

ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO EM CABINE DE AERONAVE UTILIZANDO MANEQUIM TÉRMICO E AVALIAÇÕES SUBJETIVAS

Danilo de Moura (1); Victor Barbosa Felix (1); Arlindo Tribess (2)

(1) Mestre em engenharia, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, danilo.moura2@lpoli.usp.br; victor.felix@poli.usp.br

(2) Livre Docente, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, atribess@usp.br
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Conforto Térmico e Qualidade do Ar, Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária – 05508-900 – São Paulo, Brasil.

RESUMO

Cabines de aeronave apresentam condições de escoamento e de trocas térmicas que tornam bastante difícil prover e avaliar condições de conforto térmico. Para tentar resolver o problema, estudos estão sendo realizados em centros de pesquisa, em colaboração com a indústria aeronáutica. O presente trabalho insere-se neste contexto. Neste trabalho foi realizado estudo de conforto térmico utilizando manequim térmico e avaliação com pessoas em cabine de *mock-up*. Para a realização dos ensaios foi projetado e construído *mock-up* de seção de cabine com 12 lugares. Foram analisadas condições de conforto térmico para duas condições de cabine, 19 e 24 °C. Nos ensaios com pessoas participaram 11 voluntários. Verificou-se a ocorrência de uma boa aproximação entre as avaliações de conforto térmico feitas por meio de temperaturas equivalentes e os resultados das análises subjetivas realizadas por meio de questionários. Nas avaliações subjetivas ocorreu um pequeno deslocamento dos resultados para o lado direito no diagrama de voto térmico médio (VTM). Finalmente, verificou-se que nas duas condições os resultados de conforto térmico ficaram na faixa de conforto aceitável para cabines de veículos.

Palavras-chave: Conforto térmico, manequim térmico, temperatura equivalente, avaliação subjetiva.

ABSTRACT

Aircraft cabins present airflow and thermal conditions that make quite difficult to provide and to evaluate thermal comfort conditions. To try to solve the problem, studies are being accomplished in research centers, in collaboration with the aeronautical industry. The present work is inserted in this context. In this work study of thermal comfort was accomplished using thermal mannequin and evaluation with people in *mock-up* cabin. For the accomplishment of the tests it was projected and built a *mock-up* of a cabin section with 12 seats. Conditions of thermal comfort were analyzed for two cabin conditions, 19 and 24 °C. Tests with people were performed with the participation of 11 volunteers. It was verified a good approach between thermal comfort evaluations accomplished by means of the equivalent temperatures and the results of the subjective analyses accomplished by means of questionnaires. In the subjective evaluations occurred a small displacement of the results to the right side in the mean thermal vote (MTV) diagram. Finally, it was verified that in the two cabin conditions the results of thermal sensation were in the band of acceptable comfort for vehicle cabins.

Key-words: Thermal comfort, thermal mannequin, equivalent temperature, subjective evaluation

1. INTRODUÇÃO

A aviação comercial vem experimentando expressivo crescimento com elevado grau de competitividade. Produzir aeronaves com nível de conforto diferenciado transformou-se em importante ferramenta de marketing e de venda. Sabe-se que o conforto, e também a saúde de passageiros e tripulação de aeronaves, podem ser afetados por uma série de fatores ambientais, como qualidade do ar, pressão,

temperatura, umidade relativa, ruído, vibração, iluminação, entre outros. Ao mesmo tempo, cabines de aeronaves podem representar um risco à transmissão de doenças, devido ao elevado número de pessoas em um habitáculo de volume reduzido, com menor espaço de circulação de ar comparado a ambientes de edificações, e prolongado tempo de exposição (Gao e Niu, 2007).

Esses fatores tornam o ambiente de cabine extremamente complexo e dificultam a obtenção e avaliação de condições de conforto. Função disso, estudos estão sendo realizados em centros de pesquisa, em colaboração com a indústria aeronáutica, para melhorar as condições de conforto térmico e de qualidade do ar de cabine. Novas tecnologias de distribuição de ar e de dispositivos de ventilação personalizada estão sendo testadas. Ambientes que reproduzem cabines de aeronaves, os *mock-ups*, estão sendo construídos e condições de conforto e de qualidade do ar de cabine avaliadas (Irgens e Melikov, 2004; Jacobs e Gids, 2005, Strøm-Tejsen et al., 2005; Strøm-Tejsen et al., 2007; Zhang e Chen, 2007; Zhang et al., 2007; Gao e Niu, 2007).

