CAPÍTULO 5

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Após a exposição de conceitos sobre os fenómenos de transferência de calor por convecção e radiação, particularmente direccionada para a silhueta humana, procede-se à apresentação dos ensaios realizados em câmara climática (CC) e em túnel aerodinâmico (TA) para Determinação Experimental de Coeficientes de Transferência de Calor por Convecção. Os resultados dos testes realizados em CC, numa gama alargada de condições térmicas, em regime de convecção natural, com o manequim nu, são apresentados e discutidos para as condições estática e dinâmica. Os ensaios realizados em TA, em regime de convecção mista e forçada, centram-se na análise dos resultados obtidos com o manequim vestido e nu, em repouso e em movimento. Para o corpo todo propõem-se correlações entre os parâmetros adimensionais que regem os fenómenos convectivos.

5.1. INTRODUÇÃO

O modo como se processam as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente constitui um tema que continua a suscitar o interesse de várias equipas de investigadores. Neste contexto, tem-se assistido ao desenvolvimento de manequins térmicos cada vez mais sofisticados, capazes de assumir diferentes posturas e de simular, de forma realista, os movimentos de passada. O aparecimento recente de manequins com a capacidade de transpirar contribui também para renovar o interesse por esta área de investigação.

O trabalho experimental apresentado neste capítulo enquadra-se nesta temática. Depois de uma breve fundamentação física, apresentam-se os resultados obtidos.

Considerando os casos do manequim nu e vestido e as posturas estática e dinâmica, abordam-se as questões do isolamento térmico e dos coeficientes de transferência de calor por convecção entre o corpo humano e o ambiente em condições de convecção natural, mista e forçada. Os ensaios foram realizados na câmara climática e no túnel aerodinâmico, equipamentos descritos nas secções (4.2) e (4.4).

5.2. FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA

A transferência de calor entre um dado corpo sólido e o meio que o rodeia pode verificar-se pelos processos de condução, convecção e radiação. No caso do corpo humano, os processos com maior significado são os da convecção e radiação (*vd*. secção 3.5.1), expondo-se nas secções seguintes considerações de índole fundamental sobre estes modos de transferência de calor.

5.2.1. CONVECÇÃO

O estudo da transmissão de calor associada ao mecanismo convectivo representa para a comunidade científica uma tarefa de grande complexidade. De facto, a transmissão de calor por convecção depende de vários factores e, por isso, o estabelecimento de modelos analíticos exactos de solução directa é actualmente inviável. Quando se trata das trocas de calor entre um sólido e um fluido, o problema é contornado recorrendo à *Lei de Arrefecimento de Newton* que, na sua forma integral, é dada por

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \times (t_s - t_a). \qquad (5.1)$$

Esta equação traduz de forma adequada o fenómeno convectivo e estabelece, independentemente da natureza do regime de escoamento, que o fluxo de calor por unidade de área, $\dot{Q}_{conv}$, entre uma superfície à temperatura t_s e o fluido envolvente à temperatura t_a, é proporcional à diferença das suas temperaturas $(t_s - t_a)$. A constante de proporcionalidade denominada coeficiente de transmissão de calor por convecção, h_{conv}, depende, para além da diferença de temperatura, das propriedades do fluido, da natureza do regime e da geometria e rugosidade da superfície.

Na avaliação do balanço térmico global do corpo humano vestido, a troca de calor por convecção é, em termos práticos, equacionada na forma

$$C = f_{cl} \times h_{conv} \times \left(\bar{t}_{cl} - t_a\right), \tag{5.2}$$

onde surge o factor f_{cl} descrito na secção (2.6). Assim, a questão central na resolução de qualquer problema de convecção consiste na determinação do coeficiente de transferência de calor.

5.2.2. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO, h_{conv}

A temperatura média cutânea de uma pessoa nua é normalmente superior à temperatura ambiente. Em consequência, a camada de ar adjacente à superfície é aquecida e a impulsão gravítica resultante da diminuição da densidade do ar gera um fluxo de ar ascendente. Desenvolve-se assim uma camada limite que culmina numa pluma térmica acima do corpo, sendo esta pluma de ar quente ascendente substituída na parte inferior por ar mais frio.

As características deste escoamento, visível recorrendo à técnica Schlieren, dependem da postura da pessoa, da diferença entre a temperatura da superfície do corpo e do ar circundante e da influência do vestuário. Enquanto que ao nível dos tornozelos e pernas o escoamento tem uma velocidade baixa e a camada limite é de pequena espessura, à medida que se desloca no sentido ascendente a velocidade e a espessura da camada limite aumentam. Para um indivíduo nu e em pé, a velocidade máxima do ar ao nível da face está compreendida entre 0,4 e 0,5 m/s, estendendo-se a pluma térmica até pelo menos 1,5 m acima da cabeça, dissipando-se progressivamente por mistura com o ar mais frio do ambiente envolvente (Clark, 1981).

Para além da perda de calor associada à pluma térmica, o conhecimento das suas características é também importante para os estudos relacionados com a qualidade do ar. É através deste escoamento que se efectua o transporte das partículas que se libertam da superfície cutânea arrastando consigo os microorganismos responsáveis por vários tipos de infecções. Neste contexto assume especial significado o estudo de Murakami (2002) que realizou trabalho experimental e numérico de elevado pormenor em particular na zona de inalação de ar. Destaque também para os trabalhos de Hyldgaard (1998) e Borges *et al.* (2002) direccionados para a caracterização da pluma térmica e que concluem na necessidade de investigação mais pormenorizada para uma melhor compreensão dos fenómenos envolvidos.

Assim, em virtude dos distintos regimes de escoamento, são de esperar perdas de calor diferentes nas várias partes do corpo. Nas situações em que o fluido envolvente é o ar, como é o caso do trabalho presente, a parâmetro adimensional normalmente utilizado para identificar a transição entre regime laminar e turbulento é o número de *Grashof*, *Gr*, representando a razão entre as forças de impulsão gravítica e as forças viscosas,

$$Gr = \frac{g \times h^3 \times \left(\overline{T}_{sk} - T_a\right)}{\nu^2 \times T_a}, \tag{5.3}$$

em que g é a aceleração da gravidade [m/s^2], h a altura do indivíduo, $\overline{T}_{sk}$ e T_a a temperatura média da pele e do ar [K], respectivamente, e ν a viscosidade cinemática [m^2/s].

Clark (1981) indica que para um indivíduo nu e em pé, com uma diferença entre a temperatura média cutânea e a temperatura do ar compreendida entre 8 e 10 ºC, o escoamento é laminar até 1 m do chão, tornando-se turbulento a 1,5 m. Por sua vez, Clark e Toy (1975) também para um indivíduo nu e em pé com $\overline{T}_{sk}$ de 306 K e T_a de 298 K sugerem a ocorrência de regime laminar até 0,8 m.

O vestuário altera o desenvolvimento da camada limite na medida em que, sendo a temperatura da superfície exterior menor que a temperatura cutânea, o gradiente de temperatura é mais reduzido. Em determinados casos é mesmo possível obter condições de escoamento laminar ao longo de todo o corpo. Contudo, o parâmetro determinante é a altura e não o gradiente de temperatura, daí o papel de relevo atribuído à postura. Este aspecto é considerado de forma particular no estudo de Quintela *et al.* (2004) em que foram analisadas as três postura mais comuns na civilização ocidental: em pé, sentado e deitado.

Tratando-se de avaliar as perdas de calor associadas ao mecanismo convectivo, a atenção recai, naturalmente, no respectivo coeficiente de transferência de calor. Ao longo dos anos vários investigadores têm vindo a dedicar-se ao seu estudo. No caso da convecção natural, Birkebak (1966) verificou que h_{conv} é proporcional a $\Delta T^{1/4}$. No entanto, como a variação de h_{conv} com a temperatura do vestuário é pequena no intervalo de temperaturas normalmente encontrado, é suficiente admitir um valor constante para o coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo vários os exemplos encontrados na bibliografia (*vd*. Tabela 5.1). Já quando se pretende quantificar o aumento das perdas convectivas devido aos movimentos do corpo os estudos disponíveis são em menor número. Neste caso refere-se o trabalho de Gagge *et al*. (1969) em que se consideraram os movimentos naturais de uma pessoa no desempenho da sua actividade, em ambientes térmicos onde não exista movimentação de ar. Recorrendo a equipamentos desportivos de ginásio, nomeadamente bicicletas e tapetes rolantes, o aumento das perdas por convecção devido ao movimento foi

contabilizado introduzindo o metabolismo na expressão de cálculo do coeficiente de transferência de calor.

Mais recentemente, os estudos têm evoluído no sentido do detalhe considerando o coeficiente de transferência de calor para o corpo todo e para as diferentes partes. Como exemplos mais significativos refiram-se os trabalhos de de Dear *et al.* (1997) realizado com o manequim nu e para as posturas em pé e sentada, os de Oguro *et al.* (2002) para as mesmas duas posturas mas considerando ainda o caso do manequim vestido e, finalmente, o já citado estudo de Quintela *et al.* (2004) também com o manequim nu mas adoptando a postura deitada como complemento às duas já referidas. Sublinhe-se igualmente o trabalho de Omori *et al*. (2004) em que se comparam os resultados de h_{conv} obtidos por via numérica e experimental. Na Tabela 5.1 sintetizam-se os resultados obtidos por alguns autores para o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Tabela 5.1 Expressões e valores de h_{conv} para convecção natural.

h_{conv} [W/m^2 ºC]	v_a [m/s]	Condições	Referência
$h_{conv} = 2{,}38 \times (\bar{t}_{cl} - t_a)^{0{,}25}$	v_a < 0,15	Sujeito sentado e em pé	Nielsen e Pedersen (1952) e adoptada por Fanger (1970)
5,1	v_a < 0,15	Sujeito reclinado	Colin e Houdas (1967)
4,0	v_a < 0,15	Sujeito em pé	Seppänen *et al*. (1972)
3,1	v_a <0,2	Sujeito sentado	Mitchell (1974)
$h_{conv} = 1{,}16 \times (M - 50)^{0{,}39}$	65< M <175 M, [W/m^2]	Sujeito activo	Gagge *et al*. (1976)
3,3	v_a < 0,1	Sujeito sentado	de Dear *et al*. (1997)
3,4	v_a < 0,1	Sujeito em pé	de Dear *et al*. (1997)
$h_{conv} = 0{,}78 \times (\bar{t}_{sk} - t_o)^{0{,}59}$	v_a < 0,1	Sujeito sentado	Oguro *et al*. (2002)
$h_{conv} = 1{,}21 \times (\bar{t}_{sk} - t_o)^{0{,}43}$	v_a < 0,1	Sujeito em pé	Oguro *et al*. (2002)
3,3	v_a < 0,1	Sujeito em pé	Omori *et al*. (2004)
$h_{conv} = 2{,}48 \times (\bar{t}_{sk} - t_o)^{0{,}18}$	v_a < 0,15	Sujeito deitado	Quintela *et al.* (2004)
$h_{conv} = 1{,}94 \times (\bar{t}_{sk} - t_o)^{0{,}23}$	v_a < 0,15	Sujeito sentado	Quintela *et al.* (2004)
$h_{conv} = 2{,}02 \times (\bar{t}_{sk} - t_o)^{0{,}24}$	v_a < 0,15	Sujeito em pé	Quintela *et al.* (2004)

No que diz respeito à convecção forçada, as perdas de calor são normalmente superiores. A camada limite e a pluma térmica acima do corpo modificam-se substancialmente, deflectindo-se no sentido do escoamento. As variáveis determinantes são a velocidade média, a direcção e o regime do escoamento, embora a intensidade e a escala da

turbulência também tenham um contributo significativo (Quintela, 1989). Neste caso, o parâmetro adimensional utilizado para identificar a transição entre regime laminar e turbulento é o número de *Reynolds*, *Re*,

$$Re = \frac{\rho \times u \times L}{\mu} = \frac{u \times L}{\nu} \tag{5.4}$$

onde ρ é a massa específica [kg/m^3], u a velocidade característica [m/s], L a dimensão característica e μ a viscosidade absoluta [N s/m^2].

Na quantificação das perdas de calor pelo corpo humano tem-se recorrido ao próprio homem, a dispositivos com formas geométricas semelhantes e mais recentemente a manequins térmicos. A maioria das expressões propostas para o coeficiente de transferência de calor por convecção descreve a dependência de h_{conv} com a velocidade do ar (v_a) na forma

$$h_{conv} = const. \times v_a^n \,. \tag{5.5}$$

A generalidade dos autores indica um valor para *n* situado entre 0,5 e 0,6 (de Dear *et al.*, 1997). Mochida (1977), McIntyre (1980), Holmér *et al.* (1999) e ASHRAE (2001), efectuaram uma revisão das diferentes expressões, constituindo a Tabela 5.2 uma súmula de algumas das mais representativas. Os estudos mais recentes têm admitido outras posturas para além da de em pé, pelo que nestes casos se considerou necessário especificar a qual se referem as expressões apresentadas.

A maioria dos trabalhos até agora publicados é de carácter experimental sendo o escoamento obtido através de túneis de vento, simulando-se por isso escoamentos unidireccionais. Refiram-se como exemplos os trabalhos de de Dear *et al.* (1997), Yang *et al.* (2002) e Silva e Coelho (2002) realizados com manequins térmicos expostos a ângulos de incidência distintos e para as posturas em pé e sentado. A aplicabilidade destes resultados é sobretudo para a condição do manequim em repouso, uma vez que na presença de movimento, o comportamento do escoamento é modificado e afasta-se do evidenciado por um escoamento unidireccional. Durante a marcha, apenas o tronco e a cabeça executam movimentos que se aproximam de uma translação linear, já que os membros superiores e inferiores realizam movimentos oscilantes, aproximando-se de um carácter pendular nos braços e coxas, sendo mais irregulares e incaracterísticos nos antebraços e pernas.

Um apontamento final, pela sua especificidade, para os trabalhos de Clark *et al.* (1976*a*, 1976*b*), e Clark *et al.* (1977), orientados para a avaliação das características do vestuário do pessoal afecto às plataformas de aterragem de helicópteros, de navios destinados a missões no Árctico. Estes estudos tiveram em consideração a intensidade e a escala da

turbulência e concluíram que na presença de escoamentos altamente turbulentos, como é o caso dos originados por helicópteros, o valor de h_{conv} pode ser muito superior ao estimado pelas expressões sugeridas na literatura. Para uma velocidade média de 20 m/s obtiveram-se valores de h_{conv} superiores a 80 W/m^2 K, enquanto que os resultados obtidos a partir das expressões propostas por Winslow *et al.* (1939) e Kerslake (1972), por exemplo, indicam valores próximos de 54 e 37 W/m^2 K, respectivamente.

Tabela 5.2 Expressões de h_{conv} para convecção forçada.

h_{conv} [W/m^2 ºC]	Referência	h_{conv} [W/m^2 ºC]	Referência
$h_{conv} = 12{,}1 \times v_a^{0{,}5}$	Winslow *et al.* (1939)	$h_{conv} = 7{,}2 \times v_a^{0{,}6}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 2{,}7 + 8{,}7 \times v_a^{0{,}67}$	Colin e Houdas (1967)	$h_{conv} = 7{,}3 \times v_a^{0{,}5}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 8{,}6 \times v_a^{0{,}531}$	Gagge *et al.* (1969)	$h_{conv} = 7{,}0 \times v_a^{0{,}391}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 6{,}5 \times v_a^{0{,}39}$	Nishi e Gagge (1970)	$h_{conv} = 11{,}6 \times v_a^{0{,}8}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 8{,}3 \times \sqrt{v_a}$	Kerslake (1972)	$h_{conv} = 2{,}7 + 6{,}5 \times v_a^{0{,}67}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 14{,}8 \times v_a^{0{,}69}$	Seppänen *et al.* (1972)	$h_{conv} = \sqrt[3]{270 \times v_a^2 + 23}$	*Citada por Mochida (1977)*
$h_{conv} = 3{,}5 + 5{,}2 \times v_a$ *para* $v_{ar} \leq 1\ m/s$	Missenard (1973)	$h_{conv} = 15{,}4 \times v_a^{0{,}63}$ (*)	Ichihara *et al.* (1995)
$h_{conv} = 8{,}7 \times v_a^{0{,}6}$ *para* $v_a > 1\ m/s$	Missenard (1973)	$h_{conv} = 10{,}3 \times v_a^{0{,}6}$ (*)	de Dear *et al.* (1997)
$h_{conv} = 8{,}3 \times v_a^{0{,}6}$	Mitchell (1974)	$h_{conv} = 3{,}9 \times v_a + 3{,}6$ (*) *Escoamento de frente*	Silva e Coelho, (2002)
$h_{conv} = 5{,}7 \times (M - 0{,}85)^{0{,}39}$	Gagge *et al.* (1976))	$h_{conv} = 4{,}0 \times v_a + 3{,}6$ (*) *Escoamento de lado*	Silva e Coelho, (2002)
$h_{conv} = 8{,}2 \times v_a^{0{,}5}$	*Citada por Mochida (1977)*	$h_{conv} = 4{,}2 \times v_a + 3{,}5$ (*) *Escoamento de costas*	Silva e Coelho, (2002)
(*) – Manequim em pé			

5.2.3. RADIAÇÃO

Toda a matéria emite energia na forma de ondas electromagnéticas em virtude da sua temperatura, ligando-se a noção de *radiação térmica* à parte do espectro electromagnético que lhe está associada. Esta emissão pode verificar-se a partir de gases, líquidos ou sólidos, podendo ser atribuída a alterações verificadas nos electrões dos átomos ou moléculas

constituintes. Enquanto que a condução e a convecção necessitam de um meio material para efectuar a transmissão, no caso da radiação tal não é necessário, sendo inclusivamente no vácuo que a transmissão é mais eficaz (Incropera e DeWitt, 2002). Também contrariamente à condução e à convecção, para que ocorra radiação não é necessária a existência de um gradiente de temperatura. Por exemplo, duas superfícies planas e paralelas à mesma temperatura e separadas pelo vácuo transmitem energia radiante, embora se mantenham em equilíbrio (*Princípio de Prevost*).

