SP	x	x	x	x	x	x	x	x							
		ECI					x										
DeFreitas, 1997	DeFreitas	PSI	x	x	x	x	x	x	x	x							
		STE	x	x	x	x	x	x	x	x							
Höppe,1999	MEMI	PET	x	x	x	x	x	x	x	x							
Noguchi & Givoni, 2000	TS	TS					x	x	x	x							
Bluestein & Osczevski, 2002	NWCT	NWCTI											x		x		
		Ft											x		x		
Nikolopoulou, 2004	ASV	ASV											x	x	x	x	

Onde: M: metabolismo ( $W/m^2$ ); W: eficiência mecânica ( $W/m^2$ ); I<sub>cl</sub>: isolamento térmico da roupa (clo); R<sub>e</sub>: resistência evaporativa da roupa ( $m^2kPa/W$ ); t<sub>ar</sub>: temperatura do ar (°C); p<sub>ar</sub>: pressão parcial de vapor (kPa); v<sub>ar</sub>: velocidade do ar (m/s); t<sub>rm</sub>: temperatura radiante média (°C); t<sub>g</sub>: temperatura de globo (°C); t<sub>bu</sub>: temperatura de bulbo úmido (°C); t<sub>bs</sub>: temperatura de bulbo seco (°C); ur: umidade relativa (%); v<sub>10</sub>: velocidade do ar a 10m(m/s); R: radiação solar incidente ( $W/m^2$ ).

## 2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS E DOS ÍNDICES

Para facilitar a discussão dos resultados, foi realizada uma classificação dos modelos estudados, considerando conceitos modelares e modais. Consideraram-se ainda os seus respectivos índices, segundo o critério de interpretação apresentado. Assim, os modelos foram classificados segundo dois critérios: o objeto de predição e o método predominante de modelagem. Segundo o objeto de predição, tem-se a consideração ou do esforço fisiológico (cujos índices são comumente referidos como de estresse térmico), ou da sensação térmica (cujos índices são comumente considerados como de conforto térmico). Com relação ao método predominante de modelagem, tanto os modelos de esforço fisiológico quanto os modelos de sensação térmica podem ser subdivididos em modelos numéricos e modelos analíticos, segundo sejam, respectivamente, adotadas abordagens predominantemente indutivas ou dedutivas (ver tabela 2). Já os índices foram classificados segundo o seu principal critério interpretativo. Assim, os índices considerados baseiam-se predominantemente em um dos dois seguintes critérios: analogia ou parametrização. Quando a interpretação é realizada através de analogia, verifica-se, invariavelmente, a adoção de temperaturas equivalentes. Estas são temperaturas equivalentes de referência, no caso de modelos de esforço fisiológico, e temperaturas equivalentes de sensação térmica, no caso dos modelos que têm esta como objeto de predição. Em ambos os casos, é habitual o estabelecimento posterior de faixas interpretativas para os valores das temperaturas equivalentes. Nos casos em que não ocorre um processo analógico, observa-se o estabelecimento de um parâmetro específico, ou ainda da relação entre diversos parâmetros. No caso de índices de estresse térmico, os parâmetros são fisiológicos. Já com relação aos índices de conforto térmico, tem-se parametrização através de variáveis fisiológicas ou através de escalas arbitrárias de valores. Em ambos os casos verifica-se posterior correlação dos valores encontrados com respostas subjetivas. Assim, ainda que nas duas situações tenha-se uma interpretação qualitativa subjetiva, convencionou-se aqui a divisão dos índices parametrizados segundo a utilização de parâmetros ditos fisiológicos ou qualitativos. Estes foram assim chamados porque a escala de valores é arbitrada pelas respostas subjetivas, recaindo a ênfase no caráter qualitativo. Já aqueles foram assim chamados porque a escala de valores é determinada efetivamente pelo parâmetro ou relação de parâmetros fisiológicos.