O conforto térmico percebido por passageiros em cabine de aeronaves está diretamente relacionado com as variáveis ambientais, como temperatura, velocidade e umidade do ar. Parâmetros do ambiente de cabine, como temperatura radiante média, assimetria de radiação, layout e densidade de ocupação, também são fatores que influenciam diretamente no conforto térmico dos passageiros.

No que diz respeito ao conforto térmico, um modelo de conforto térmico completo deve incluir (Guan et al., 2003):

- a) Um modelo físico de troca de calor e um modelo de vestimenta
- b) Um modelo de termorregulação fisiológica do corpo humano.
- c) Um modelo de sensação térmica psicológica para prever a resposta do ser humano ao ambiente baseado nas informações dos modelos anteriores.

No desenvolvimento de todos esses modelos há a necessidade do levantamento de valores experimentais de variáveis ambientais e de sensação de conforto térmico. E a melhor forma de se fazer isso em aeronaves é por meio do levantamento de variáveis em condições controladas em *mock-ups* instrumentados (Zhang et al., 2007).

Em veículos automotivos e em aeronaves, em particular, onde diferentes partes do corpo experimentam diferentes condições térmicas, a forma mais indicada para avaliação do conforto térmico é o da determinação de temperaturas equivalentes em diferentes partes (segmentos) de um manequim térmico (Madsen et al., 1986; Gameiro da Silva, 2002; Nilsson, 2004, Strøm-Tejsen et al., 2007). Segundo Strøm-Tejsen et al. (2007) a correlação entre medições em manequins e avaliações subjetivas indica que a sensação local de conforto térmico pode ser estimada de forma segura a partir de medições em manequins.

Na avaliação de conforto térmico atenção especial deve ser dada à avaliação com pessoas. Por ser subjetivo, o conforto experimentado por passageiros em cabines de veículos pode variar de pessoa a pessoa. As respostas desses indivíduos, porém, são baseadas em variáveis percebidas, que caracterizam o ambiente a sua volta, e que interagem com condições psicológicas e fisiológicas individuais, como nível de stress, idade e condições de saúde dos passageiros (Gameiro da Silva, 2002; Hinninghofen e Enck, 2006).

2. OBJETIVO

No presente trabalho são apresentados resultados de análise de conforto térmico em cabine de *mock-up* de 12 lugares utilizando manequim térmico e o conceito de temperatura equivalente, e a realização de avaliações com pessoas aplicando questionários.

3. AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO UTILIZANDO MANEQUIM TÉRMICO

3.1 Manequins térmicos

Segundo Gameiro da Silva (2002), o manequim térmico seria o único instrumento capaz de avaliar simultaneamente os efeitos da temperatura do ar local, velocidades do ar, trocas de calor por radiação e radiação solar em um veículo.

Para poder ser usado em avaliação de conforto térmico no interior de veículos automotivos um manequim deve ter algumas características. Este deve ter o tamanho e o formato de um corpo humano, ser capaz de ser colocado na posição sentada, ser capaz de ser vestido com roupas e permitir a determinação da influência dos parâmetros físicos relevantes ao conforto térmico ao longo de todo o corpo e com a possibilidade de dividir este corpo em segmentos ou zonas (Fig. 1).

Os manequins térmicos atualmente utilizados são divididos em 16 zonas ou mais, até um limite de 32 zonas, independentemente controladas. Para reduzir custos e peso são utilizados materiais como alumínio e plástico. Os controles de regulação de troca de calor dos manequins mais modernos são do tipo digital, mas ainda existem muitos manequins com controles de regulação analógicos (Nilsson, 2004).



Figura 1 Manequim térmico instalado em ambiente simulando cabine de automóvel (Nilsson, 2004).

3.2 Temperaturas equivalentes

A avaliação do conforto térmico utilizando manequim térmico está baseado no conceito de temperatura equivalente, que é definida como sendo a temperatura uniforme de um ambiente imaginário com velocidade do ar igual a zero, no qual a pessoa troca a mesma quantidade de calor sensível, por radiação e convecção, que no ambiente real (Fig. 2).