A quantidade máxima de energia libertada por unidade de área é determinada recorrendo à *Lei de Stefan-Boltzmann*, em função da quarta potência da temperatura absoluta da superfície,

$$\dot{Q}_{rad,cn} = \sigma \times T_{cn}^4 , \qquad (5.6)$$

onde σ representa a constante de Stefan-Boltzmann igual a 5,67 × 10^{-8} W/m^2 K^4. Esta definição tem subjacente o conceito de corpo negro definido como um corpo ideal que absorve toda a radiação térmica nele incidente e que, a uma dada temperatura, emite a máxima energia possível com igual intensidade em todas as direcções, designada como emissão difusa.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é, para a mesma temperatura, inferior ao do corpo negro, sendo obtido a partir de

$$\dot{Q}_{rad,s} = \varepsilon \times \sigma \times T_s^4 , \qquad (5.7)$$

onde ε é a emissividade, definida pela razão entre a energia radiante emitida pela superfície real, $\dot{Q}_{rad,s}$, e a que seria emitida por uma superfície negra à mesma temperatura, $\dot{Q}_{rad,cn}$. Com valores compreendidos entre 0 e 1, a emissividade traduz a eficiência de uma superfície em emitir energia radiante.

Quando se trata de estimar a troca de energia radiante entre superfícies reais, a equação (5.7) deixa de ser válida devido às reflexões múltiplas que podem ocorrer em cada superfície. Esta troca depende, para além das propriedades radiantes das superfícies, do modo como estas se "*vêem*" umas às outras. As dificuldades são ultrapassadas com recurso a configurações específicas e simplificações. Um caso particular, que sucede com frequência, diz respeito à troca de calor entre uma superfície pequena, a uma temperatura T_s, e uma muito maior que a envolve a uma temperatura T_{env}. Nos estudos sobre os mecanismos de troca de calor entre o ser humano e o ambiente recorre-se normalmente a esta configuração, considerando o corpo humano no interior de um compartimento, em que a envolvente

corresponde às paredes cuja superfície é muito maior que a do corpo. Neste pressuposto, com base no conceito de corpo cinzento definido como um corpo cuja emissividade é constante com o comprimento de onda, e recorrendo à *Lei de Kirchhoff*, que estabelece que a emissividade monocromática de uma superfície é igual ao seu coeficiente de absorção monocromático, qualquer que seja a diferença entre as temperaturas correspondentes à radiação emitida e à radiação incidente, a quantidade de calor por radiação perdida pelo corpo cinzento completamente envolvido por superfícies negras é dada por

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times \left(T_s^4 - T_{env}^4\right). \tag{5.8}$$

Nos espaços normalmente ocupados pelas pessoas, a temperatura das superfícies envolventes, regra geral, não é uniforme, pelo que se recorre ao conceito de temperatura média radiante, $\overline{T}_r$, definida como a temperatura uniforme de um compartimento no qual o ocupante troca a mesma quantidade de calor por radiação que no ambiente actual. Assim, considerando um indivíduo com uma temperatura média da superfície de corpo vestido $\overline{T}_{cl}$, num compartimento caracterizado por uma temperatura média radiante $\overline{T}_r$, o fluxo de calor radiativo perdido por unidade de área de corpo despido para o ambiente é obtido por

$$\dot{Q}_{rad} = f_{cl} \times f_r \times \varepsilon \times \sigma \times \left(\overline{T}_{cl}^4 - \overline{T}_r^4\right). \tag{5.9}$$

Nesta expressão intervêm, para além do factor de área do vestuário (*vd*. secção 2.6), o factor de área radiativa efectiva, f_r, definido como a fracção da superfície cutânea participante nas trocas de calor por radiação

$$f_r = \frac{A_r}{A_{DuBois}}, \tag{5.10}$$

em que A_r representa a área radiante efectiva. Este termo corresponde ao factor de forma do corpo todo para a envolvente, uma vez que, independentemente da postura, o corpo troca energia por radiação com ele próprio. Na Tabela 5.3 apresentam-se valores de f_r em função da postura.

Tabela 5.3 Valores de f_r.

	Guibert e Taylor (1952)	Fanger *et al.* (1970)	Mairiaux e Malchaire (1990)	Horikoshi *et al.*, (1990)	Miyazaki *et al.*, (1995)	Tanabe *et al.*, (2000)	ISO 7933
Sentado	0,70	0,696	0,70	0,740	0,775	0,691	0,70
De pé	0,78	0,725	0,77	0,803	0,834	0,744	0,77
Agachado	0,72	---	0,66	---	---	---	0,67

5.2.4. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO, h_{rad}

Nos estudos sobre as trocas de calor entre o ser humano e o ambiente, assim como em muitas outras aplicações, é conveniente exprimir a troca de calor por radiação de forma análoga à troca de calor por convecção. Neste caso as trocas de calor radiativas são normalmente combinadas com as trocas convectivas, pelo que é de todo conveniente representar o fluxo de calor por radiação, *R*, de forma idêntica à *Lei de Arrefecimento de Newton*. A expressão (5.9) toma então a forma linearizada

$$R = f_{cl} \times h_{rad} \times \left(\bar{t}_{cl} - \bar{t}_r\right). \tag{5.11}$$

O coeficiente de transmissão de calor por radiação linearizado é obtido igualando as equações (5.9) e (5.11)

$$h_{rad} = \frac{\varepsilon \times \sigma \times f_r \times \left(\overline{T}_{cl}^4 - \overline{T}_r^4\right)}{\overline{T}_{cl} - \overline{T}_r}. \tag{5.12}$$

Quando $\left|\overline{T}_{cl} - \overline{T}_r\right| << \overline{T}_{cl}$ é usual fazer-se a seguinte simplificação

$$\frac{\left(\overline{T}_{cl}^4 - \overline{T}_r^4\right)}{\overline{T}_{cl} - \overline{T}_r} \cong 4 \times \left(\frac{\overline{T}_{cl} + \overline{T}_r}{2}\right)^3, \tag{5.13}$$

pelo que h_{rad} toma a forma

$$h_{rad} = 4 \times \varepsilon \times \sigma \times f_r \times \left(\frac{\overline{T}_{cl} + \overline{T}_r}{2}\right)^3, \tag{5.14}$$

ou

$$h_{rad} = 4 \times \varepsilon \times \sigma \times f_r \times \left(273{,}15 + \frac{\bar{t}_{cl} + \bar{t}_r}{2}\right)^3. \tag{5.15}$$

A determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor por radiação implica procedimentos experimentais que, além de morosos, se revestem de alguma complexidade. Como consequência, o número de estudos disponíveis na bibliografia é escasso, em particular quando se pretendem resultados mais detalhados referentes às diferentes partes do corpo. Neste domínio destacam-se os trabalhos de referência efectuados por Stolwijk (1970), Ichihara *et al*. (1995), de Dear *et al*. (1997) e Quintela *et al*. (2004). Enquanto que o estudo de Stolwijk se baseou em aproximações a formas geométricas para

algumas partes do corpo, os restantes foram realizados com manequins térmicos. Na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5 coligem-se os resultados obtidos nestes estudos.

Tabela 5.4 Valores de h_{rad} [W/m^2 ºC] propostos por Stolwijk (1970) e Ichihara *et al*. (1995).

Parte do corpo	**Stolwijk, 1970**	**Ichihara *et al*., 1995** *(ε = 0,96)*
Pés	4,7	7,3
Pernas	5,2	4,8
Coxas		4,2
Anca		3,9
Cabeça	6,4	4,3
Mãos	3,5	3,7
Antebraços		3,9
Braços	5,2	4,0
Peito	5,2	3,8
Costas		3,6
Total	**---**	**---**

Tabela 5.5 Valores de h_{rad} [W/m^2 ºC] propostos por de Dear *et al*. (1997) e Quintela *et al*. (2004).

Secção do Manequim	**de Dear *et al*., 1997** *(ε = 0,95)*		**Quintela *et al*., 2004** *(ε = 0,95)*		
	Sentado	**Em Pé**	**Sentado**	**Em Pé**	**Deitado**
1 – Pé esquerdo	4,2	3,9	4,7	5,0	5,2
2 – Pé direito	4,2	3,9	4,9	5,0	5,2
3 – Perna esquerda	5,3	5,3	4,7	5,0	4,2
4 – Perna direita	5,3	5,3	4,6	5,1	4,7
5 – Coxa esquerda	4,3	4,3	4,6	4,8	4,5
6 – Coxa direita	4,3	4,3	4,2	4,4	4,0
7 – Anca	4,2	4,2	4,4	4,5	3,9
8 – Cabeça	4,1	4,1	5,7	5,7	5,6
9 – Mão esquerda	4,1	4,1	4,0	4,3	4,3
10 – Mão direita	4,1	4,1	4,6	4,1	4,1
11 – Antebraço esquerdo	4,9	4,9	4,0	4,5	4,1
12 – Antebraço direito	4,9	4,9	4,4	4,1	3,9
13 – Braço esquerdo	5,2	5,2	4,7	4,9	4,8
14 – Braço direito	5,2	5,2	4,4	4,2	4,1
15 – Peito	4,5	4,5	3,5	4,5	4,0
16 – Costas	4,4	4,4	3,9	4,2	3,5
Total	**4,5**	**4,5**	**4,4**	**4,6**	**4,3**

Tendo em conta os mecanismos que regem a troca de calor por radiação e convecção, para a separação das duas componentes surgem duas alternativas:

- *Anulação das trocas de calor por convecção mediante imposição de uma temperatura do ar circundante do manequim igual à temperatura da sua superfície. Nestas condições toda a energia trocada será por radiação.*

- *Anulação das trocas de calor por radiação através da criação de uma envolvente em que a temperatura das superfícies sejam iguais às da superfície do manequim. Nestas circunstâncias toda a energia trocada será por convecção.*

Para além de exigirem um manequim com o modo de funcionamento de temperatura constante, opção não disponível na "*Maria*", com o pavimento opaco da câmara climática será difícil evitar uma certa estratificação térmica. Neste contexto, serve de exemplo o trabalho efectuado por Ichihara *et al*. (1995) em que se obtiveram valores elevados para as partes do corpo mais próximas do pavimento, nomeadamente pés e pernas, o que reflecte provavelmente o efeito de uma estratificação térmica ocorrida na câmara climática (de Dear *et al*., 1997).

Assim, seguindo a metodologia adoptada por de Dear *et al*. (1997), Quintela *et al*. (2004) revestiram o manequim térmico com uma folha de alumínio de baixa emissividade, de modo a que as trocas de calor sejam quase restritas a fenómenos convectivos. Enquanto que o ensaio com revestimento permite determinar a troca de calor por convecção, o teste sem revestimento estabelece a energia trocada por convecção e radiação. A comparação dos resultados obtidos numa e noutra situação possibilita o cálculo dos coeficientes de transferência de calor. Esta técnica tem ainda a vantagem de não necessitar nem de um controlo preciso da temperatura da superfície do manequim térmico nem da sincronização com a temperatura do ar ou da temperatura das superfícies envolventes para permitir separar as componentes convectiva e radiativa. Uma vez que os resultados obtidos por Quintela *et al*. (2004) se basearam em testes efectuados com o manequim térmico utilizado neste estudo, foram estes os valores considerados.

5.3. ENSAIOS REALIZADOS EM CÂMARA CLIMÁTICA

Nesta secção apresentam-se e analisam-se os testes realizados em câmara climática (*vd*. secção 4.2) em condições de convecção natural. Após a descrição dos ensaios, procede-se à exposição comentada dos resultados do isolamento térmico da camada superficial de ar e do coeficiente de transferência de calor por convecção em condições estáticas e dinâmicas, considerando neste caso diferentes velocidades de passada. Enquanto que a secção (5.3.3.2) se

refere ao corpo todo e engloba o isolamento térmico da camada superficial de ar e os coeficientes globais de transferência de calor por convecção, na secção (5.3.3.3) tecem-se considerações sobre os resultados de h_{conv} obtidos para os 16 segmentos. Esta secção termina com uma representação gráfica do tipo radar, adequada para uma análise comparativa e sobretudo reveladora da diversidade de coeficientes locais.

5.3.1. METODOLOGIA

Quando se trata do balanço térmico global do corpo humano, a componente relativa às trocas de calor por condução é normalmente desprezada porque se restringe às partes do corpo em contacto directo com superfícies de elementos sólidos. Assim, as trocas de calor sensível reduzem-se aos mecanismos convectivo e radiativo e traduzem-se pela expressão

$$\dot{Q}_s = h_{conv}\left(\bar{t}_{sk} - t_a\right) + h_{rad}\left(\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r\right). \tag{5.16}$$

Para cada uma das partes do manequim térmico, a equação (5.16) transforma-se em

$$\dot{Q}_{s,i} = h_{conv,i}\left(\bar{t}_{sk,i} - t_a\right) + h_{rad,i}\left(\bar{t}_{sk,i} - \bar{t}_r\right). \tag{5.17}$$

Explicitando a expressão (5.17) para o coeficiente de transmissão de calor por convecção, obtém-se

$$h_{conv,i} = \frac{\dot{Q}_{s,i} - h_{rad,i}\left(\bar{t}_{sk,i} - \bar{t}_r\right)}{\left(\bar{t}_{sk,i} - t_a\right)}, \tag{5.18}$$

sendo esta a equação utilizada para o cálculo de h_{conv} das várias partes.

Em relação ao isolamento térmico da camada superficial de ar, I_a, definido como a resistência à transferência de calor por radiação e convecção entre a pele ou a superfície exterior do vestuário e o ar ambiente, tem-se em consideração a exposição feita na secção (2.2). A determinação experimental deste parâmetro é normalmente efectuada com manequins térmicos sem vestuário. Conhecendo-se a temperatura média da superfície da pele, $\bar{t}_{sk}$, e o fluxo de calor sensível, $\dot{Q}_s$, I_a [*clo*] é expresso a partir de

$$I_a = \frac{\bar{t}_{sk} - t_o}{0{,}155\dot{Q}_s}. \tag{5.19}$$

Na literatura encontram-se várias referências a esta grandeza, nomeadamente para a postura estática. Soltynski *et al*. (2000*a*), num estudo efectuado com pessoas e com termo-manequins destinado à avaliação de vestuário médico, sugerem 0,78 *clo*. McCullough (2001) utilizou o valor 0,7 *clo* num estudo sobre a relação entre o conforto térmico e o uso de vestuário. Olesen *et al*. (1982) e McCullough *et al*. (1989) obtiveram 0,72 *clo* em condições de ar calmo. Nielsen *et al*. (1985) num trabalho que contou com a participação de pessoas de ambos os géneros, indicam 0,86 *clo* para homens e 0,95 *clo* para mulheres.

Já no que diz respeito a avaliações em condições dinâmicas, as informações disponíveis são em menor número. Kim e McCullough (2000) num estudo com 30 conjuntos de vestuário para ambientes térmicos frios indicam 0,68 *clo* para a postura estática e 0,49 *clo* para uma velocidade de marcha de 90 passos por minuto. Por sua vez Olesen *et al*. (1982) registaram 0,58 *clo* num manequim a andar de bicicleta.

5.3.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

A realização deste tipo de ensaios implica custos de operação significativos que impedem a sua repetição com frequência, em particular quando se pretende uma gama alargada de condições ambientais. Face às condições de operacionalidade da câmara climática e dado que os ensaios foram efectuados no período de Inverno, em Novembro e Dezembro, foram seleccionadas 5 temperaturas do ar de insuflação: 10, 15, 20, 25 e 30ºC.

Os testes foram realizados com o manequim parado e em movimento, tendo neste caso sido simuladas três velocidades de passada: 20 passos por minuto (≅ 0,23 m/s), 30 passos por minuto (≅ 0,34 m/s) e 45 passos por minuto (≅ 0,51 m/s). Depois do ajuste da velocidade de marcha com uma tolerância máxima de ± 2 passos por minuto, foi permitido um período de estabilização ao manequim. Este prolongou-se em média por 30 minutos, seguindo-se o período de aquisição de dados com uma duração de pelo menos 20 minutos, dos quais apenas os 10 minutos finais foram considerados.

Como se pretendiam condições com velocidade do ar nula no interior da câmara, optou-se pelo pavimento de placas de madeira forçando todo o ar proveniente dos grupos de climatização a circular pela caixa-de-ar. Esta disposição construtiva implica, conforme já referido, um elevado tempo de resposta do sistema. Uma vez que os ensaios foram realizados no Inverno, para as temperaturas mais baixas foram necessárias duas a três horas de

estabilização. Contudo, para uma temperatura do ar de insuflação de 25ºC, obtiveram-se condições de estabilidade após cerca de 7 horas. Deste modo, para o *setpoint* de 30ºC e de forma a permitir a realização de todos os ensaios no mesmo dia, a instalação experimental foi deixada em funcionamento durante a noite.

A cada temperatura do ar de insuflação correspondeu um dia de ensaio, garantindo-se assim aproximadamente as mesmas condições ambientais em todos os testes com o manequim parado e em movimento. Para aferir a repetibilidade dos resultados foram realizados dois ensaios independentes com o *setpoint* da câmara a 15 ºC com as diferenças a não excederem os 3 %. No final, foram necessários seis dias para a execução da totalidade de ensaios.

5.3.3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.3.3.1. Condições térmicas dos ensaios

Na Tabela 5.6 resumem-se as condições ambientais dos ensaios realizados com o manequim parado e em movimento, para as cinco temperaturas do ar de insuflação. Verificou-se que para as temperaturas mais elevadas é possível obter ambientes uniformes e muito próximos do imposto na temperatura do ar de insuflação das paredes. Os valores mais baixos permitem também condições de estabilidade, embora com uma maior diferença em relação ao *setpoint*. A temperatura do ar variou entre os 12 e os 30 ºC, enquanto que a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura operativa foi, em termos médios, de 0,2 ºC, não excedendo contudo os 0,4 ºC. A gama de temperaturas na câmara climática permitiu a realização de ensaios caracterizados por diferenças ($\bar{t}_{sk} - t_o$) entre 4,8 e 16,8 ºC.