**Tabela 2: Proposta de classificação dos modelos e índices levantados**

Objeto de predição	Esforço fisiológico (estresse)					
Método predominante	Indutivo (modelos numéricos)			Dedutivo (modelos analíticos)		
Modelos	WCT (WCTI), WBGT, Humidex (HU), HSI, ITS NWCT (NWCTI, Ft)			Vogt ( $S_{w_{req}}, w, S$ ) Sevilha ( $S_{w_{req}}'$ ) MENEX (HL, PhS, R', SP)		
Principal critério interpretativo	Analogia	Parâmetros Fisiológicos		Analogia	Parâmetros Fisiológicos	
Índices	WBGT <sup>(1)</sup> HU <sup>(1)</sup> NWCTI <sup>(2)</sup>	WCTI <sup>(2)</sup> , Ft <sup>(2)</sup> HSI <sup>(1)</sup> , ITS		-	$S_{w_{req}}, w, S^{(1)}, S_{w_{req}}'^{(1)}$ HL, PhS, R' <sup>(1)</sup> , SP <sup>(1)</sup>	
Objeto de predição	Sensação térmica (conforto)					
Método predominante	Indutivo (modelos numéricos)			Dedutivo (modelos analíticos)		
Modelos	ET*, CET* OT, EOT* Tne, TS, ASV			Gagge (SET*), KMM (PMV, PPD) Menex (STI, ECI), MEMI (PET) Comfa (S'), De Freitas (PSI; STE)		
Principal critério interpretativo	Analogia	Parâmetros		Analogia	Parâmetros	
Índices		Fisiológicos	Qualitativos		Fisiológicos	Qualitativos
Índices	ET*, OT CET* EOT*	-	Tne TS ASV	SET* STI PET	S', ECI PSI, STE	PMV PPD

(1) e (2): Índices que consideram respectivamente exposição apenas a situações térmicas quentes e a situações térmicas frias.

### 3. CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO

Para a realização da comparação entre os diversos modelos foram estabelecidos três critérios que estão baseados na correlação entre os resultados fornecidos pelos diversos modelos e os resultados encontrados no levantamento de campo, levando em consideração os valores médios obtidos em cada uma das trinta e seis situações levantadas. Assim, para cada modelo, a consideração dos resultados é realizada através, primeiramente, da correlação entre os resultados do parâmetro adotado pelo modelo e os resultados, em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo. O segundo critério é a correlação entre os resultados do índice do modelo e os resultados, também em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo. Por fim, é considerada a porcentagem de equivalência de respostas do índice para os casos em que haja a possibilidade de estabelecimento de correlação lingüística entre as faixas interpretativas deste e as utilizadas no levantamento de campo. As faixas de interpretação dos valores dos índices podem ser encontradas nas referências mencionadas na tabela 1 e em Monteiro (2005b). Com relação aos índices baseados em temperaturas equivalentes, utilizaram-se as faixas interpretativas propostas por De Freitas (1997). Ainda que o autor aponte a utilização desse critério apenas para os índices baseados em temperatura efetiva, adotou-se o mesmo para os demais casos, por falta de outras referências bibliográficas (exceto para o caso do STI, em que se utilizou Blazejczyk, 1996).

### 4. RESULTADOS

A tabela 3 apresenta os resultados em termos correlativos e de percentual de acerto preditivo.

**Tabela 3: Módulos das correlações entre resultados do levantamento de campo e das simulações.**

Modelo	Índices	Situações micro-climáticas mais restritas			Situações micro-climáticas mais abrangentes		
		Correlação com o parâmetro do modelo	Correlação com as faixas do índice	Predições corretas	Correlação com o parâmetro do modelo	Correlação com as faixas do índice	Predições corretas
ET	ET*	0,73	0,59	44%	0,69	0,58	40%
ET	CET*	0,89	0,77	11%	0,88	0,79	15%
OT	OT	0,72	0,69	47%	0,71	0,63	39%
ET+OT	EOT*	0,70	0,66	42%	0,67	0,66	36%
WCT	WCTI	0,69	0,64	31%	0,72	0,68	25%
HSI	HSI	0,83	0,72	68%	0,80	0,74	64%
WBGT	WBGT	0,86	-	-	0,80	-	-
Gagge	SET*	0,89	0,84	28%	0,82	0,79	19%
ITS	ITS	0,84	0,75	62%	0,86	0,76	58%
Humidex	HU	0,74	0,70	69%	0,65	0,61	51%
KMM	PMV	0,87	0,82	75%	0,78	0,72	56%
“	PPD	0,70	-	-	0,66	-	-
Vogt	Swreq	0,87	-	-	0,86	-	-
“	W	0,86	-	-	0,84	-	-
Sevilha	Swreq’	0,89	0,83	72%	0,88	0,84	72%
Comfa	S’	0,89	0,65	61%	0,87	0,63	58%
Tne	Tne	0,88	0,70	33%	0,87	0,74	31%
MENEX	HL	0,89	0,76	62%	0,88	0,83	63%
“	PhS	0,81	0,71	28%	0,82	0,77	31%
“	R’	0,86	0,76	69%	0,87	0,75	67%
“	STI	0,87	0,79	53%	0,86	0,77	52%
“	SP	0,89	0,82	78%	0,86	0,82	72%
“	ECI	0,78	0,72	42%	0,73	0,74	36%
De Freitas	PSI	0,89	0,76	72%	0,87	0,82	61%
“	STE	0,79	0,71	58%	0,78	0,71	54%
MEMI	PET	0,89	0,78	31%	0,82	0,78	35%
TS	TS	0,87	0,84	78%	0,86	0,83	69%
NWCT	NWCTI	0,62	0,60	22%	0,68	0,64	18%
ASV	ASV	0,85	0,77	76%	0,84	0,74	61%