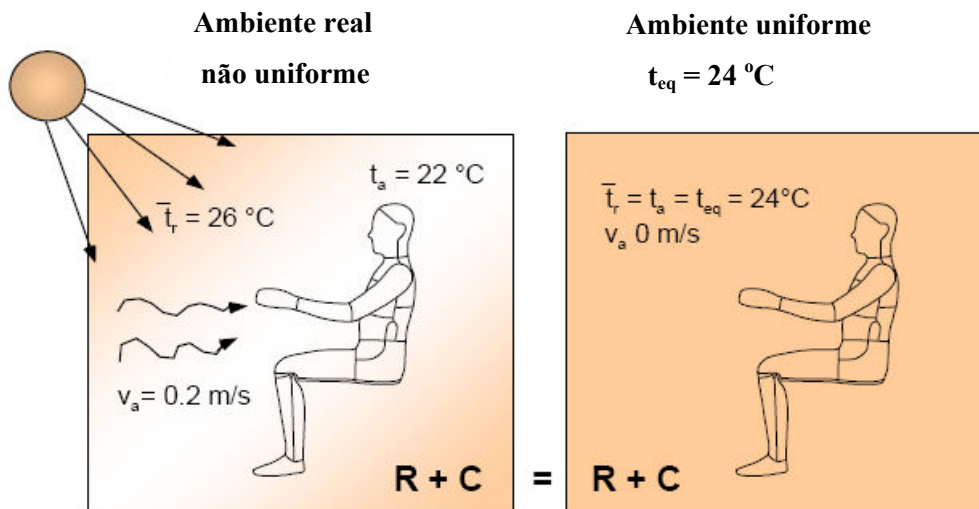


Figura 2 Ilustração da definição de temperatura equivalente (adapt. de Nilsson, 2004)

3.3 Procedimento para avaliação de conforto térmico utilizando manequins térmicos

O procedimento para avaliação de condições de conforto térmico utilizando manequins e o conceito de temperatura equivalente requer o equacionamento das trocas de calor entre os diversos segmentos do manequim e o ambiente, a calibração do manequim e a utilização de diagramas de sensação térmica.

Para a avaliação de condições de conforto térmico em automóveis este procedimento está normalizado e encontra-se na norma ISO 14505-2 (2004). A temperatura equivalente pode ser obtida pela Equação (1).

$$t_{eq} = t_s - \frac{\dot{Q}}{h} \quad (1)$$

onde:

$\dot{Q} = R + C =$ troca de calor por radiação e convecção	[W/m ²]
t_{eq} = temperatura equivalente	[°C]
t_s = temperatura superficial	[°C]
h = coeficiente de transferência de calor combinado, convecção e radiação	[W/m ² °C]

2.3.1 Calibração do manequim

O procedimento de calibração do manequim consiste na determinação de coeficientes de transferência de calor combinado, h , da Equação (1), para os diversos segmentos do corpo em um ambiente padrão. Para satisfazer o conceito de temperatura equivalente, o ambiente padrão é um ambiente homogêneo com temperatura de bulbo seco igual à temperatura radiante média, $t_{ar} = \bar{t}_r$, e com velocidade do ar próximo de zero ($V < 0,1$ m/s). Nestas condições tem-se: $t_{ar} = \bar{t}_r = t_{eq}$.

Uma vez satisfeitas estas condições em ensaio realizado em câmara climatizada e obtidas condições de regime permanente nas trocas de calor do manequim com o ambiente, são realizadas leituras de temperaturas superficiais, t_s , e de fluxo de calor, \dot{Q} , para cada segmento do corpo e calculados valores de coeficientes de troca de calor, h_{cal} , que são os coeficientes de troca de calor da calibração, dados pela Equação (2):

$$h_{cal} = \frac{\dot{Q}}{t_s - t_{eq}} \quad (2)$$

Uma vez calibrado o manequim para a posição e vestimenta do ensaio real, o método de avaliação consiste em posicionar o manequim no ambiente real e medir os fluxos de calor e as temperaturas superficiais de cada segmento. Por meio da Equação (1) é possível determinar a t_{eq} para cada segmento ou para o corpo todo utilizando os valores de h_{cal} da calibração e os novos valores de \dot{Q} e t_s .

$$t_{eq} = t_s - \frac{\dot{Q}}{h_{cal}} \quad (3)$$

As temperaturas equivalentes assim determinadas são indicadores do nível de afastamento entre as condições do ambiente e as condições correspondentes a uma sensação térmica de neutralidade.

2.3.2 Diagramas de sensação térmica

Para se avaliar quão distantes as condições do ambiente se encontram de condições correspondentes a uma sensação térmica de neutralidade, a norma ISO 14505-2 (2004) apresenta diagramas para avaliação de t_{eq} , em função da sensação térmica, para manequim com 16 segmentos (Fig. 3).

Para avaliar condições de conforto a norma ISO 14505-2 (2004) apresenta diagramas de sensação térmica, como o da Figura 4, para condição de verão (resfriamento) com pessoas usando roupas leves com isolamento térmico (básico ou total) igual a $0,6 \text{ clo}^1$.

Os valores de Y na Figura 4 correspondem às temperaturas equivalentes, t_{eq} , e os valores de X aos segmentos do corpo (manequim). O segmento 17 corresponde à t_{eq} para o corpo como um todo. Os números 1 a 5 representam as faixas de sensação térmica, onde 1 representa sensação de frio, 2 levemente frio, 3 neutro, 4 levemente quente e 5 quente.