A temperatura média radiante, $\bar{t}_r$, foi estimada a partir de t_a e t_o de acordo com a expressão ($\bar{t}_r = 2 \times t_o - t_a$) sugerida na Norma ISO 7726 (1998), para os casos em que a diferença entre a temperatura do ar e média radiante é pequena (< 4,0 ºC). Em alguns ensaios foi usado o monitor de stresse térmico, Type 1219, da Brüel & Kjær (1985) (*vd*. secção 4.5.3), para aferir da diferença vertical de temperatura. Colocando os 3 conjuntos de sensores ao nível da cabeça, abdómen e tornozelo do manequim, a monitorização da temperatura do ar permitiu constatar uma estratificação normalmente inferior a 0,4ºC.

Tabela 5.6 Condições térmicas dos ensaios

Nº passos/min	Temp. ar insuflação [ºC]	t_a [ºC]	t_o [ºC]	$\bar{t}_r = 2.t_o - t_a$ [ºC]	$\bar{t}_{sk}$ Corpo todo [ºC]	$\dot{Q}_s$ Corpo todo [W/m^2]
0	10	12,0	11,9	11,8	28,7	138,0
	15	16,3	16,1	15,9	30,0	114,9
	20	20,3	20,1	19,9	31,4	91,9
	25	25,1	24,9	24,7	32,9	63,0
	30	29,8	29,5	29,2	34,4	36,6
20	10	12,0	11,9	11,8	28,4	141,5
	15	16,4	16,3	16,2	30,0	117,9
	20	20,8	20,6	20,4	31,4	91,5
	25	25,2	25	24,8	32,9	64,6
	30	29,9	29,6	29,3	34,4	37,0
30	10	12,1	12,0	11,9	28,2	141,7
	15	16,5	16,4	16,3	29,9	119,1
	20	20,7	20,5	20,3	31,3	93,9
	25	25,3	25,1	24,9	32,9	64,9
	30	29,9	29,6	29,3	34,4	38,0
45	10	12,2	12,1	12,0	27,9	142,3
	15	16,6	16,4	16,2	29,7	121,7
	20	20,5	20,2	19,9	30,9	97,5
	25	25,5	25,2	24,9	32,8	66,1
	30	29,9	29,5	29,1	34,3	39,4

5.3.3.2. Resultados globais

Face à natureza experimental deste estudo, observam-se nalguns casos afastamentos de valores relativamente ao que seria de esperar, assim como diferenças entre partes do corpo teoricamente simétricas. Contudo, tais discrepâncias não pronunciam divergências permanentes nem significam um funcionamento menos próprio de parte(s) do manequim, como testes posteriores têm vindo a comprovar. Todavia, limitam a análise e uma discussão mais conclusiva, pelo que somente se anotam as tendências dos comportamentos mais consistentes.

A Figura 5.1 mostra a variação de I_a com a temperatura do ar de insuflação para diferentes velocidades de passada, enquanto que a relação entre I_a estático e dinâmico é representada na Figura 5.2.

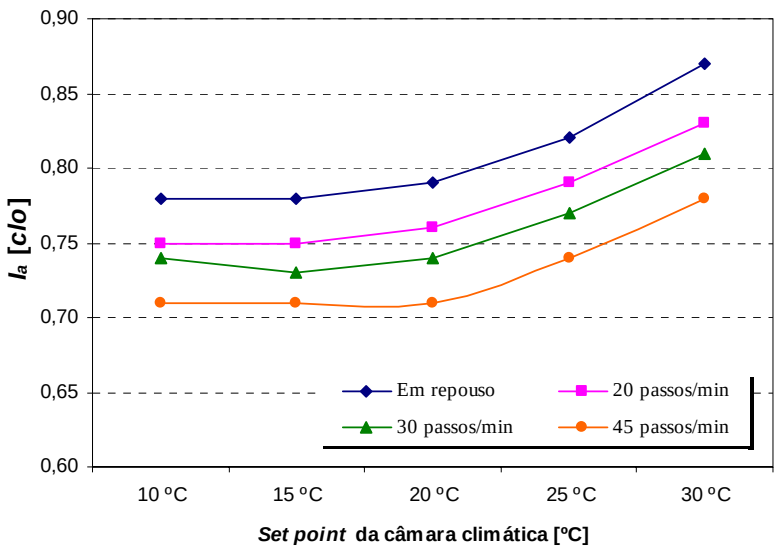


Figura 5.1 Variação do isolamento térmico da camada superficial de ar com a temperatura do ar de insuflação.

Os resultados mostram um aumento do isolamento térmico da camada superficial de ar com a temperatura do ar em todas as condições testadas. Os valores mais elevados de I_a obtiveram-se com o manequim em repouso, enquanto que os menores corresponderam à velocidade de passada de 45 passos por minuto. Nestas duas condições, o isolamento térmico da camada superficial de ar variou de 0,78 a 0,87 e de 0,71 a 0,78 *clo*, respectivamente. A redução no valor do isolamento devido aos movimentos de passada oscilou entre os 11,5 % obtidos no ensaio com o *setpoint* da câmara a 30 ºC, e os 9,8% para os ensaios com a temperatura do ar de insuflação de 10 e 15 ºC.

Mesmo quando um indivíduo permanece em pé numa posição estática, a camada de ar ascendente adjacente à pele pode apresentar alguma instabilidade devida a fenómenos de separação. Este comportamento, obviamente, é amplificado com os movimentos naturais do corpo. A espessura da camada superficial de ar é assim alterada, diminuindo o isolamento por ela proporcionado. Ao mesmo tempo, a capacidade para transferir calor traduzida pelo respectivo coeficiente de transferência de calor aumenta, como se verá de seguida.

A avaliação dinâmica de I_a tem vindo a ser analisada por Ingvar Holmér e George Havenith. No que se segue apresenta-se um estudo comparativo entre os valores dinâmicos obtidos neste trabalho e os que resultam da aplicação das expressões sugeridas por aqueles autores. Apesar de já apresentadas na secção (2.9.3), são aqui novamente explicitadas com o intuito de facilitar a análise. Holmér *et al.* (1999) indicam a expressão (5.20) e Holmér e Havenith (2001) propõem a equação (5.21), ambas limitadas a uma velocidade de marcha de 1,2 m/s e velocidades de escoamento de 2 e 1 m/s, respectivamente.

$$\frac{I_{a_{dinâmico}}}{I_a} = e^{\left(0{,}126 - 0{,}899 \times v_a + 0{,}246 \times v_a^2 - 0{,}313 \times w_s + 0{,}097 \times w_s^2\right)} \tag{5.20}$$

$$\frac{I_{a_{dinâmico}}}{I_a} = e^{\left(-0{,}472 \times v_a + 0{,}047 \times v_a^2 - 0{,}342 \times w_s + 0{,}117 \times w_s^2\right)} \tag{5.21}$$

Embora estas expressões considerem a influência simultânea da velocidade do escoamento e da velocidade de passada, nesta secção apenas se estudou a variação da marcha dado que os ensaios foram efectuados em condições de ar calmo ($v_a \cong 0{,}1$ m/s). Para as condições de ensaio presentes, correspondentes a 20, 30 e 45 passos por minuto, a Figura 5.2 ilustra a análise comparativa.

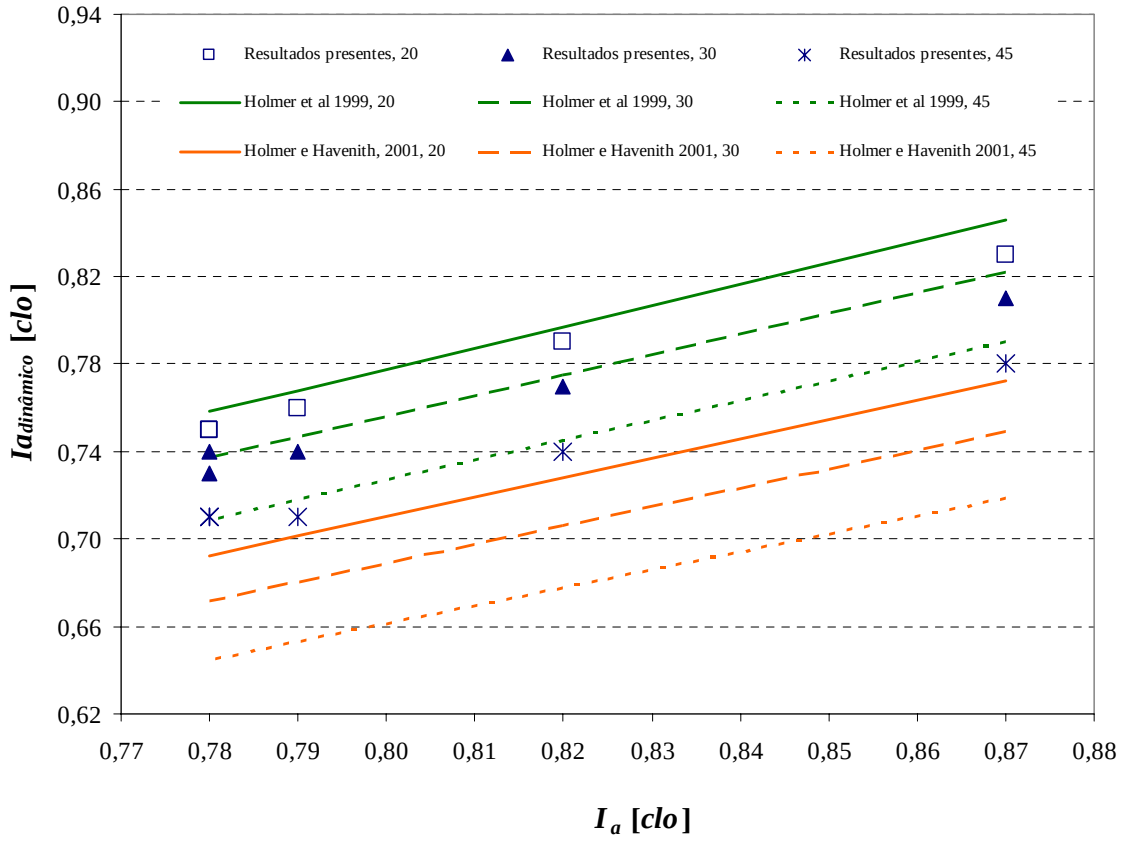


Figura 5.2 Relação entre I_a e $I_{a\ dinâmico}$.

Na generalidade os resultados obtidos com as três velocidades testadas são semelhantes. A Figura 5.2 mostra que o efeito dos movimentos do corpo apresenta uma forte correlação com o nível de I_a correspondente ao manequim em repouso para todas as velocidades de passada e põe em evidência a redução do isolamento com o aumento da velocidade de marcha. Por outro lado, verifica-se que a equação proposta por Holmér *et al.*

(1999) reproduz bem os resultados presentes enquanto que a de Holmér e Havenith (2001) os subestima. Relativamente à velocidade de 45 passos por minuto, os erros relativos médios são de +0,5% e -9,4%, respectivamente para as expressões de Holmér *et al.* (1999) e de Holmér e Havenith (2001). Para as restantes velocidades testadas os erros relativos correspondentes são de +0,7% e -9,0% para 30 passos por minuto, e de +1,2% e -8,2% para 20 passos por minuto. É ainda de salientar a diferença observada entre as correlações (5.20) e (5.21). Apesar de Holmér e Havenith integrarem as equipas de ambos os estudos, não foi possível encontrar uma explicação para a diferença observada.

Na Figura 5.3 representam-se os coeficientes de transferência de calor por convecção para o corpo todo. Os resultados mostram a nítida dependência do coeficiente convectivo com a diferença de temperatura, mesmo em situação dinâmica. Para as temperaturas do ar de insuflação mais elevadas, a temperatura do ar aproxima-se da temperatura da pele, pelo que a força motriz da convecção natural ($\bar{t}_{sk} - t_a$) é atenuada. São também evidentes as diferenças entre a postura estática e as três velocidades de passada testadas. Os valores mais elevados correspondem à marcha de 45 passos/min, enquanto que os menores são obtidos com o manequim em repouso. Nestas duas situações, h_{conv} variou entre 4,4 e 3,4 W/m^2 ºC, respectivamente. Trabalhos idênticos realizados por outros autores corroboram os resultados obtidos neste estudo. Para convecção natural e postura em pé, Oguro *et al*. (2002) obtiveram valores com a mesma ordem de grandeza. de Dear *et al*. (1997) e Quintela *et al*. (2004) propõem 3,4 W/m^2 ºC.

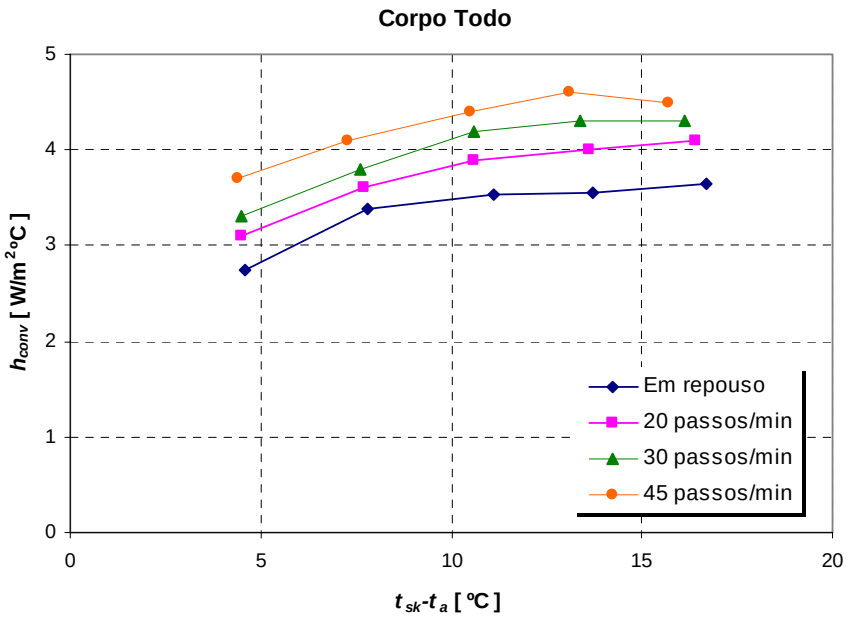


Figura 5.3 Coeficientes de transferência de calor por convecção para o corpo todo.

Sob a forma adimensional, no estudo de processos de convecção natural é reconhecida a importância do número de *Grashof* e a sua influência sobre a variação do número de *Nusselt*. Nestas abordagens faz-se uso das definições clássicas dos números de *Grashof*, apresentada na equação (5.3) e de *Nusselt*

$$Nu = \frac{h_{conv} \times L}{K_f}, \tag{5.22}$$

onde K_f representa a condutibilidade térmica do fluido [W/m K] e L a dimensão característica, neste caso a altura do manequim (h = 1,68 m). As propriedades físicas do ar, nomeadamente a viscosidade cinemática e a condutibilidade térmica do fluido são normalmente calculadas à temperatura de película t_m, definida como,

$$t_m = \frac{t_{sk} + t_a}{2}, \tag{5.23}$$

Tendo Gaspar (2004) efectuado um trabalho idêntico com os mesmos dispositivos experimentais (câmara climática e manequim térmico) para o caso do manequim em repouso, considerou-se interessante reunir os resultados obtidos nos dois estudos. Assim, na Figura 5.4 mostra-se a correlação dos dados experimentais sob a forma adimensional.

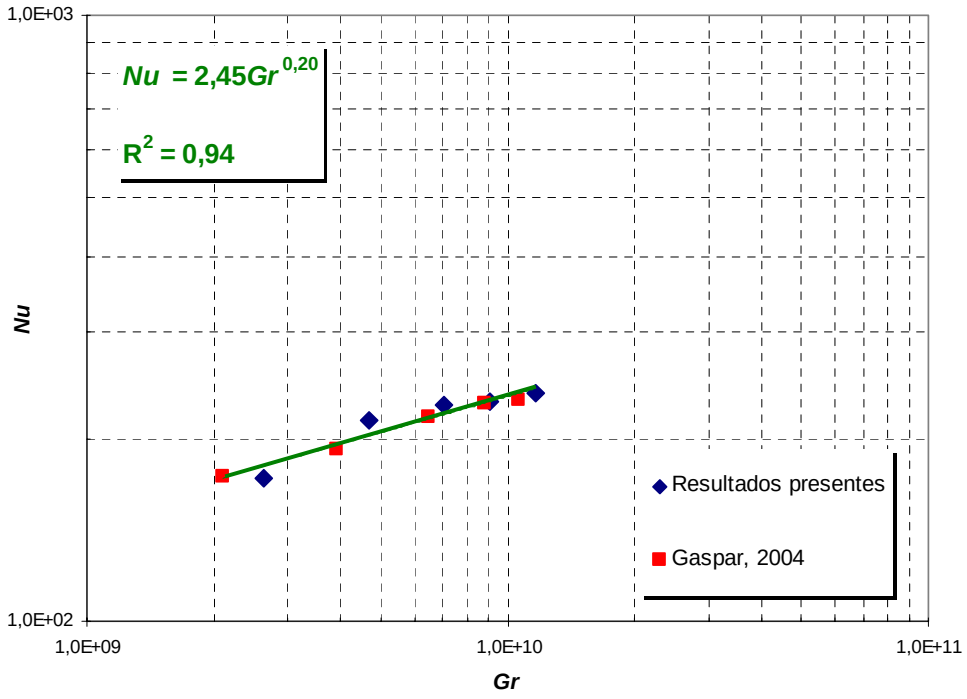


Figura 5.4 Variação do número de *Nusselt* em função do número de *Grashof*.