Na tabela 3, as primeiras três colunas, dizem respeito a trinta e seis situações micro-climáticas, caracteristicamente mais restritas do ponto de vista microclimático, ou seja, mais próximas a situações de conforto. As três colunas seguintes dizem respeito a estas mesmas situações acrescidas de outras trinta e seis, abrangendo situações térmicas mais quentes e mais frias. A Tabela 5 traz os limites considerados para as correlações no conjunto de situações com menor e maior abrangência. A Tabela 6 apresenta os valores da variável isolamento da roupa, considerando os dados observados e valores médios, para os conjuntos de situações mais restrito e mais abrangente. Para atividades físicas, podemos considerar de maneira simplificada as seguintes condições comumente verificadas em espaços abertos: pessoa sentada, em pé com pouca atividade, andando a 0,9 m/s e andando a 1,5 m/s. Os valores de taxa metabólica para as referidas atividades encontram-se na Tabela 6.

**Tabela 4: Valores limite observados para as variáveis ambientais.**

variável	situações mais restritas		situações mais abrangentes	
	valor mínimo observado	valor máximo observado	valor mínimo observado	valor máximo observado
$t_{ar}$	19,5	28,9	15,1	33,1
$u_r$	39,5	76,7	30,9	94,7
$v_{ar}$	0,1	2,2	0,1	3,6
$t_{rm}$	20,3	59,0	15,5	65,5

**Tabela 5: Valor do isolamento da roupa, considerando dados observados e valores médios.**

$I_{cl}$	valor mínimo observado	valor máximo observado	valor médio mínimo	valor médio máximo
conjunto restrito	0,36	0,94	0,48	0,73
conjunto abrangente	0,26	1,17	0,39	0,86

**Tabela 6: Valor da taxa metabólica para atividades verificadas em espaços abertos.**

atividade	metabolismo (Met)	(W/m <sup>2</sup> )
sentado	1,0	58,0
em pé com pouca atividade	1,3	75,4
andando a 0,9m/s	2,0	116,0
andando a 1,5m/s	3,0	174,0

## 5. CONSIDERAÇÃO DOS RESULTADOS

A consideração dos resultados será realizada através do agrupamento dos diversos índices, segundo a classificação proposta na Tabela 2. Assim, configuram-se dois grandes grupos, segundo o objeto de predição do modelo: esforço fisiológico e sensação térmica. Cada grupo está subdividido em três subgrupos. Não se considerou aqui a classificação segundo o método predominante do modelo, por se acreditar que as comparações são mais facilmente realizadas segundo critérios estabelecidos de acordo com os dados de saída dos modelos. Assim, os critérios utilizados para cada grupo, que também estão presentes na referida tabela, serão elucidados nos itens a seguir. Vale ressaltar que sempre que forem apresentados dois valores para determinada correlação ou porcentagem de acerto preditivo, o primeiro refere-se ao conjunto de situações microclimáticas mais restrito e o segundo ao mais abrangente.

### 5.1 Modelos de esforço fisiológico

Para a consideração dos resultados dos índices baseados em modelos de esforço fisiológico, foram estabelecidos três subgrupos: índices normativos de estresse térmico por calor, outros índices de estresse térmico por calor e índices de estresse térmico por calor e frio. Essa subdivisão foi realizada considerando-se que, inicialmente, devem ser discutidas as ferramentas normativas passíveis de serem aplicadas a espaços abertos. Em seguida, serão considerados os demais índices que consideram apenas situações térmicas quentes. Por fim, têm-se os índices que abrangem situações térmicas quentes e frias. Os índices WCTI e NWCTI são índices relativos à exposição a situações térmicas frias, contudo foram

considerados juntamente com o terceiro subgrupo, por razão que será apresentada em discussão oportuna.