A Figura 5.4 mostra o crescimento do número de *Nusselt* com o número de *Grashof* e reflecte o aumento da importância da componente de impulsão gravítica, função de $\bar{t}_{sk} - t_a$, à medida que a temperatura do ar de insuflação diminui. Por outro lado, verifica-se que os valores máximos de *Gr* são superiores a 10^{10} o que, de acordo com Dear *et al*. (1997) e Clark (1981), indica que o escoamento deverá ser turbulento. Esta condição verifica-se apenas para a temperatura do ar de insuflação mais baixa, pelo que os resultados sugerem um regime de convecção natural fundamentalmente laminar ou de transição.

5.3.3.3. Resultados locais

Os efeitos do movimento e da diferença de temperatura observados para o corpo todo podem ser mitigados ou amplificados se tivermos em conta as 16 partes do manequim térmico. Da Figura 5.5 à Figura 5.7 apresentam-se os coeficientes de transferência de calor por convecção locais. Para facilitar a análise comparativa, os resultados foram reunidos em 3 grupos: um para as ancas, cabeça e tronco (peito e costas), outro referente aos membros superiores (mãos, antebraços e braços) e finalmente outro para os membros inferiores (pés, pernas e coxas).

Para a maioria das partes, às maiores diferenças de temperatura correspondem os coeficientes de transferência de calor mais elevados. Constata-se também, na generalidade, um aumento dos valores de h_{conv} com a velocidade de passada. Na zona central do corpo (peito e costas), ancas e cabeça, as curvas são praticamente coincidentes, o que indica que os movimentos de marcha têm uma reduzida influência no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, verificando-se ainda que os menores valores de h_{conv} se situam no tronco. Para a situação de repouso, o valor médio mais reduzido pertence ao peito (2,2 W/m^2 ºC), em contraste com o estudo efectuado por Oguro *et al*. (2002), em que o valor correspondente se situa nas costas. Na cabeça os valores de h_{conv} são sensivelmente o dobro dos encontrados no peito, costas e ancas. Para além de ser o resultado do desenvolvimento da pluma ao longo do corpo, poderá reflectir fenómenos de recolamento do escoamento que descola dos ombros (Gaspar, 2004).

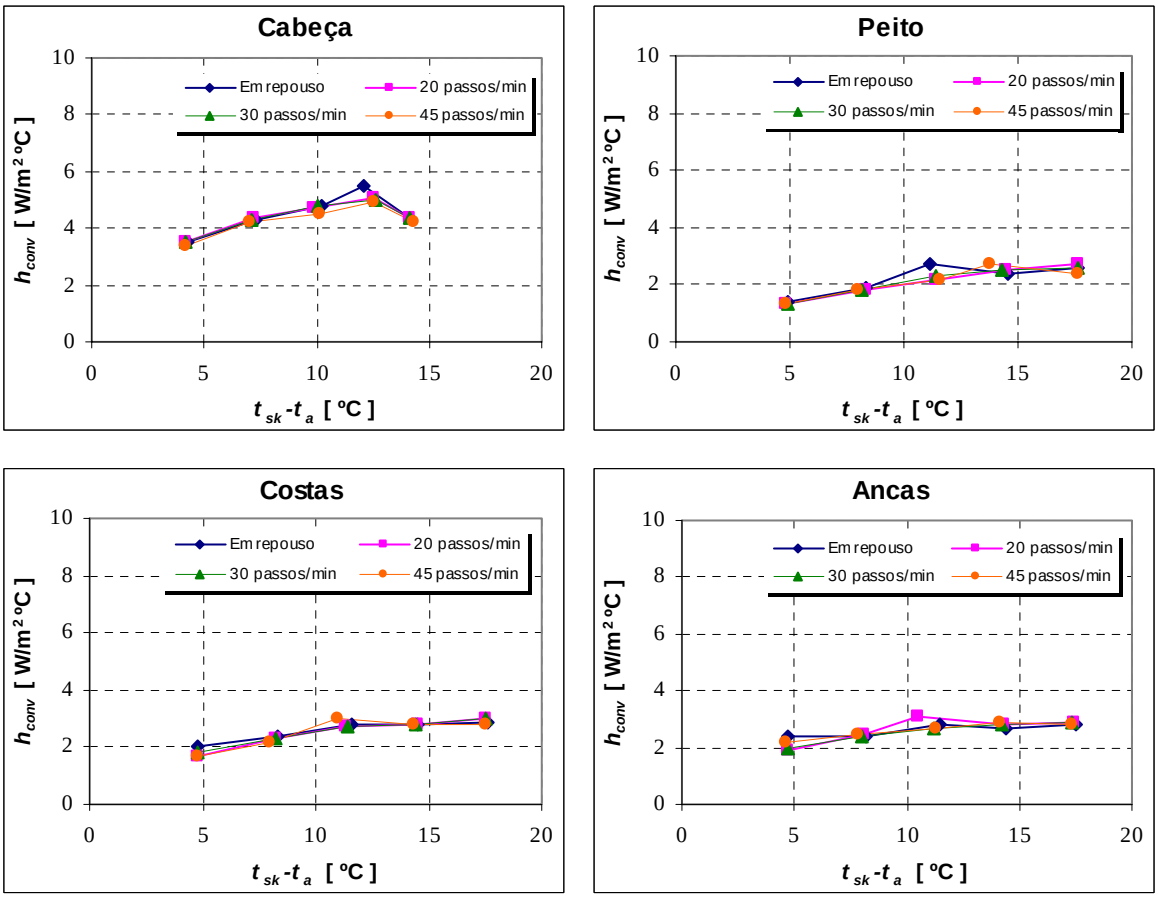


Figura 5.5 Coeficientes de transferência de calor por convecção – cabeça, tronco e ancas.

No que diz respeito aos membros superiores, as mãos apresentam os valores mais elevados de h_{conv}, seguido dos antebraços e braços. A mão direita e o braço esquerdo apresentam, respectivamente, o valor médio mais elevado (7,0 W/m^2 ºC) e mais reduzido (2,9W/m^2 ºC). Verifica-se também que nestas partes do corpo os valores de h_{conv} são superiores aos verificados no peito e costas, o que vai de encontro aos resultados obtidos por Oguro *et al*. (2002) e Ichihara *et al*. (1995).

Nos membros inferiores, em particular nos pés e nas pernas, obtiveram-se os valores mais elevados de h_{conv}, consequência, provavelmente, da maior amplitude de movimentos que ocorrem nestas partes. Este cenário, comum a todas as velocidade de marcha, pode também ser aplicado à postura estática, coincidindo neste aspecto com os estudos realizados por Oguro *et al*.(2002), Murakami *et al*. (1999), de Dear *et al*. (1997). Nesta situação, o valor médio mais elevado foi obtido no pé esquerdo (4,6 W/m^2 ºC), enquanto que, em termos absolutos, os valores médios mais elevados foram alcançados nos pés no teste a 45 passos por minuto, sendo em ambos de 8,3 W/m^2 ºC.

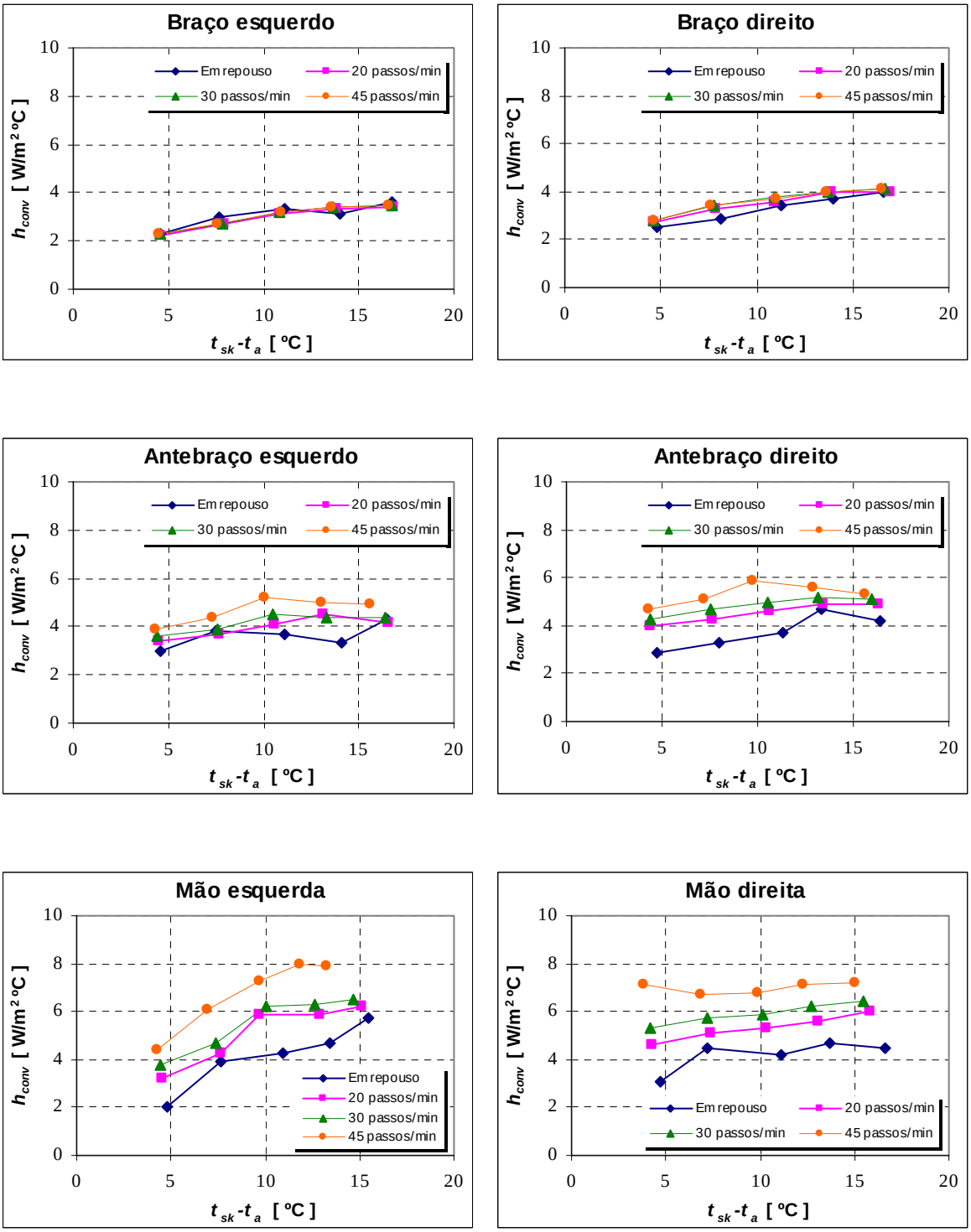


Figura 5.6 Coeficientes de transferência de calor por convecção – membros superiores.

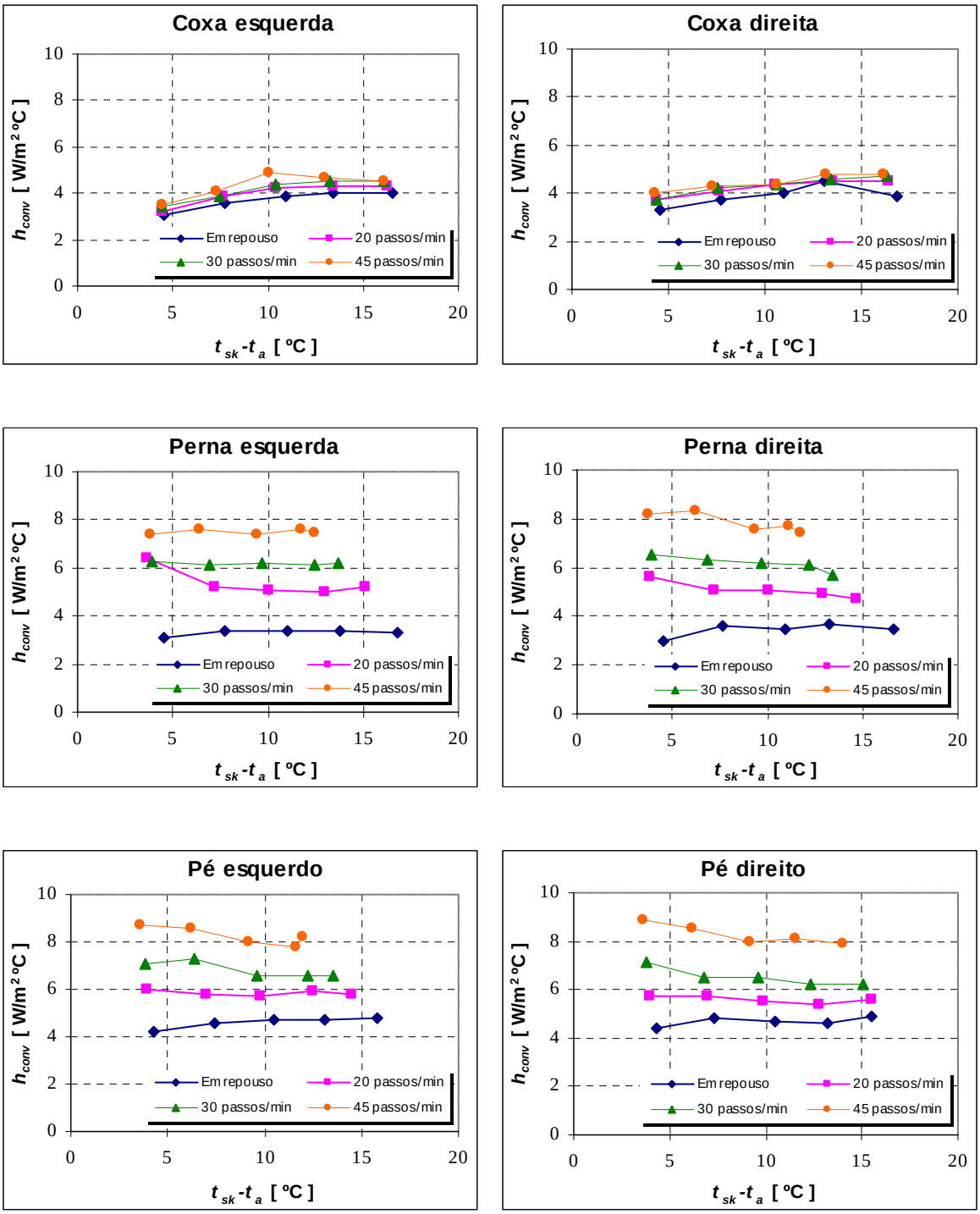


Figura 5.7 Coeficientes de transferência de calor por convecção – membros inferiores.

Conclui-se portanto que as partes periféricas do corpo constituem locais preferenciais para a perda de calor. De facto, situam-se nestas zonas os pontos a partir dos quais se começa a desenvolver a pluma térmica, pelo que os valores mais elevados encontrados nos pés, pernas, mãos e antebraços são naturais. Contudo, tanto nos membros inferiores como nos superiores, este efeito é atenuado nos braços e coxas. Registe-se porém, o diferente comportamento patenteado pelas mãos. Apesar de o valor médio ser idêntico em ambas, a

mão esquerda apresenta um aumento mais pronunciado do coeficiente de transferência de calor com a diferença de temperatura. Este pormenor põe em evidência o facto de o manequim térmico não ser simétrico. Na realidade, enquanto que a mão direita se encontra muito próximo da coxa, a esquerda está posicionada de um modo diferente, mais afastada e com os dedos mais abertos, pelo que, se por um lado a mão direita sofre mais a influência da pluma ascendente proveniente dos membros inferiores, por outro, a localização da esquerda é mais favorável às perdas de calor. Assim, se bem que por razões distintas, estes os factores contribuem para um aumento do coeficiente de transferência de calor.

A Figura 5.8 e a Figura 5.9 constituem um resumo de todos os testes efectuados. A Figura 5.8 representa os coeficientes de transferência de calor por convecção médios para todas as condições de ensaio, enquanto que a Figura 5.9 ilustra os valores médios da temperatura da pele e do fluxo de calor. Como seria de esperar, independentemente da velocidade de passada, constata-se que os lados do corpo são quase simétricos. Estas figuras demonstram também, e de forma ainda mais clara, alguns dos aspectos anteriormente focados. Para além de evidenciarem com nitidez os efeitos da velocidade de marcha, mostram que os valores mais elevados de h_{conv} correspondem à postura mais dinâmica, realçam o carácter independente de umas partes do corpo, em contraste com uma significativa dependência de outras, em particular dos membros inferiores. Estes efeitos, se bem que patentes em todas as figuras apresentadas, são mais perceptíveis nos gráficos correspondentes ao coeficiente de transferência de calor por convecção e ao fluxo de calor.

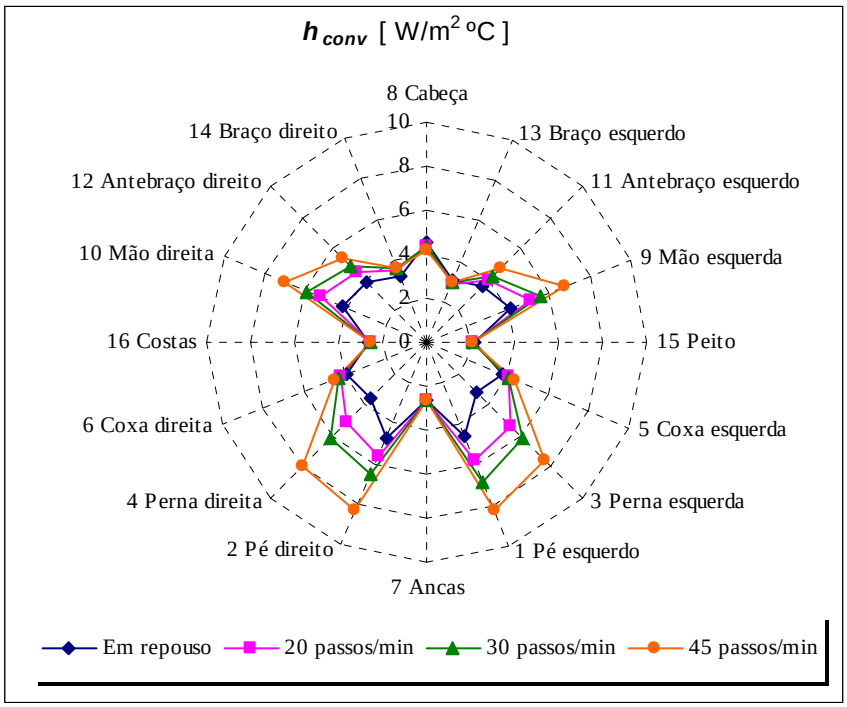


Figura 5.8 Coeficientes de transferência de calor por convecção médios.