Os Índices normativos de estresse térmico por calor ISO 7243, NR-15 e ISO 7933 serão aqui considerados. Segundo a norma ISO 7243, todas as situações analisadas não oferecem risco de estresse por calor para aclimatados ou não aclimatados. A NR-15 oferece resultado análogo: como as situações em discussão levam em consideração atividade leve (pessoas em pé e relaxadas), a norma permitiria trabalho contínuo. A norma ISO 7933 também não indicou restrição em nenhum dos seus critérios, sejam de estresse térmico ( $Swreq$  e  $w$ ) ou de esforço fisiológico ( $S$  e  $Swreq$  em g/h). Observa-se, segundo esta norma, que na situação mais crítica o tempo de atenção e o tempo limite são de 6,6 e 8,2 horas para não aclimatados e 9,9 e 13,2 horas para aclimatados. Esta mesma situação é a única que também apresenta restrição de tempo de trabalho para atividade moderada segundo NR-15.

Considerando as normas em questão, pode-se afirmar que nenhuma das situações em análise apresenta estresse térmico. Assim, considerando que estas três normas fornecem informações acerca do risco de estresse térmico, no limite poder-se-ia argumentar que a única informação fornecida por elas é que as situações em análise não apresentam este risco. Contudo, apesar das referidas situações não fazerem parte da faixa de avaliação qualitativa dessas normas, é interessante observar a alta correlação positiva encontrada entre o WBGT, o  $Swreq$  e o  $w$  e o valor médio das respostas de percepção de sensação térmica, respectivamente 0,86; 0,87 e 0,86, para o grupo de situações micro-climáticas mais restrito, e 0,80; 0,86 e 0,84 para o grupo mais abrangente. Com relação ao  $S$ , como este valor manteve-se sempre nulo, não é possível estabelecer qualquer correlação. Quantos aos tempos de atenção e limite, estes apresentaram correlação negativa, numericamente igual em módulo à correlação de  $Swreq$ , uma vez que são obtidos a partir deste.

Serão considerados agora outros índices de estresse térmico por calor: HSI, HU,  $Swreq$  (Sevilha),  $R'$  e SP. A menor correlação encontrada foi a do HU (0,74 e 0,65 para o parâmetro do modelo e 0,70 e 0,60 para a interpretação do índice). Dado que este índice considera apenas as variáveis temperatura e umidade do ar, pode-se afirmar que houve um coeficiente de correlação significativamente alto. Este fato pode ser explicado dada a alta correlação negativa entre a umidade relativa e as respostas de sensação de conforto encontradas no levantamento de campo. A correlação do  $R'$  foi também significativamente alta (0,86 e 0,87 para o parâmetro do modelo e 0,76 e 0,75 para a interpretação do índice) considerando-se que o índice é sensível apenas à radiação térmica e ao tipo de roupa. Contudo, conforme visto no levantamento em questão, a correlação mais significativa com as respostas de sensação térmica se deu através da temperatura radiante média. Deve-se considerar, ainda, a alta correlação desta com a temperatura do ar e desta com o isolamento da roupa. Assim, o bom desempenho do índice se explica já que os momentos de desconforto por calor foram marcadamente caracterizados pela presença de radiação solar direta.

O HSI, apesar de considerar as quatro variáveis ambientais, acabou apresentando resultados inferiores (0,83 e 0,80 para o parâmetro do modelo e 0,72 e 0,74 para a interpretação do índice) se comparado aos dois índices já citados, que não consideram todas as variáveis. Esse índice considera separadamente trocas convectivas, radiativas e evaporativas. Porém cada uma das trocas é considerada através de sucessões de aproximações empíricas. Assim, apesar de considerar as trocas isoladas, o modelo não é analítico, mas sim numérico. Provavelmente a base empírica adotada, ou o tratamento desta, não foram satisfatórios, quando pensados em termos do caso em estudo, fato que é compreensível uma vez que o objetivo do índice é avaliar o estresse por calor e, conforme já verificado no item anterior, nenhuma situação configura-se necessariamente como de estresse. Para uma melhor elucidação da questão, seriam necessários estudos comparativos dos resultados individuais das diferentes trocas segundo os diversos modelos. Seria possível, inclusive, a proposição de novas relações empíricas para as diversas trocas isoladas, gerando modelos numéricos a partir de resultados de modelos analíticos que apresentam correlações com os resultados do levantamento de campo suficientemente significativas. Estas questões serão discutidas nos próximos capítulos, quando serão consideradas a calibração de modelos existentes e a proposição de um novo modelo.

Os dois índices de estresse térmico por calor que apresentaram melhores correlações foram o Swreq (0,89 e 0,88 para o parâmetro do modelo e 0,83 e 0,84 para a interpretação do índice 83) e o SP (0,89 e 0,86; 0,82 e 0,82, respectivamente). Estes dois índices fornecem informações interessantes uma vez que focam em aspectos opostos relacionados ao estresse térmico. O índice de Sevilha apresenta uma proposta que caracteriza o uso do espaço em função do esforço fisiológico. Nos resultados encontrados, verifica-se que todos os espaços sem ocupação foram assim caracterizados em coincidência com a presença de radiação solar direta. Espaços de passagem são devidos a situações sem radiação solar direta, mas com maiores temperaturas do ar ou menores velocidades do vento. Já o SP caracteriza o efeito aparente do esforço fisiológico, indicando e caracterizando a presença de suor no corpo. Observa-se alta correlação entre as indicações desse índice, as do modelo de Sevilha e ainda as respostas colhidas em campo. Coincide, assim, o critério pele seca com a zona de permanência e de conforto, o critério de pele sem umidade visível com a zona de passagem e pouco quente, e o critério de pele com umidade visível com a zona sem ocupação e quente, em mais de 70% dos casos.

Finalmente, os índices de estresse térmico por calor e frio WCTI, NWCTI, ITS, PhS e HL serão aqui considerados. Em verdade, o WCTI e NWCTI são índices de estresse térmico por frio, uma vez que avaliam apenas o efeito do vento sobre a temperatura do ar. Contudo, como comumente apresentam-se tabelas de interpretação de seus valores também para temperaturas mais elevadas, foram aqui assim considerados. Os resultados, porém, indicaram os mais baixos índices de correlação (-0,69 e -0,72 para o parâmetro do modelo e 0,64 e 0,68 para a interpretação do índice, para o caso índice original, e 0,62 e 0,60; e 0,60 e 0,64, para o caso do novo índice. Conforme já foi visto, a correlação entre as velocidades do ar e as respostas de sensação térmica foi bastante baixa. Assim, era de se esperar resultados semelhantes no desempenho destes índices. Contudo, independentemente deste fato, é interessante observar que o índice original tende a apontar para situações quentes, enquanto o novo índice aponta para situações mais frias. Deve-se observar também que estes índices apresentaram correlações significativamente mais altas com a ampliação da base empírica, provavelmente devido a consideração de situações termicamente mais frias com velocidades do vento mais consideráveis, situações as quais estão mais próximas daquelas em que os índices foram originalmente concebidos.

O PhS apresentou correlação um pouco mais significativa: -0,81 e -0,82 para o parâmetro do modelo e 0,71 e 0,77 para a interpretação do índice. Contudo, qualitativamente este índice tende a indicar situações de esforço fisiológico por frio na maioria dos casos em que se obtiveram respostas de sensação térmica neutra. Assim, como nos índices de temperatura resfriada pelo vento, observou-se também aqui um aumento da correlação com o aumento da abrangência da base empírica. Já o ITS, apresentou correlação ainda melhor: 0,84 e 0,86 para o parâmetro do modelo e 0,75 e 0,76 para a interpretação do índice. Qualitativamente as respostas deste índice parecem bastante satisfatórias, indicando neutralidade térmica em praticamente todas as situações e esforço por calor apenas quando as respostas de sensação térmica aproximaram-se de valores próximos a 1,0. Novamente, observou-se aqui correlações mais significativas com a ampliação da base empírica, apontando para o fato, já esperado, de que índices de estresse térmico realmente apresentam melhores resultados em situações mais extremas. Este fato será também observado nos resultados do índice a seguir, que apresentou as maiores correlações do grupo. Por fim, o índice de estresse térmico que apresentou melhor desempenho foi o HL (0,89 e 0,88 para o parâmetro do modelo e 0,76 e 0,83 para a interpretação do índice). Observa-se que os valores do índice apresentaram correlação bem mais significativa que os demais, ainda que a correlação de sua interpretação esteja muito próxima da do ITS. Contudo, dado que os valores do índice apresentam correlação bem mais elevada, é possível melhorar a correlação de suas respostas propondo-se novas faixas de interpretação para seus valores.

## 5.2 Modelos de sensação térmica

Para a consideração dos resultados dos índices baseados em modelos de sensação térmica, foram estabelecidos três subgrupos, baseando-se no principal critério interpretativo de seus índices, segundo a Tabela 2. Assim, têm-se: índices de sensação térmica baseados em analogia (temperatura equivalente), em parâmetros fisiológicos e em parâmetros qualitativos.