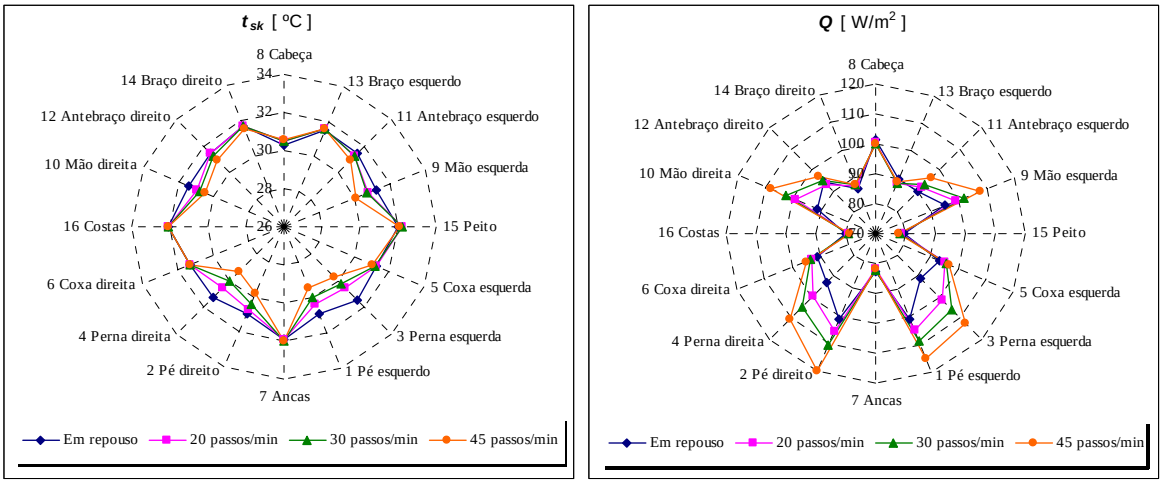


Figura 5.9 Temperatura média da superfície da pele e fluxo de calor médio.

Como nota final refira-se que a caracterização da pluma térmica quanto à natureza do regime, laminar, de transição ou turbulento, ao longo do corpo humano, constitui, ainda hoje, um assunto não totalmente conhecido e por isso alvo de interpretações diversas. Neste contexto, o desenvolvimento de estudos experimentais mais detalhados que esclareçam devidamente os fenómenos em causa representa um desafio a que urge dar resposta. Para tal, a obtenção de resultados mais representativos terá de envolver, necessariamente, técnicas de medição mais avançadas e dispendiosas, complementadas com visualização.

5.4. ENSAIOS REALIZADOS EM TÚNEL AERODINÂMICO

A componente experimental agora em análise dá continuidade à secção precedente e centra-se na obtenção de coeficientes globais e locais de transferência de calor por convecção em condições de convecção natural, mista e forçada. Todos os ensaios foram realizados no túnel aerodinâmico instalado no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) (*vd*. secção 4.4), dispositivo experimental que reúne as condições necessárias para a concretização dos objectivos. A metodologia seguida é análoga à do parágrafo anterior pelo que se dispensa a sua apresentação.

Na realização dos ensaios considerou-se somente a postura em pé. Uma vez que um dos objectivos consistia em comparar os resultados obtidos em condições estáticas e dinâmicas, sendo este aliás um dos pontos inovadores, considerou-se apenas essa postura. Adicionalmente, analisa-se o efeito do vestuário. Enquanto que numa das secções anteriores

se considerou o caso de manequim nu e condições de ar calmo, retoma-se agora o tema com o manequim vestido e sujeito a várias velocidades do escoamento. Neste contexto, a medição da temperatura da superfície do vestuário, porventura pelas dificuldades que encerra, tem sido efectuada num número restrito de estudos. O método mais eficaz baseia-se na utilização de câmaras de infravermelhos para obter termogramas, que essencialmente consistem em fotografias das imagens de infravermelhos. Um exemplo da utilização desta técnica é o trabalho desenvolvido por Oguro *et al.* (2002), que estimou a temperatura da superfície do vestuário analisando os termogramas obtidos num manequim térmico.

Outros trabalhos admitem as posturas sentado e deitado, porém são mais limitados em termos de condições de ensaio, restringindo-se às estáticas. No caso de convecção natural, refiram-se os exemplos de Oguro *et al*. (2002) realizado com o manequim nu e vestido e as posturas em pé e sentado, e Quintela *et al.* (2004) que consideram apenas o manequim nu e adoptam ainda a postura deitado. Para convecção forçada refiram-se de novo os trabalhos de de Dear *et al.* (1997), Silva e Coelho (2002) e ainda de Yang *et al*. (2002) realizados com os manequins térmicos assumindo as posturas em pé e sentado.

O presente trabalho caracteriza-se também pela gama mais alargada de velocidades considerada. Ao permitir a variação de v_a até cerca dos 10 m/s, este estudo distingue-se de outros semelhantes, nomeadamente os de Dear *et al.* (1997) e Silva e Coelho (2002) em que os valores máximos impostos foram de 5 e 4 m/s, respectivamente. Pelo contrário, razões de natureza prática limitaram as opções de análise do ângulo de incidência. Sendo exequíveis apenas os escoamentos frontal e de costas, o actual estudo é mais restrito encontrando-se na bibliografia casos que consideram 8 (de Dear *et al.*, 1997) e 3 (Silva e Coelho, 2002) direcções.

5.4.1. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Na preparação destes ensaios vários factores foram objecto de ponderação, entre os quais a gama de velocidades do escoamento que deveria incluir situações típicas de ambientes interiores e exteriores e permitir a realização de ensaios em condições de convecção natural, mista e forçada até 10 m/s, valor limite susceptível de ser mantido em boas condições de acordo com a experiência do Prof. Almerindo Ferreira. Entre os aspectos considerados indispensáveis para a concretização dos objectivos, a estabilidade do escoamento no túnel aerodinâmico nas várias condições de ensaio era tida como essencial. Efectuaram-se então testes preliminares em que se monitorizou a velocidade através da sonda de esfera aquecida

Testo (refª 0635 1049) ligada ao equipamento Testo 445 (2002) (refª 0560 4450) (*vd*. secção 4.5.5.1). Posicionou-se o sensor num plano paralelo à saída do túnel, aproximadamente ao centro e ao nível do abdómen do manequim. Os registos efectuados com uma taxa de aquisição de 10 segundos mostraram uma grande uniformidade do escoamento, com flutuações reduzidas, mesmo para as velocidades mais baixas. A Figura 5.10, embora se reporte ao comportamento observado durante os testes preliminares, traduz o perfil padrão como mais tarde se veio a comprovar.

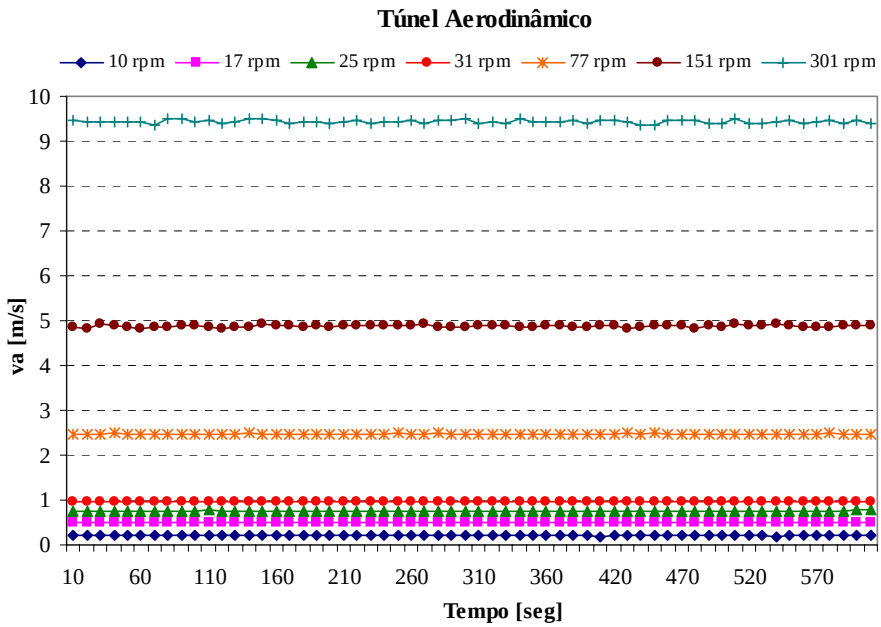


Figura 5.10 Velocidades médias no túnel aerodinâmico.

Para além do ensaio com velocidade nula, simularam-se condições típicas de ambientes interiores e exteriores até ao referido máximo de 10 m/s, efectuando vários estágios nesse intervalo. O esquema delineado compreendia 4 valores até 1 m/s (0,25; 0,5; 0,75 e 1m/s), seguindo-se intervalos mais alargados (2,5; 5 e 10 m/s). Os testes preliminares determinaram as relações entre a velocidade de rotação do ventilador e do escoamento que se mostram no Quadro 5.1. Na Figura 5.11 apresenta-se a curva de calibração do túnel aerodinâmico baseada nos resultados obtidos nos testes preliminares. Assegurou-se a velocidade de rotação em todos os ensaios homólogos, porém tal nem sempre correspondeu à mesma velocidade do escoamento, constatando-se nalguns casos pequenas diferenças. Anote-se ainda um ligeiro aumento nas várias temperaturas nos testes com a velocidade de rotação mais elevada.

Quadro 5.1 Relação entre a velocidade de rotação e velocidade do escoamento.

Vel. Rotação	Vel. Escoamento
0 r.p.m.	0 m/s
10 r.p.m.	± 0,25 m/s
17 r.p.m.	± 0,5 m/s
25 r.p.m.	± 0,75 m/s
31 r.p.m.	± 1 m/s
77 r.p.m.	± 2,5 m/s
151 r.p.m.	± 5 m/s
301 r.p.m.	± 10 m/s

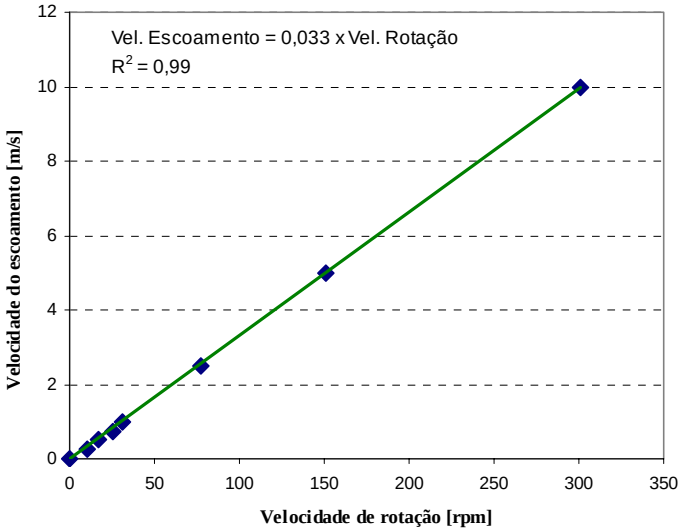


Figura 5.11 Calibração do túnel aerodinâmico.

Numa outra perspectiva, pretendia-se que as condições ambientais no laboratório se mantivessem aproximadamente estáveis durante o período de testes. A monitorização da humidade relativa e da temperatura do ar com o *data logger* Testo 175-H2 (2002) (*vd*. secção 4.5.5.2), revelou pouca variação de ambos os parâmetros numa aquisição efectuada durante algumas horas. Os ensaios posteriores vieram a confirmar esta avaliação preliminar, verificando-se nos vários dias de ensaio uma grande estabilidade dos parâmetros ambientais. O facto de os testes terem sido realizados num laboratório de grandes dimensões, em meados do mês de Março, e em período essencialmente nocturno, contribuiu para que não se registassem amplitudes térmicas significativas.

A câmara de ensaios foi alvo de um cuidado redobrado. Verificou-se a assimetria vertical de temperatura através do monitor de stresse térmico da Brüel & Kjær (1985), Type 1219 (*vd*. secção 4.5.3), medindo-se a temperatura do ar e de globo em três níveis correspondentes à altura da cabeça, abdómen e tornozelos do manequim, e monitorizou-se a assimetria radiante nos dois planos verticais paralelos às paredes do laboratório com a sonda de temperatura plana radiante (refª MM0036) ligada ao analisador de climas interiores também da Brüel & Kjær (1990), Type 1213 (*vd*. secção 4.5.2). Em ambos os casos as assimetrias não foram relevantes. A temperatura operativa foi medida através do respectivo sensor (refª MM0023) ligado ao monitor de conforto térmico da Brüel & Kjær, Type 1212 (1986) (*vd*. secção 4.5.1).

Os diversos equipamentos foram colocados no lado esquerdo do túnel adoptando como referência a sua secção de saída (*vd*. Figura 5.12), tornando assim possível o acesso aos

vários dispositivos de medida sem atravessar a área de testes e o registo de todos os parâmetros sem interferir com o escoamento.

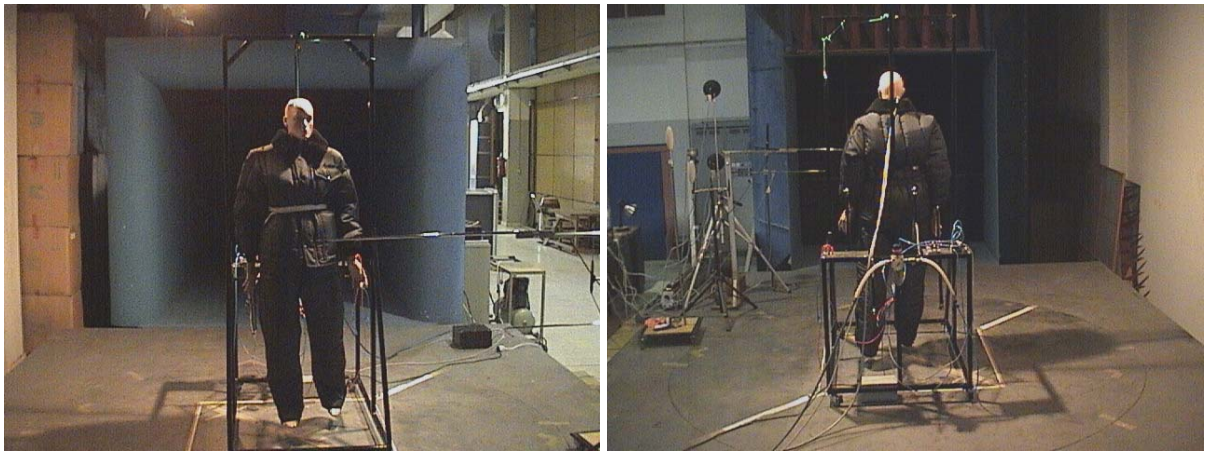


Figura 5.12 Manequim térmico "*Maria*" no túnel aerodinâmico.

Para o tratamento dos dados foram adoptados critérios distintos consoante a grandeza medida. A rotação do ventilador do túnel é monitorizada através de um visor digital colocado no quadro eléctrico, tendo sido essa a referência usada. A velocidade do escoamento corresponde à média dos últimos 10 minutos de cada ensaio. Para a temperatura do ar e de globo, os valores eleitos resultam de uma média ponderada em que se dá maior ênfase ao nível intermédio. No caso da temperatura plana radiante nos dois planos verticais paralelos às paredes do laboratório consideraram-se os valores de uma leitura efectuada no final do ensaio. A temperatura da superfície do vestuário foi medida com um termómetro de infravermelhos da marca Testo, modelo 860 – T2 (1999) (*vd*. secção 4.5.4), em seis pontos igualmente

repartidos pela frente (peito, braço e perna direitos) e costas (costas, braço e perna direitos), considerando-se para os cálculos o valor médio. Também neste caso foram admitidos os valores de uma única leitura efectuada no final do ensaio.

Os testes com o manequim vestido foram todos realizados com a mesma indumentária, cujas características são apresentadas na Tabela 5.7. A informação sobre os materiais constituintes baseia-se na ficha técnica do produto fornecida pelo fabricante, e os valores de isolamento térmico foram obtidos através de ensaios efectuados na câmara climática de acordo com as especificações da Norma ISO 9920 (1995). Registe-se que os pés, mãos e cabeça do manequim estavam desprotegidos.

Tabela 5.7 Caracterização do vestuário dos ensaios.

Designação	**Material**	**Massa** [g]	**Tamanho (cor)**	**Global**		**Série**		**Paralelo**	
				I_{cli} [*clo*]	I_{clu} [*clo*]	I_{cli} [*clo*]	I_{clu} [*clo*]	I_{cli} [*clo*]	I_{clu} [*clo*]
Casaco	Material exterior 100% nylon (205 g/m^2) Enchimento térmico 100% poliéster (200 g/m^2) Forro 100% nylon (60 g/m^2)	1060	M (Azul)	1,03	0,83	2,08	1,75	0,86	0,69
Calças	Material exterior 100% nylon (205 g/m^2) Enchimento térmico 100% poliéster (200 g/m^2) Forro 100% nylon (60 g/m^2)	1128	M (Azul)	0,68	0,54	1,00	0,80	0,61	0,48
Conjunto: Casaco + Calças				I_{cl} [*clo*]	I_{cle} [*clo*]	I_{cl} [*clo*]	I_{cle} [*clo*]	I_{cl} [*clo*]	I_{cle} [*clo*]
				1,93	1,63	2,93	2,55	1,75	1,48

Devido ao custo elevado de funcionamento do túnel aerodinâmico, os ensaios foram realizados no período económico, ou seja no final do dia e ao fim-de-semana. Esta medida, além de permitir uma redução dos custos atribuíveis à energia eléctrica dado que o Laboratório dispõe de tarifa bi-horária, apresenta ainda a vantagem de minimizar o incómodo provocado aos colaboradores da ADAI devido ao ruído associado ao funcionamento do túnel. De facto, para as velocidades de rotação mais elevadas, o funcionamento deste equipamento impede a realização de qualquer tarefa que exija um mínimo de atenção.