Com relação aos índices de sensação térmica baseados em analogia de temperatura equivalente, serão aqui considerados quatro índices empíricos (ET\*, CET\*, OT, EOT\*) e três analíticos (SET\*, PET e STI). O índice ET\* e sua interpretação apresentaram as menores correlações (0,73 e 0,69 para o parâmetro do modelo e 0,59 e 0,58 para a interpretação do índice) apresentando ainda apenas 44% e 40% de acertos preditivos. Isto é devido ao fato de que este modelo não considera os efeitos radiativos que, conforme já colocado, tiveram alta correlação com as repostas encontradas. Os índices OT e EOT\* apresentaram resultados um pouco melhores: 0,72 e 0,71 para o parâmetro do modelo, 0,69 e 0,63 para a interpretação do índice e 47% e 39% de acertos preditivos; e 0,70 e 0,67; 0,66 e 0,67; 42% e 36%, respectivamente. É curioso ainda observar que, com a consideração dos efeitos da umidade, a EOT\* acabou por apresentar resultados menos satisfatórios que a OT.

Dos índices empíricos, o que apresentou mais altas correlações foi o CET\*: 0,89 e 0,88 para o parâmetro do modelo e 0,77 e 0,79 para a interpretação do índice. Contudo, apresentou apenas 11% e 15% de acerto nas predições. Isto demonstra que as correlações dos valores do índice são bastante altas, mas que os intervalos de interpretação podem ser melhorados e, principalmente, a interpretação de cada intervalo. A CET\* considera apenas a temperatura de globo corrigindo-a com relação aos efeitos da umidade, segundo o modelo de ET\*. Esse índice empírico corrigido, que considera apenas duas tomadas de medição, apresenta resultado tão significativo devido à alta correlação entre temperatura de globo e as repostas de sensação térmica verificada nos casos levantados. Com relação aos índices analíticos, os três apresentaram resultados bastante significativos: 0,87 e 0,86; 0,79 e 0,77 para o STI; 0,89 e 0,82; 0,78 e 0,78 para o PET; 0,89 e 0,82; 0,84 e 0,79 para o SET\* (respectivamente para o parâmetro do modelo e para a interpretação do índice). Contudo, a porcentagem de acertos desses índices é ainda bastante baixa (respectivamente 53% e 52%; 31% e 35%; 28% e 19%), indicando que a escala de interpretação adotada para seus valores não é satisfatória. No artigo subsequente, serão propostas novas escalas interpretativas em função dos resultados aqui obtidos.

Considerando os índices de sensação térmica baseados em parâmetros fisiológicos, serão aqui considerados os seguintes índices, todos baseados em modelos analíticos: ECI, STE, PSI e S do modelo Comfa. O ECI e o STE apresentaram as correlações mais baixas do grupo: respectivamente -0,78 e -0,73 para o parâmetro do modelo e 0,72 e 0,74 para a interpretação do índice, no caso do ECI; e 0,79 e 0,78; e 0,71 e 0,71, respectivamente, no caso do STE. Esses índices fazem predição das sensações térmicas em termos da temperatura da pele e do isolamento da roupa. Apresentam alta correlação entre si, contudo, o STE aponta, qualitativamente para situações mais frias e o ECI para situações mais quentes. Considerando válidas as associações apresentadas por esses índices e, confrontando-as com as situações levantadas em campo, pode-se afirmar que nestas tem-se uma associação de situações de conforto com temperaturas da pele mais baixas e com isolamentos de roupa mais altos. O PSI e o S do Comfa apresentaram as correlações mais significativas do grupo: 0,89 e 0,87 para o parâmetro do modelo e 0,76 e 0,82 para a interpretação do índice, no caso do PSI; e 0,89 e 0,87; e -0,65 e -0,63, respectivamente, no caso do S. A porcentagem de acertos preditivos desses índices foram de 72% e 61% para o PSI e 61% e 58% para o S. O PSI apresenta, com sua atual escala de interpretação o melhor desempenho. Contudo, uma vez que a correlação dos valores do índice é maior no modelo do Comfa, uma adaptação de suas faixas de interpretação possivelmente levará a correlação mais significativa do grupo. Deve-se notar que a correlação negativa deste modelo, deve-se ao simples fato de que a sua interpretação é feita em termos de preferência, e não de percepção, de sensação térmica. Em tópico posterior, quando for proposta nova escala e faixas de interpretação, será utilizado o padrão comumente encontrado de percepção.