Os testes iniciavam-se assim apenas ao final da tarde. Ligava-se o manequim térmico e durante o período de estabilização que se seguia eram efectuados todos os preparativos para a série de ensaios a realizar nesse dia. Terminada esta fase, a iluminação da zona de trabalho era desligada de forma a anular a sua influência no manequim e nos diversos sensores. Procedia-se então ao primeiro ensaio do dia com condições de ar calmo, típicas de convecção natural. Todo este processo necessita de 2 a 3 horas pelo que o túnel aerodinâmico era ligado somente após as 20.00 horas.

Em resumo, os recursos experimentais disponíveis permitiam cumprir os requisitos mínimos para a realização dos ensaios, embora sem possibilidade de controlo das condições ambientais. Cumpriram-se 9 dias de testes, foram necessárias cerca de 31 horas de funcionamento do túnel aerodinâmico e efectuaram-se 66 ensaios.

5.4.2. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os ensaios realizados permitiram recolher uma quantidade de informação que deixa em aberto amplas possibilidades para a análise dos resultados. No âmbito da presente dissertação, procede-se à apresentação de duas situações centradas no estudo da influência dos movimentos do corpo e do vestuário.

5.4.2.1. Influência dos movimentos de marcha

Discute-se o efeito dos movimentos do corpo através da comparação dos resultados obtidos com o manequim em pé e executando movimentos de passada a uma velocidade de ±45 passos por minuto. Considera-se o manequim térmico nu e o escoamento em incidência frontal.

Condições térmicas dos ensaios

Na Tabela 5.8 resumem-se as condições térmicas dos testes. As duas séries de ensaios foram realizadas em dias distintos e prolongaram-se por algumas horas (tiveram início às

20.00 horas e terminaram cerca das 2.15 horas no caso do ensaio estático e da 1.00 hora no teste dinâmico), tendo-se verificado em ambos os casos uma estabilidade dos diferentes parâmetros ambientais com a temperatura do ar próxima dos 13 ºC e a diferença entre t_a e t_o a não exceder os 0,2 ºC. Registe-se, porém, o ligeiro aumento da temperatura do ar no ensaio à velocidade mais elevada, característica aliás comum a todos os testes realizados.

Tabela 5.8 Condições térmicas dos ensaios realizados com o manequim nu e escoamento frontal.

Ensaio/ Data	Velocidade de rotação [r.p.m.]	v_a [m/s]	t_a [ºC]	t_g [ºC]	t_o [ºC]	$\bar{t}_r$ [ºC]	$\bar{t}_{sk}$ Corpo todo [ºC]	$\dot{Q}_s$ Corpo todo [W/m^2]
	0 r.p.m.	0	13,1	13,3	13,2	13,4	29,4	129,4
	10 r.p.m.	0,22	13,0	13,2	13,1	13,2	29,3	130,3
	17 r.p.m.	0,51	13,0	13,2	13,2	13,3	27,6	148,7
Estático	25 r.p.m.	0,75	12,9	13,1	13,0	13,1	27,0	151,0
12/03/2005	31 r.p.m.	0,96	12,9	13,1	13,0	13,2	26,6	153,5
	77 r.p.m.	2,48	12,9	13,1	13,0	13,2	23,1	160,5
	151 r.p.m.	4,88	13,1	13,3	13,2	13,4	20,9	162,6
	301 r.p.m.	9,43	13,7	13,9	13,8	13,9	19,8	163,5
	0 r.p.m.	0	13,2	13,3	13,3	13,3	28,5	138,3
	10 r.p.m.	0,22	13,2	13,3	13,2	13,3	28,3	140,9
	17 r.p.m.	0,51	13,2	13,3	13,3	13,4	27,4	149,3
Dinâmico	25 r.p.m.	0,75	13,1	13,4	13,3	13,4	26,7	152,5
45 passos/min	31 r.p.m.	0,96	13,2	13,3	13,3	13,4	26,2	155,2
13/03/2005	77 r.p.m.	2,48	13,0	13,2	13,1	13,3	23,1	160,5
	151 r.p.m.	4,88	13,2	13,5	13,4	13,5	20,8	162,9
	301 r.p.m.	9,43	13,8	13,9	13,8	13,9	19,8	163,6

Tendo como referência o ensaio estático, a assimetria plana radiante foi em termos médios de 0,2ºC e nunca excedeu os 0,3ºC, enquanto que para as temperaturas do ar e de globo as diferenças verticais de temperatura foram em termos médios de 0,5 e 0,4 ºC, respectivamente, verificando-se normalmente entre os canais A (nível da cabeça) e C (nível do tornozelo). No ensaio dinâmico a assimetria plana radiante foi ligeiramente inferior (0,1ºC), registando-se para t_a e t_g uma diferença vertical de temperatura média de 0,4 ºC. Refira-se ainda que a temperatura média radiante ($\bar{t}_r$) foi estimada a partir de t_a e t_g de acordo com a expressão sugerida na Norma ISO 7726 (1998) para convecção natural.

Resultados Globais

O coeficiente global de transmissão de calor obtido no ensaio estático em condições de convecção natural foi de 3,5 W/m^2 ºC, valor que vai de encontro aos já apresentados (*vd.* secção 5.3.3.2). O resultado obtido no teste dinâmico foi de 4,5 W/m^2 ºC, desconhecendo-se neste caso a existência de estudos idênticos que possam servir de comparação. Embora a situação em que o manequim executa movimentos de marcha não traduza uma condição de convecção natural pura, o ensaio realizado com velocidade do escoamento nula é analisado em conjunto com o teste estático.

Conforme já referido, o fluxo de calor ($\dot{Q}_s$) e a temperatura média cutânea ($\bar{t}_{sk}$) eram monitorizados em contínuo no computador de controlo, iniciando-se a aquisição depois de atingidas condições estáveis em ambos os parâmetros. Do período de registo, que se prolongava no mínimo por vinte minutos, apenas se consideravam os dez minutos finais, calculando-se h_{conv} a partir dos valores médios de $\bar{t}_{sk}$ e $\dot{Q}_s$ correspondentes a esse período. Assim, procedeu-se à análise dos desvios padrão (***s***) associado aos resultados. Na Tabela 5.9 apresentam-se os valores médios de h_{conv} obtidos a partir dos cálculos efectuados para cada minuto e os respectivos desvios padrão, verificando-se que o valor mais elevado de ***s*** com o manequim em repouso foi de 0,069, enquanto que com o manequim em movimento o valor correspondente foi de 0,782.

Tabela 5.9 Coeficientes de transferência de calor por convecção e desvios padrão.

Velocidade de rotação [r.p.m.]	**Testes estáticos (em pé)**		**Testes dinâmicos (45 passos/min)**	
	Coeficiente de transferência de calor h_{conv} [W/m^2 ºC]	Desvio padrão ***s***	Coeficiente de transferência de calor h_{conv} [W/m^2 ºC]	Desvio padrão ***s***
0 r.p.m.	3,5	0,035	4,5	0,015
10 r.p.m.	3,5	0,037	4,8	0,08
17 r.p.m.	5,7	0,009	6,0	0,038
25 r.p.m.	6,2	0,022	6,7	0,029
31 r.p.m.	6,7	0,005	7,4	0,004
77 r.p.m.	11,3	0,052	11,4	0,058
151 r.p.m.	16,4	0,053	17,0	0,782
301 r.p.m.	22,4	0,069	23,0	0,324

A Figura 5.13 mostra os valores do coeficiente global de transferência de calor por convecção para os testes dinâmico e estático.

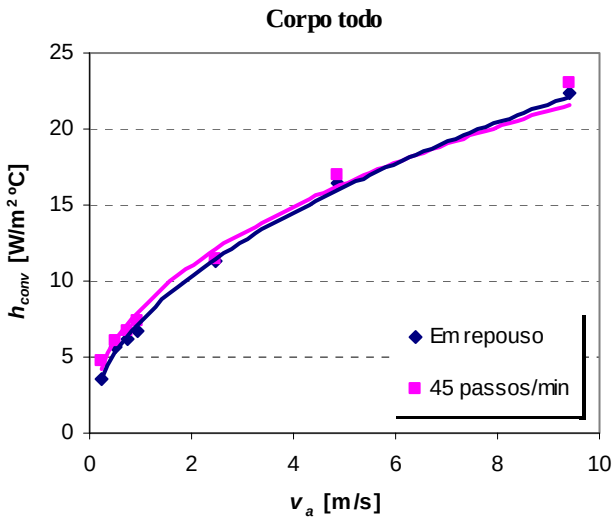


Figura 5.13 Coeficientes globais de transferência de calor por convecção.

A partir destes resultados propõem-se as expressões (5.24) e (5.24) baseadas numa lei de potência,

$$\underline{\textit{Ensaios estáticos}}: \; h_{conv} = 7{,}34 \times v_a^{0{,}49} \qquad r^2 = 0{,}99 \qquad (5.24)$$

$$\underline{\textit{Ensaios dinâmicos}}: \; h_{conv} = 8{,}17 \times v_a^{0{,}43} \qquad r^2 = 0{,}98 \qquad (5.25)$$

Na Figura 5.13 pode observar-se que as maiores diferenças se identificam com menores velocidades do ar e que o afastamento inicial tende a esbater-se à medida que a velocidade aumenta. Note-se ainda que os valores dinâmicos experimentais são sempre superiores aos correspondentes valores estáticos, pelo que a curva representada na Figura 5.13 e a equação (5.25) não traduzem de forma adequada os resultados experimentais. Por outro lado, para as condições de ensaio presentes, obteve-se uma diferença média relativa de cerca de 10% e verificou-se que os expoentes se aproximam de 0,5, em particular no teste estático, valor tradicionalmente sugerido na literatura para representar este fenómeno. Justifica-se assim o interesse em reunir os resultados dos testes estáticos e dinâmicos e propor uma única correlação.

Na análise de modos convectivos puros, uma vez que os efeitos separados do número de *Reynolds* ou do número de *Grashof* são normalmente desprezados, é possível traduzir o fenómeno de transferência de calor por relações do tipo $Nu = f\,(Gr)$ ou $Nu = f\,(Re)$. Neste caso, a relação $Nu = f\,(Re)$ é representada na Figura 5.14.

Outro aspecto que carece de esclarecimento relaciona-se com a diferenciação das condições de convecção mista e forçada. Como se sabe, o processo de troca de calor por

convecção é muito complexo. Nos casos em que as simplificações do tipo *Nu* = *f* (*Gr*) ou *Nu* = *f* (*Re*) se revelem inaceitáveis, o número de *Nusselt* passa a reflectir efeitos simultâneos representados pelos números de *Grashof* e de *Reynolds*, adquirindo as relações anteriores uma forma do género *Nu* = *f* (*Gr*, *Re*) (Quintela, 1989).

Na presença de um escoamento de ar, a troca de calor pode ocorrer através de um processo denominado de convecção mista, quando as contribuições da convecção natural e da convecção forçada são da mesma ordem de grandeza (Quintela, 1989). Como tal, não se devem menosprezar os efeitos de uns relativamente ao de outros. Reconhecida a importância do número de *Grashof* no estudo de processos de convecção natural e o papel equivalente do número de *Reynolds* no caso da convecção forçada, é de esperar que em convecção mista estes parâmetros adimensionais sejam simultaneamente influentes.

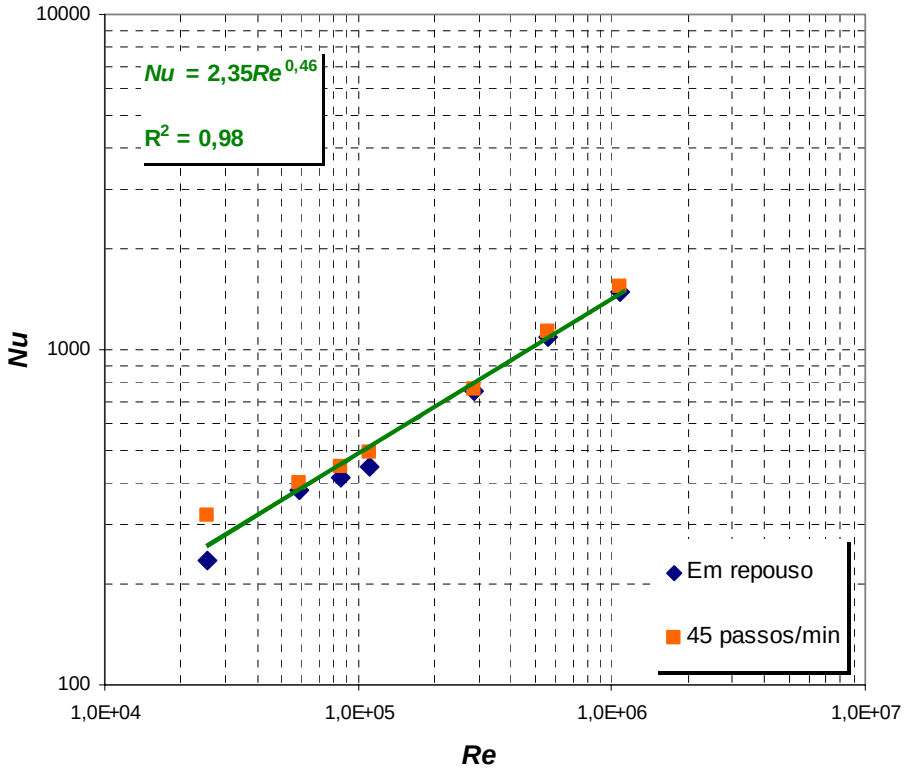


Figura 5.14 Manequim térmico nu e escoamento frontal: variação do número de *Nusselt* em função do número de *Reynolds*.

Frequentemente, os problemas de convecção mista são interpretados tomando para termo de referência os resultados relativos a um dos regimes convectivos puros. No âmbito do presente trabalho, este termo de comparação veio a ser constituído pelos dados das experiências de convecção natural (Nu_0). Assim, nesta análise da convecção mista, sendo o

grupo sem dimensões ($Re/\sqrt{Gr}$) determinante, procurou-se caracterizar a sua influência sobre o número de *Nusselt*. A Figura 5.15 ilustra esta análise e estabelece uma correlação dos dados experimentais representativa das posturas estática e dinâmica.

Os resultados mostram que para as velocidades do escoamento até cerca de 1 m/s, a relação $Re/\sqrt{Gr}$ é da ordem de grandeza de 1, valores que sugerem que a convecção mista surge como resultado da perturbação introduzida pelo escoamento forçado e é representada de forma adequada pelo parâmetro $Re/\sqrt{Gr}$.

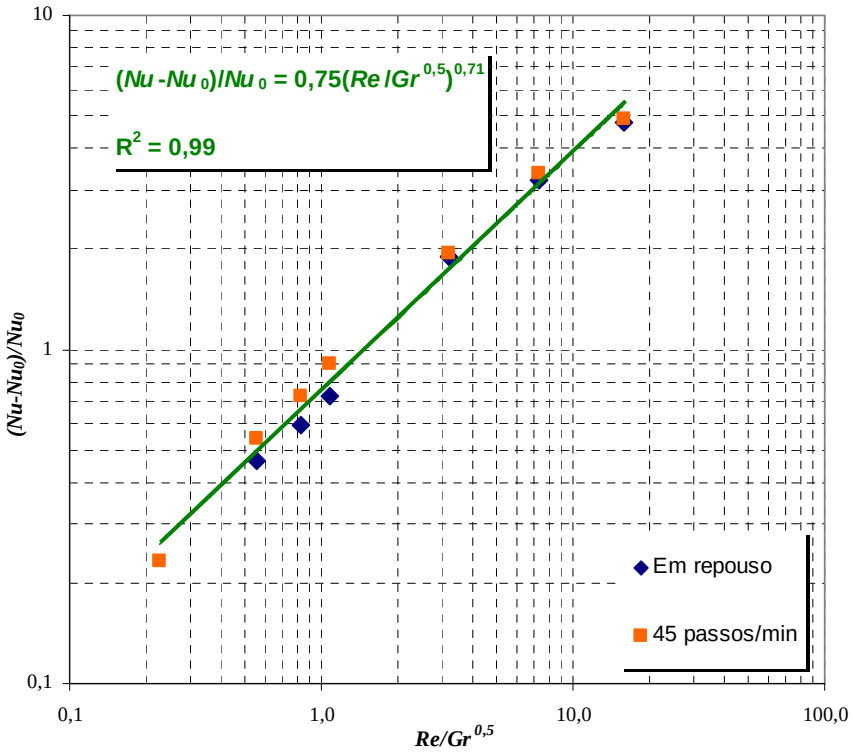


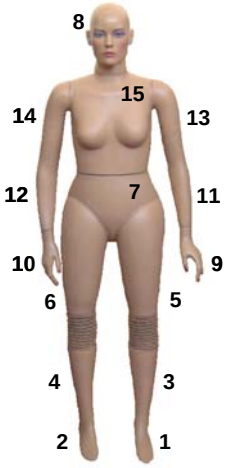
Figura 5.15 Correlação experimental para as posturas estática e dinâmica.

É interessante verificar que a correlação adimensional obtida na Figura 5.15 representa bem todos os ensaios efectuados, mesmo os que correspondem à convecção forçada pura, com valores de $Re/\sqrt{Gr}$ > 10 (Quintela, 1989). O limite inferior da convecção mista não é atingido nestes ensaios. Para tal seria necessária uma maior influência do número de *Grashof*, o que implicaria valores para a diferença $\bar{t}_{sk} - t_a$ sem significado físico para o caso do corpo humano. O conjunto destes resultados parece corroborar a representatividade da altura como dimensão característica do corpo humano em pé.