Finalmente, discutem-se aqui os resultados dos índices de sensação térmica baseados em parâmetros qualitativos. Serão aqui considerados os seguintes índices baseados em modelos analíticos: PMV e PPD (KMM), e os seguintes, baseados em modelos empíricos: Tne, TS e ASV. O índice PMV, modelado através do KMM, apresenta correlações bem significativas para o conjunto de situações microclimáticas mais restrito: 0,87 para o parâmetro do modelo e 0,82 para a interpretação do índice, com 75% de acertos preditivos. A alta correlação da interpretação do índice se deve em parte à adoção nesta pesquisa de escala de valores igual a do modelo em questão. Contudo, deve-se ressaltar que o valor de velocidade do vento na situação 25 teve que ser limitado. Velocidades do vento mais significativas acabam por resultar em incoerências. Assim, a correlação encontrada não abrange a



situação 25. Assim, se houvesse velocidades do ar mais significativas em várias situações, a correlação apresentada por este modelo seria bastante baixa. Apenas a título de ilustração, a inclusão da situação 25 leva à correlação do parâmetro do modelo de 0,87 para 0,49. De forma análoga, observou-se a redução do desempenho do índice também quando considerado o conjunto mais abrangente de situações climáticas. As correlações deste índice foram as que sofreram as reduções mais significativas, passando para 0,78 para o parâmetro do modelo e 0,72 para a interpretação do índice, com apenas 56% de acertos preditivos. Assim, observa-se que, apesar das adaptações feitas para consideração de situações comumente encontradas em espaços abertos, o índice fornece resultados satisfatórios apenas em situações termicamente mais restritas, mais próximas da neutralidade térmica.

Com relação aos índices empíricos, obtiveram-se para Tne 0,88 e 0,87 para o parâmetro do modelo e 0,70 e 0,74 para a interpretação do índice, com 33% e 31% de acertos preditivos, para TS 0,87 e 0,86; 0,84 e 0,86; 78% e 69%; para ASV 0,85 e 0,84; 0,77 e 0,74; 76% e 61%. A baixa porcentagem de acertos para Tne deve-se a adoção incorreta das faixas de interpretação. Feita esta ressalva, estes índices, ainda que desenvolvidos para outras regiões, apresentam resultados satisfatórios, que podem ainda ser otimizados se fossem empregadas escalas de interpretação específicas para o caso em análise. Observa-se ainda que, com a ampliação da abrangência da base empírica, as correlações sofrem apenas pequena redução com relação aos resultados do conjunto de dados microclimáticos mais restrito. Devido ao fato destes modelos terem apresentado correlações relativamente altas para o grupo de dados em questão, motivou-se o estabelecimento de um modelo empírico com base específica nos dados levantados por esta pesquisa. Esse estudo específico está em desenvolvimento e será objeto de publicação futura.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi verificar a aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto e estresse térmico em espaços abertos, considerando diferentes abrangências micro-climáticas na cidade de São Paulo. Os critérios estabelecidos para comparação dos resultados permitem aproximações sucessivas dos modelos em estudo. A primeira correlação verifica o potencial do modelo, em termos do parâmetro adotado, ou da relação entre parâmetros adotada, para prever a sensação térmica. A segunda correlação aponta o potencial do índice de interpretação do modelo. A terceira correlação fornece, efetivamente, uma quantificação dos acertos, em termos de predição, do modelo e de seu respectivo índice.

Considerando essas diferentes aproximações, serão apresentados no artigo “*Conforto térmico em espaços abertos em diferentes abrangências microclimáticas. Parte 2: proposição de calibração de modelos preditivos*”, os procedimentos e resultados de calibração para os modelos estudados, baseando-se nos resultados encontrados nesta avaliação empírica comparativa. Conforme será verificado, obteve-se maior correlação com os dados empíricos e melhor porcentagem de predições corretas, possibilitando uma melhor utilização dos referidos modelos para verificação da adequação térmica de espaços abertos na cidade de São Paulo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AROSZTEGUI, José Miguel. (1995). Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. III Encontro Nacional no Ambiente Construído, 1995, Gramado. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC.
- ASHRAE. *Handbook of fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2001.
- BELDING, H. S.; HATCH, T. F. (1955) “Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain”. *Heating, Piping, Air Conditioning*, 27, p.129-42.
- BLAZEJCZYK, Krzysztof. (2002) “Assessment of recreational potential of bioclimate”. in: *International Workshop on Climate, Tourism and Recreation*, 1, 2001, Greece. ISB, p. 133-52.
- \_\_\_\_\_. (1996) “*Man-environment heat exchange model*”. <http://www.igipz.pan.pl/klimat/blazmenex.ppt>. Acesso realizado em 24/04/2004.
- BLUESTEIN, M.; OSCZEWSKI, R. (2002) “Wind chill and the development of frostbite in the face”. Preprints, in: *15th Conf. on Biom.*, Kansas City, MO, American Meteorology Society, p. 168-71.