Resultados Locais

Na Tabela 5.10 listam-se os coeficientes de transmissão de calor das 16 partes do manequim térmico obtidos nos testes com velocidade de escoamento nula (v_a=0 m/s), juntamente com os resultados obtidos por de Dear *et al*. (1997). As extremidades do corpo, em particular os pés e as mãos, apresentam os valores mais elevados, enquanto que na zona central se constatam os menores valores. No teste estático o valor mais elevado foi obtido na mão esquerda (5,3 W/m^2 ºC) e o mais reduzido no peito (2,3 W/m^2 ºC). Com o manequim em movimento os pés apresentam os valores mais elevados (7,3 W/m^2 ºC) seguidos pela mão esquerda (7,2 W/m^2 ºC), mantendo-se no peito o valor mais reduzido (2,7 W/m^2 ºC).

Tabela 5.10 Coeficientes de transferência de calor por convecção das 16 partes do manequim térmico.

Representação esquemática	Parte do Manequim	h_{conv} [W/m^2 ºC]		
		Estático	Dinâmico	de Dear *et al*. (1997)
	1 – Pé esquerdo	4,4	7,3	5,1
	2 – Pé direito	4,4	7,3	5,1
	3 – Perna esquerda	3,4	6,8	4,1
	4 – Perna direita	3,9	6,6	4,1
	5 – Coxa esquerda	3,9	4,6	4,1
	6 – Coxa direita	3,9	4,7	4,1
	7 – Ancas	2,8	3,2	3,4
	8 – Cabeça	4,3	4,2	3,6
	9 – Mão esquerda	5,3	7,2	4,1
	10 – Mão direita	4,1	6,9	4,1
	11 – Antebraço esquerdo	3,7	4,5	3,7
	12 – Antebraço direito	3,6	5,1	3,7
	13 – Braço esquerdo	3,2	3,4	2,9
	14 – Braço direito	3,4	4,0	2,9
	15 – Peito	2,3	2,7	3,0
	16 – Costas	2,8	3,1	2,9
	Corpo todo	**3,5**	**4,5**	**3,4**

Deste conjunto de resultados importa sublinhar alguns detalhes. A assimetria das mãos revela a assimetria do próprio manequim, registando-se nos testes estáticos uma diferença de 1,2 W/m^2 ºC entre os lados esquerdo e direito. Na mão esquerda obteve-se o valor mais elevado em termos absolutos (5,3 W/m^2 ºC), verificando-se na mão direita um resultado coincidente com o de de Dear *et al.* (1997). No teste dinâmico a diferença é menor (0,3W/m^{2}ºC), mas neste caso a mão esquerda foi rodada 180º uma vez que durante o movimento toca na coxa.

Na cabeça também se regista uma diferença significativa entre os resultados deste estudo e os de de Dear *et al.* (1997). Neste caso a desigualdade deve-se ao facto do manequim utilizado por de Dear ter usado uma peruca com cabelos até ao nível dos ombros, enquanto

que no presente trabalho se considerou a cabeça do manequim descoberta. O menor valor de h_{conv} obtido por de Dear *et al*. (1997) (3,6 W/m^2 ºC), bem como a diferença de 0,7 W/m^2 ºC em relação ao resultado deste estudo não são então de surpreender.

Algumas das diferenças encontradas podem também ser atribuíveis a detalhes relacionados com os procedimentos experimentais. Por exemplo, o túnel em que os ensaios de de Dear *et al*. (1997) foram realizados não possuía altura suficiente para manter o manequim em pé pelo que, para permitir a obtenção de resultados com as coxas e as pernas na vertical, flectiram-se as pernas ao nível do joelho e realizaram-se duas séries de testes. Os valores considerados correspondem assim a uma combinação da informação proveniente de ambos. Refira-se também que o sistema de controlo dos manequins é distinto. Embora se tratem de dois modelos femininos, ambos divididos em 16 partes, o controlo da "*Maria*" baseia-se na equação de conforto, enquanto que o modelo usado por de Dear ("*Monika*") utiliza a temperatura constante.

A análise dos resultados obtidos em convecção forçada é efectuada em duas partes. A primeira refere-se às representações do tipo radar, nela se evidenciando as diferenças entre as partes do corpo. A segunda é apresentada no Anexo D e diz respeito às representações gráficas que ilustram a evolução do coeficiente de transferência de calor por convecção com a velocidade do escoamento.

A Figura 5.16 refere-se às representações tipo radar e mostra os valores de h_{conv} das 16 partes do manequim térmico nas duas condições em confronto e para cada velocidade do escoamento. Note-se que embora seja comum a adopção da mesma escala para facilitar as análises comparativas e evitar interpretações erradas, no presente caso tal regra redundaria num efeito contrário uma vez que deixariam de ser perceptíveis as diferenças registadas nos testes realizados com as velocidades do escoamento mais baixas. Optou-se assim por duas escalas em que uma limita h_{conv} a 15 W/m^2 ºC e é válida para os testes até cerca de 1 m/s, e a outra estabelece como valor máximo 45 W/m^2 ºC e aplica-se às restantes situações.

Os resultados obtidos nas 16 partes mostram que na zona central do corpo os valores são semelhantes, enquanto que nos membros o efeito dos movimentos de marcha é mais nítido, em particular para as velocidades do escoamento mais baixas. Quando v_a é menor que 1 m/s os valores de h_{conv} são sempre inferiores a 15 W/m^2 ºC, aproximando-se dos 30 W/m^{2}ºC no ensaio com a velocidade mais elevada, ultrapassando-se mesmo este limite em algumas partes do corpo. Em termos absolutos o menor valor foi obtido no peito (2,3 W/m^2 ºC) no teste em condições de convecção natural, e o mais elevado na mão esquerda (42,2 W/m^{2}ºC), tendo sido alcançado no ensaio com a velocidade de rotação de 301 r.p.m. (≅ 9,43 m/s).

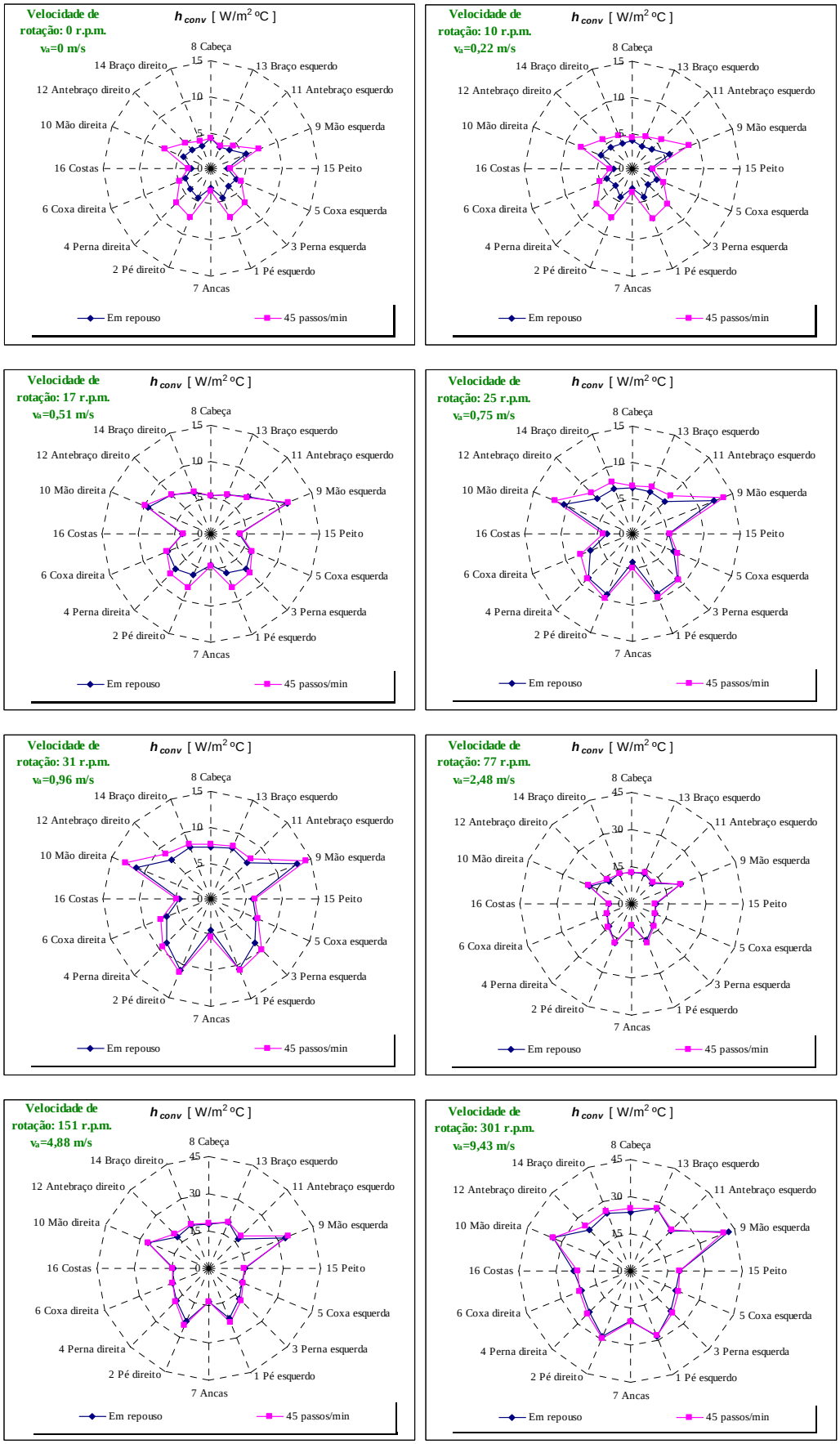


Figura 5.16 Coeficientes de transferência de calor por convecção obtidos nos ensaios realizados com o manequim nu e escoamento frontal.

Na zona central do corpo (ancas, peito e costas) obtiveram-se os menores valores de h_{conv}. Nestas partes do corpo os resultados obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos são praticamente coincidentes o que mostra que para a velocidade de passada testada (45 passos por minuto) a influência da marcha é desprezável. Os valores mais reduzidos de h_{conv} registam-se nas ancas e nas costas e os mais elevados na cabeça. Para esta parte do corpo é importante sublinhar que a diferença entre os resultados presentes e os obtidos por de Dear *et al.* (1997) se relaciona com o pormenor já referido da cabeça estar descoberta no actual trabalho e protegida com uma peruca no estudo de de Dear *et al.* (1997).

Os membros apresentam valores de h_{conv} superiores, nomeadamente as partes periféricas. Na realidade, o efeito dos movimentos do corpo é mais pronunciado nos locais onde a amplitude da oscilação é maior, pelo que seriam de esperar estes resultados. As mãos e os pés registam assim os valores de h_{conv} mais elevados, o que comprova também a sensação por todos já sentida, em maior ou menor grau, de que as extremidades constituem os locais favoritos para a perda de calor. Nas mãos observa-se uma ligeira assimetria que se deve ao seu posicionamento particular, tendo já sido salientado que durante o movimento a mão esquerda toca na coxa, pelo que foi rodada 180º para evitar que um toque acidental mais violento provoque danos. Nos membros inferiores os pés e pernas apresentam valores mais elevados de h_{conv} do que as coxas. Comparando as partes homólogas dos membros superiores e inferiores (mãos-pés; antebraço-perna; braço-coxa), conclui-se que os menores valores se obtêm nos membros inferiores. As diferenças entre os testes estáticos e dinâmicos atenuam-se à medida que se caminha dos pés para as coxas e das mãos para os braços.

De uma forma geral note-se que acima de 1 m/s as desigualdades entre partes do corpo se esbatem deixando de ser perceptíveis as diferenças entre as posturas estática e dinâmica. Globalmente verifica-se uma simetria entre os lados esquerdo e direito do corpo, com a excepção, já explicada, da mão esquerda, por sinal o local onde se observam os maiores valores de h_{conv} (42,2 e 40,3 W/m^2 ºC no ensaios estático e dinâmico, respectivamente). Registe-se ainda a tendência para a diminuição das perdas convectivas das extremidades para a zona central do corpo. Esta constatação alerta para a necessidade de se ponderar o uso das expressões propostas para as várias partes em detrimento das expressões deduzidas para o corpo todo. Pelo menos para determinadas aplicações específicas, como sejam espaços confinados de habitáculos de veículos, gabinetes de trabalho, ou até simulações numéricas mais detalhadas, os erros cometidos ao considerar que o valor obtido a partir da expressão proposta para o corpo todo se pode aplicar a todas as partes podem ser importantes, pelo que nestes casos se recomenda que esta alternativa seja admitida, embora se reconheça que o seu interesse é mais limitado.

5.4.2.2. Influência do vestuário

Discute-se a acção do vestuário comentando os resultados obtidos com o manequim nu e vestido. Analisa-se apenas a postura estática com o manequim em repouso e escoamento a incidir de frente.

Condições térmicas dos ensaios

Na Tabela 5.11 listam-se as condições térmicas dos ensaios. A temperatura do ar foi de aproximadamente 13 ºC nos testes com o manequim nu e de 14,5 ºC com o manequim vestido. Os valores da temperatura operativa foram semelhantes aos da temperatura do ar, sendo as diferenças menores ou iguais a 0,2 e 0,1 ºC, respectivamente para o manequim nu e vestido.

Tabela 5.11 Condições térmicas dos ensaios realizados com o manequim em pé e escoamento frontal.

Ensaio Data	Velocidade de rotação [r.p.m.]	v_a [m/s]	t_a [ºC]	t_g [ºC]	t_o [ºC]	$\bar{t}_r$ [ºC]	$\bar{t}_{cl}$ [ºC]	$\bar{t}_{sk}$ Corpo todo [ºC]	$\dot{Q}_s$ Corpo todo [W/m^2]
Nu 12/03/2005	0 r.p.m.	0	13,1	13,3	13,2	13,4	---	29,4	129,4
	10 r.p.m.	0,22	13,0	13,2	13,1	13,2	---	29,3	130,3
	17 r.p.m.	0,51	13,0	13,2	13,2	13,3	---	27,6	148,7
	25 r.p.m.	0,75	12,9	13,1	13,0	13,1	---	27,0	151,0
	31 r.p.m.	0,96	12,9	13,1	13,0	13,2	---	26,6	153,5
	77 r.p.m.	2,48	12,9	13,1	13,0	13,2	---	23,1	160,5
	151 r.p.m.	4,88	13,1	13,3	13,2	13,4	---	20,9	162,6
	301 r.p.m.	9,43	13,7	13,9	13,8	13,9	---	19,8	163,5
Vestido 15/03/2005	0 r.p.m.	0	14,4	14,4	14,4	14,4	19,3	33,4	55,0
	10 r.p.m.	0,25	14,6	14,5	14,5	14,5	18,7	33,5	54,2
	17 r.p.m.	0,47	14,6	14,5	14,6	14,5	18,5	33,4	54,8
	25 r.p.m.	0,74	14,5	14,5	14,5	14,5	18,5	33,3	56,7
	31 r.p.m.	0,95	14,5	14,5	14,5	14,5	18,7	33,1	58,8
	77 r.p.m.	2,42	14,5	14,5	14,5	14,5	18,4	32,1	73,6
	151 r.p.m.	4,64	14,8	14,7	14,8	14,7	18,3	30,9	92,1
	301 r.p.m.	9,12	15,5	15,4	15,4	15,4	19,1	29,5	111,4

As maiores diferenças verticais de temperatura ocorreram normalmente entre os níveis da cabeça e tornozelos. Como já foi referido, com o manequim nu a diferença média foi de 0,5 ºC para t_a e de 0,4 ºC para t_g, sendo a assimetria plana radiante inferior a 0,2 ºC. Nos testes com o manequim vestido os resultados são semelhantes, constatando-se uma diferença vertical de temperatura de 0,4 ºC para t_a e de 0,3 ºC para t_g, enquanto que para a assimetria plana radiante o valor obtido foi de aproximadamente 0,3 ºC. A temperatura da superfície do vestuário, representada pela média de 6 pontos de medição variou entre 18,3 e 19,3 ºC.

Resultados globais

O coeficiente de transmissão de calor para o corpo todo em condições de convecção natural e com o manequim nu foi de 3,5 W/m^2 ºC. Com o manequim vestido o valor estimado foi de 3,7 W/m^2 ºC. Estes resultados corroboram os obtidos por Oguro *et al*. (2002) que também sugerem um valor superior para a condição vestida. Na presença de movimento de ar, retoma-se a metodologia adoptada na secção precedente e apresenta-se na Figura 5.17 a relação $Nu = f\,(Re)$ para as duas condições em análise.