- BROWN, Robert D.; GILLESPIE, Terry J. (1995) *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: John Wiley & Sons.
- DOMINGUEZ et al. (1992) *Control climático en espacios abiertos: el proyecto Expo'92*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- FANGER, P. O. (1970) "Thermal Comfort – Analysis And Applications in Environmental Engineering". McGraw-Hill Book Company. New York.
- GAGGE, A. P.; STOLWIJK J. A. J. ; HARDY, J. D. (1967) "Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures". *Environ. Res.*, 1, p. 1-20.
- GIVONI, B. (1969) *Man, climate and architecture*. New York: John Wiley & Sons.
- GIVONI, B; NOGUCHI, Mikiko. (2000) "Issues in outdoor comfort research". in: *Passive And Low Energy Architecture, PLEA 2000*. Cambridge: J&J, p. 562–5.
- HÖPPE, Peter R. (1999) "The physiological equivalent temperature: a universal index for the assessment of the thermal environment". *International Journal of Biometeorology*, 43, p. 71-5.
- HOUGHTEN F.; YAGLOU, C. (1923) Determining lines of equal comfort. *ASHVE Transactions*, 29.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1989) *ISO 7933*. Hot environments: analytical determination and interpretation of thermal stress. Genève: ISO.
- ISB (2004) "Guidelines for ISB Commissions and Study Groups". Oklahoma, ISB. Disponível em <http://www.biometeorology.org/study.htm>. Visita realizada em 09/10/2004.
- JENDRITZKY, Gerd. (2003) "Perceived temperature: Klima-Michel-model". in: *The Development of Heat Stress Watch Warning Systems for European Cities*. Freiburg May 3, 2003.
- \_\_\_\_\_. (1991) "Selected questions of topical interest in human bioclimatology". *International Journal of Biometeorology*, 35(3), p. 139-50.
- JENDRITZKY, G. et al. (1979) *Klimatologische Probleme – ein einfaches Verfahren zur Vorhersage der Wärmebelastung*, in *Zeitschrift für angewandte Klimaheilkunde*. Freiburg.
- MASTERTON, J. M.; RICHARDSON, F. A. (1979). "Humidex: a method of quantifying human discomfort". *Environment Canada, CLI 1-79*. Ontario, Downsview: Atmospheric Service.
- MCARIEL, B.; et al (1947) The prediction of the physiological effect of warm and hot environments, *Med. Res. Council*, 47, London.
- MISSENARD A. (1948) Equivalences thermiques des ambiances; equivalences de passage; equivalence de séjour. *Chaleur et Industrie*.
- NIKOLOPOULOU, Marialena (2004) *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. Atenas: CRES, 2004.
- MONTEIRO & ALUCCI (2006) Verificação comparativa experimental da aplicabilidade de diferentes modelos preditivos de conforto térmico. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. In: *Anais...* Florianópolis: ANTAC, agosto de 2006
- \_\_\_\_\_. (2005a) Índices de conforto térmico em espaços abertos. Parte 1: revisão histórica. e Parte 2: estado da arte. VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído. In: *Anais...* Maceió: ENCAC, outubro de 2005.
- \_\_\_\_\_. (2005b) Procedimentos de quantificação de variáveis para análise termo-fisiológica em espaços abertos. VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído. In: *Anais...* Maceió: ENCAC, outubro de 2005.
- PICKUP, J.; DEAR, R. (1999) "An outdoor thermal comfort index: the model and its assumptions". in: *International Congress of Biometeorology*, 15, 1999, Sydney. Geneve: WMO, p. 279-84.
- SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. (1945) "Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures". in: *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), p.177-99.
- WEBB, C. (1960) "Thermal discomfort in an equatorial climate – A monogram for the equatorial comfort index". *Journal of the IHVE*, 27, p.10.
- YAGLOU, C. P.; MINARD, D. (1957). "Control of heat casualties at military training centers". *A.M.A. Archives of Industrial Health*, 16, p. 302-16.

## 8. AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.