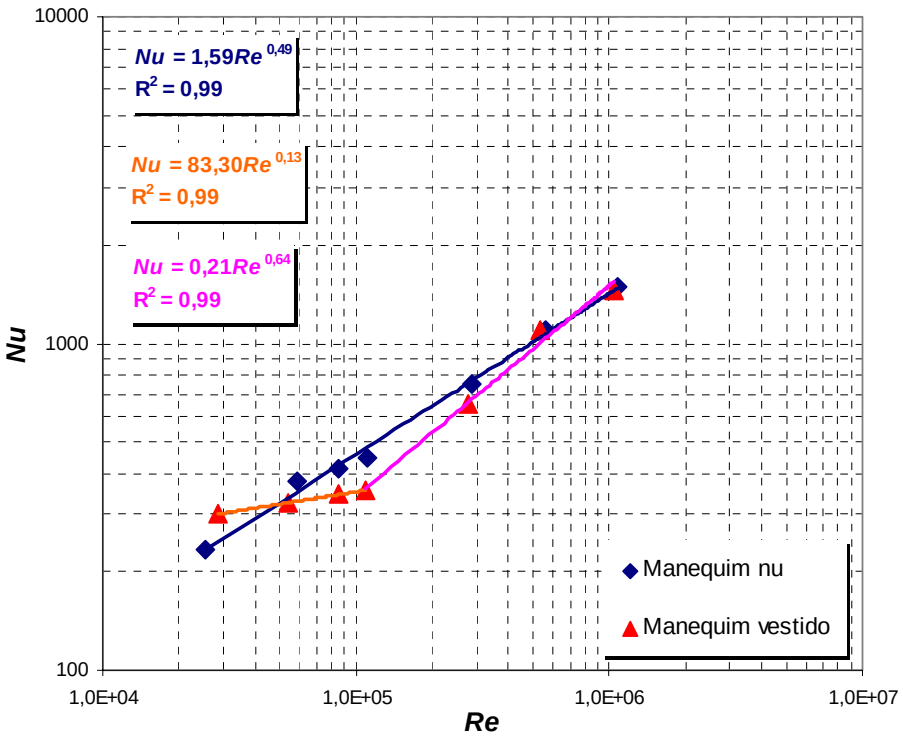


Figura 5.17 Manequim térmico em repouso e escoamento frontal: variação do número de *Nusselt* em função do número de *Reynolds*.

A Figura 5.17 mostra que para a condição vestida se evidenciam dois tipos de comportamento. Para valores de *Re* inferiores a 10^5 o crescimento de *Nu* com *Re* é ligeiro, verificando-se que nessa gama *Nu* varia entre 300 e 350. Para valores de *Re* superiores a 10^5 o padrão altera-se claramente, constatando-se que o aumento *Nu* com *Re* é bastante acentuado. Analisando-se os valores da velocidade do escoamento, conclui-se que o valor de *Re* de aproximadamente 10^5 corresponde a uma velocidade do escoamento de cerca de cerca de 1m/s, resultado que sugere que a transição de regime ocorre para valores próximos desse limite.

De facto, quando a velocidade do escoamento é reduzida, as infiltrações de ar são menores e a permeabilidade do vestuário ao ar não se faz sentir, pormenores que contribuem, pelo menos em certa medida, para os resultados presentes. Os resultados mostram assim que a consideração de regimes separados é particularmente adequada com o manequim vestido. Embora se recomende esta metodologia, reconhece-se a necessidade de trabalhos futuros para comprovar os fenómenos observados.

A Tabela 5.12 mostra os valores médios de h_{conv} e os respectivos desvios padrão. Os valores mais elevados de ***s*** com o manequim nu e vestido foram de 0,069 e 0,084, respectivamente.

Tabela 5.12 Coeficientes de transferência de calor por convecção e desvios padrão.

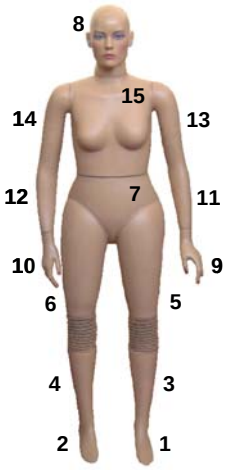
Velocidade de rotação [r.p.m.]	**Manequim nu**		**Manequim vestido**	
	Coeficiente de transferência de calor h_{conv} [W/m^2 ºC]	Desvio padrão ***s***	Coeficiente de transferência de calor h_{conv} [W/m^2 ºC]	Desvio padrão ***s***
0 r.p.m.	3,5	0,035	3,7	0,082
10 r.p.m.	3,5	0,037	4,6	0,053
17 r.p.m.	5,7	0,009	5,0	0,053
25 r.p.m.	6,2	0,022	5,2	0,042
31 r.p.m.	6,7	0,005	5,3	0,000
77 r.p.m.	11,3	0,052	9,8	0,042
151 r.p.m.	16,4	0,053	16,4	0,048
301 r.p.m.	22,4	0,069	21,9	0,084

Resultados locais

Na Tabela 5.13 apresentam-se os coeficientes de transmissão de calor obtidos nos testes com velocidade de escoamento nula (v_a = 0 m/s). Na maioria das partes do corpo os valores medidos com o manequim nu são superiores. Nas pernas regista-se um aumento não

esperado de h_{conv}, tendência que se mantém na generalidade dos testes mas cuja explicação não é evidente. Com o manequim nu o valor mais elevado foi obtido na mão esquerda (5,3 W/m^2 ºC) e o mais reduzido no peito (2,3 W/m^2 ºC). Com o manequim vestido os valores correspondentes foram registados na perna direita (10,6 W/m^2 ºC) e nas costas (1,2 W/m^2 ºC).

Tabela 5.13 Coeficientes de transferência de calor por convecção das 16 partes do manequim térmico.

Representação esquemática	**Parte do Manequim**	**h_{conv} [W/m^2 ºC]**	
		Nu	**Vestido**
	1 – Pé esquerdo	4,4	0,4
	2 – Pé direito	4,4	1,9
	3 – Perna esquerda	3,4	7,3
	4 – Perna direita	3,9	10,6
	5 – Coxa esquerda	3,9	5,0
	6 – Coxa direita	3,9	5,8
	7 – Ancas	2,8	2,3
	8 – Cabeça	4,3	2,1
	9 – Mão esquerda	5,3	2,5
	10 – Mão direita	4,1	2,9
	11 – Antebraço esquerdo	3,7	3,7
	12 – Antebraço direito	3,6	3,7
	13 – Braço esquerdo	3,2	2,8
	14 – Braço direito	3,4	3,2
	15 – Peito	2,3	2,6
	16 – Costas	2,8	1,2
	Corpo todo	**3,5**	**3,7**

Em convecção forçada o parâmetro dominante é a velocidade do escoamento. Nos testes realizados à mesma velocidade de rotação, esta variável é mantida aproximadamente constante pelo que não são de esperar diferenças significativas nos resultados. Contudo, quando o manequim se encontra vestido, é reconhecida a influência de outros factores, entre os quais se podem referir o comportamento aerodinâmico do escoamento em torno do vestuário, a permeabilidade e as infiltrações de ar. Embora a importância relativa de cada uma das contribuições não seja conhecida e constitua um desafio complexo, a acção combinada dos vários parâmetros pode ser evidenciada de forma mais simples.

A Figura 5.18 e a Figura 5.19 mostram as diferenças entre as 16 partes do manequim. Retoma-se a metodologia adoptada na secção precedente e dividem-se os comentários por três secções, sendo uma para as ancas, cabeça e tronco (peito e costas), outra para os membros superiores (mãos, antebraços e braços) e por fim outra para os membros inferiores (pés, pernas e coxas).

Os resultados obtidos na cabeça e nas ancas mostram que os valores mais elevados de h_{conv} foram alcançados com o manequim nu. A cabeça regista valores superiores às ancas, pormenor que não constitui uma surpresa e que se explica pelo facto de estar desprotegida.

Note-se ainda que a evolução de h_{conv} nesta parte do corpo é semelhante em ambas as condições de ensaio, ao contrário do que acontece nas ancas em que se observam algumas diferenças. O peito e as costas evidenciam uma evolução de h_{conv} idêntica quando o manequim está nu e distinta na condição vestida, nomeadamente para as velocidades do escoamento mais elevadas. Este comportamento deve-se a trocas de calor adicionais motivadas pela permeabilidade do vestuário e por infiltrações de ar que podem ocorrer em várias localizações, em particular na zona do pescoço que constitui um ponto de entrada preferencial. Na realidade estas trocas de calor são facilitadas nas condições de ensaio actuais porque apenas se utiliza um casaco de protecção. Embora seja comum o uso de roupa interior, camisa ou camisola, a ausência destas peças deixa livre todo um volume interior que favorece escoamentos secundários e promove a troca de calor. Este fenómeno não se manifesta de forma tão evidente noutras partes do corpo porque o escoamento é interrompido no encosto lombar do manequim, no cinto, nos punhos elásticos e possivelmente ainda noutros pontos.

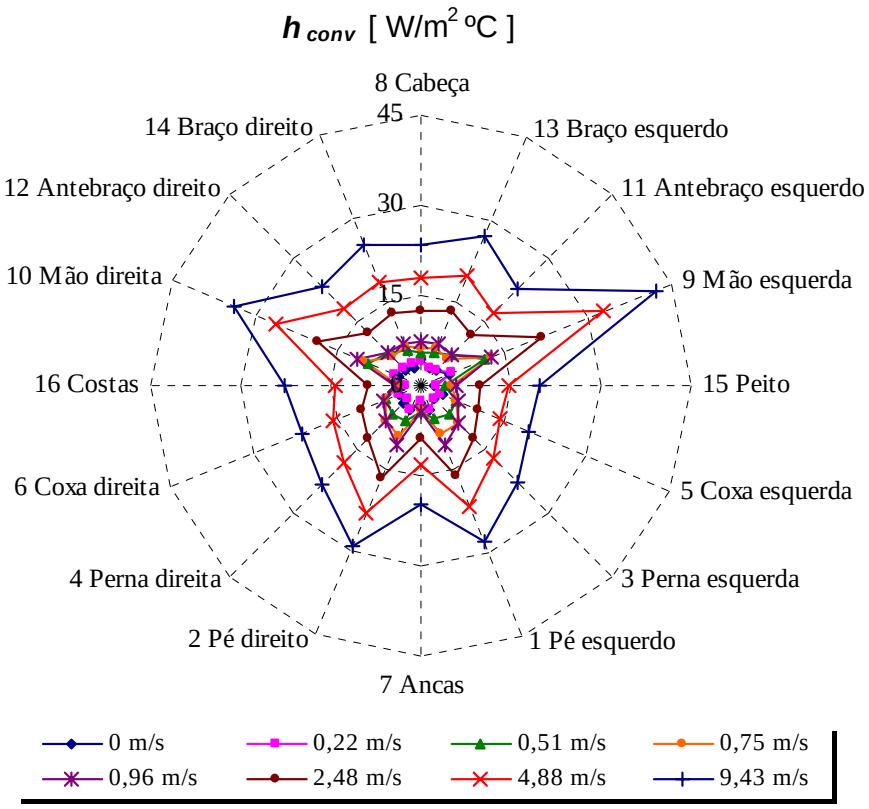


Figura 5.18 Coeficientes de transferência de calor obtidos nos ensaios realizados com o manequim nu.

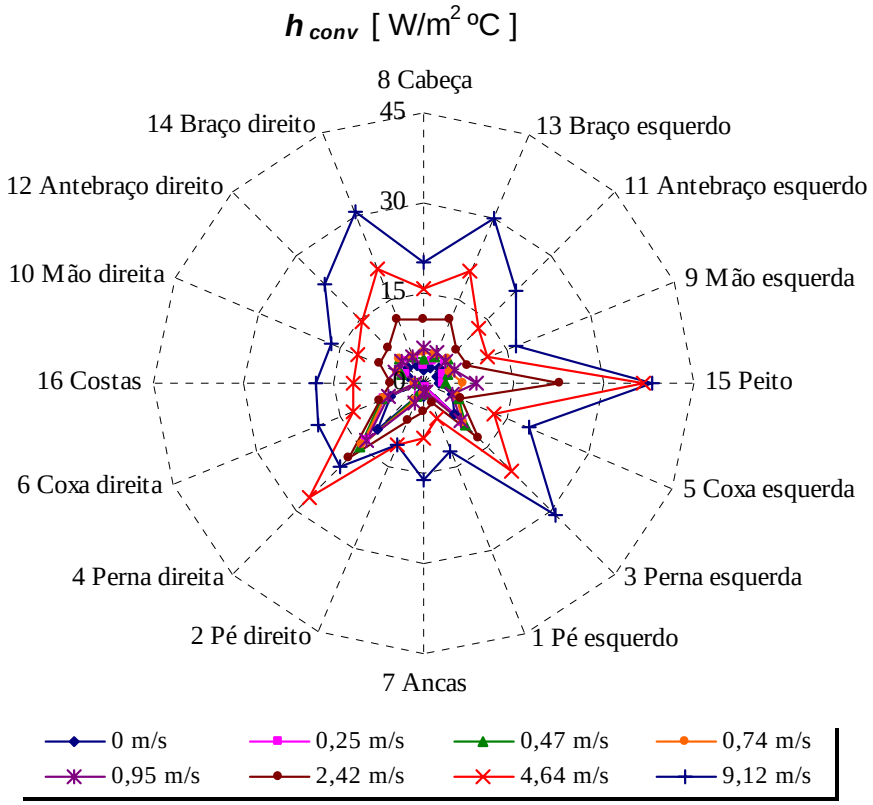


Figura 5.19 Coeficientes de transferência de calor obtidos nos ensaios realizados com o manequim vestido.

Nos membros inferiores, a nota de maior destaque vai para as diferenças observadas nas duas condições de ensaio. Os pés apresentam resultados equivalentes, sendo a simetria perfeita com o manequim nu. Apesar de os pés se encontrarem desprotegidos em ambos os testes, isto é sem calçado e meias, quando o manequim está vestido as calças envolvem uma parte significativa do pé. Para além disso, trata-se de uma peça de vestuário de protecção que apresenta um volume considerável, pelo que desempenha um papel de relevo na deflexão do escoamento. Pelo contrário, com o manequim nu, os pés estão totalmente expostos ao escoamento incidente, facto que contribui para as diferenças observadas. Nas pernas verifica-se uma simetria perfeita com o manequim nu e repetem-se as diferenças com o manequim vestido. Nas coxas a simetria manifesta-se em ambos os testes e ao longo de toda a gama de velocidades de escoamento, sendo ainda quase coincidentes os resultados até cerca de 2 m/s.

Nos membros superiores, as mãos estão totalmente expostas ao escoamento quando o manequim está nu e parcialmente encobertas na situação de vestido, pormenores que mais uma vez se repercutem nos resultados. Quando o manequim está nu, registam-se valores mais elevados de h_{conv} e diferenças entre as mãos, resultado esperado em virtude da assimetria do manequim. Quando o manequim está vestido, o volume do vestuário provoca um desvio do escoamento que deixa as mãos sob uma protecção aerodinâmica responsável por uma

diminuição dos valores de h_{conv} e por uma atenuação da assimetria. Nos antebraços, apesar dos valores de h_{conv} serem ligeiramente superiores com o manequim nu, verifica-se uma simetria e uma evolução equivalente nas duas condições de ensaio ao longo de toda a gama de velocidade. Os valores mais reduzidos observados com o manequim vestido podem também ser atribuídos a efeitos aerodinâmicos. Note-se ainda que o facto dos punhos serem elásticos evita as infiltrações de ar e contribui para que se obtenham resultados semelhantes. Por último, os braços representam um indicador claro de que a velocidade do escoamento é a variável dominante em convecção forçada. Quando a influência de parâmetros como a permeabilidade do vestuário, movimentos de ar na interface superfície da pele/superfície interior do vestuário, efeitos aerodinâmicos, ângulo de incidência do escoamento, entre outros, pode ser considerada como pouco significativa, são de esperar evoluções de h_{conv} mais ou menos coincidentes e uma simetria entre os dois lados do corpo.

A acção de algumas destas variáveis pode ser mitigada. A permeabilidade ao ar do vestuário pode ser substancialmente diminuída recorrendo a aplicações têxteis específicas, e as trocas de calor entre partes do corpo podem ser minoradas com medidas simples, como a adoptada por Oguro *et al.* (2002) que usou bandas de fita plástica apertadas nas interfaces das várias partes do corpo para impedir trocas de calor laterais. Como o objectivo do presente trabalho incluía o estudo da performance do vestuário de protecção utilizado, nenhumas destas soluções foi implementada.

5.5. NOTAS FINAIS

O estudo efectuado apresenta-se com uma perspectiva de continuidade do trabalho que tem vindo a ser realizado pela comunidade científica, a que se juntam contribuições inéditas que visam tornar mais completa a abordagem desta problemática. Da perspectiva global à local, com exploração de resultados referentes ao manequim térmico nu e vestido, em repouso e em movimento, dispõe-se hoje de um conjunto significativo de resultados em condições de convecção natural, mista e forçada que, por um lado, importa sublinhar, mas que por outro deixa ainda margem para desafios futuros.

Os ensaios realizados em condições de convecção natural tiveram como palco a câmara climática o que possibilitou a obtenção de resultados numa gama alargada de condições ambientais. Os ensaios realizados no túnel aerodinâmico não foram efectuados em condições controladas. Apesar da estabilidade verificada nestes testes, é óbvio que, quando possível, se deve recorrer a equipamentos que garantam a manutenção das condições

ambientais. A implementação de tal dispositivo experimental na câmara climática existente foi inicialmente admitida como uma possibilidade, mas foi mais tarde abandonada devido a um conjunto de factores em que o aspecto financeiro foi certamente um dos mais importantes.

Relativamente aos resultados obtidos pode-se concluir que enquanto as análises em termos globais podem ser efectuadas com alguma segurança, os comentários sobre os resultados locais devem ser objecto de maior cuidado, dado que eventuais diferenças podem não ser sistemáticas e ter origem numa particularidade atribuível, por exemplo, aos procedimentos experimentais.

Com o corpo nu, na ausência de vento, a presença de movimento faz aparecer uma distinção clara entre zonas do corpo mais ou menos afastadas do tronco. Bem pelo contrário, quando o corpo se move sujeito ao vento, as diferenças a todos os níveis locais atenuam-se com o aumento da velocidade do escoamento a tal ponto que, para valores superiores a cerca de 1 m/s, as condições estática e dinâmica quase não se distinguem.

Foram sugeridas correlações entre os parâmetros adimensionais que regem a convecção natural, mista e forçada. Relativamente aos ensaios realizados na CC, os resultados sugerem um regime de convecção natural fundamentalmente laminar ou de transição. No túnel aerodinâmico, no que diz respeito aos ensaios realizados com o manequim em repouso e em movimento, verifica-se que o fenómeno convectivo é bem representado por uma correlação conjunta. Para a comparação entre o manequim térmico nu e vestido, sugerem-se correlações distintas e no caso da condição com vestuário verificam-se comportamentos diferenciados em convecção mista e forçada.