¹ 1 clo = 0.155 m² °C/W

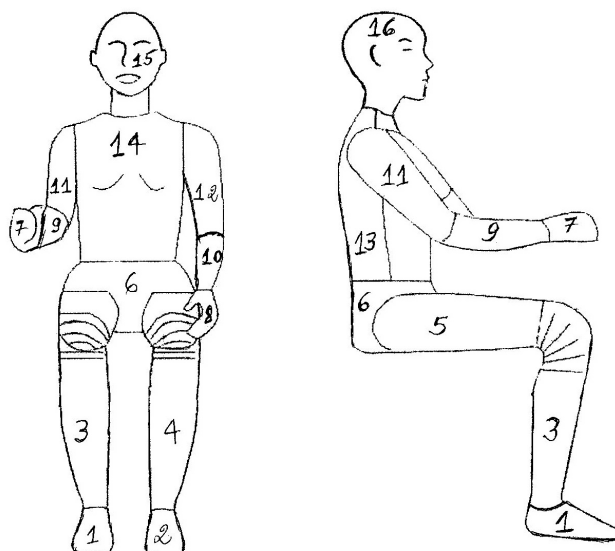


Figura 3 Manequim com 16 segmentos

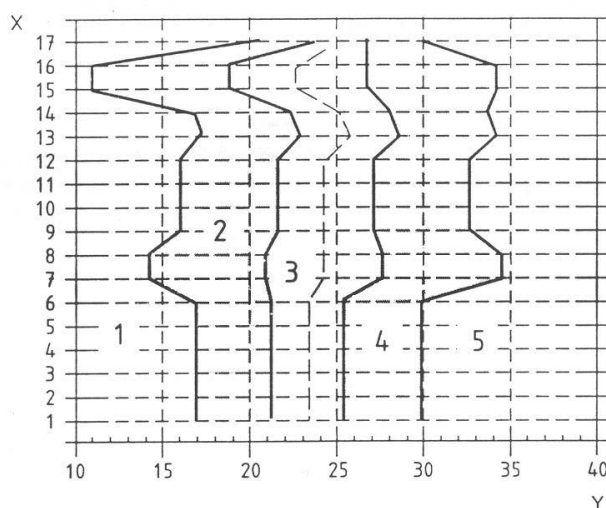


Figura 4 Diagrama de sensação térmica: condição de verão, resfriamento (ISO 14505-2, 2004)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho compreende três etapas:

- Projeto e construção de *mock-up* de uma seção de aeronave;
- Levantamento de temperaturas equivalentes utilizando manequim térmico e manequins aquecidos simulando pessoas;
- Avaliação subjetiva realizada com pessoas na cabine.

4.1. O *mock-up*

Para se atingir os objetivos do trabalho um *mock-up* de uma seção de aeronave com 12 lugares foi projetado e construído. A Figura 5 mostra o fluxograma de distribuição e circulação do ar na cabine do *mock-up*. Por meio dessa figura é possível verificar que o ar proveniente de um *fan-coil* é levado até o *bin* (bagageiro), que funciona como um *plenum*, e dos *bins* este ar é insuflado na cabine. O retorno é executado pela parte inferior lateral que expurga o ar para o laboratório, de onde é retirado através de um sistema de exaustão e renovação de ar, para voltar a ser resfriado no *fan-coil* e insuflado no *mock-up*.

O *mock-up* foi projetado com 12 lugares, distribuídos em três fileiras de quatro assentos. As dimensões aproximadas são 3 x 3 x 2,5m de altura. O insuflamento de ar é realizado pela parte superior e lateral dos *bins* e o retorno pela parte inferior lateral (Fig. 6). Na Figuras 7 são mostrados detalhes referentes

aos difusores de insuflamento na parte superior e do retorno do ar na parte inferior do *mock-up*, respectivamente.

4.2 Calibração do manequim

Para a obtenção de temperaturas equivalentes, inicialmente foi realizada a calibração do manequim térmico de acordo com procedimento previsto na norma ISO 14505-2 (2004) e apresentado no item 2 do presente trabalho.

O manequim foi colocado no ambiente de calibração (Fig. 8) com a mesma vestimenta e posição no banco em que foi posteriormente colocado no *mock-up* para teste. A temperatura da câmara de calibração foi monitorada durante os ensaios, bem como a velocidade, que permaneceram nos valores previstos na norma: em torno de 24 °C, com $V < 0,1$ m/s ($t_{eq} = 24$ °C).

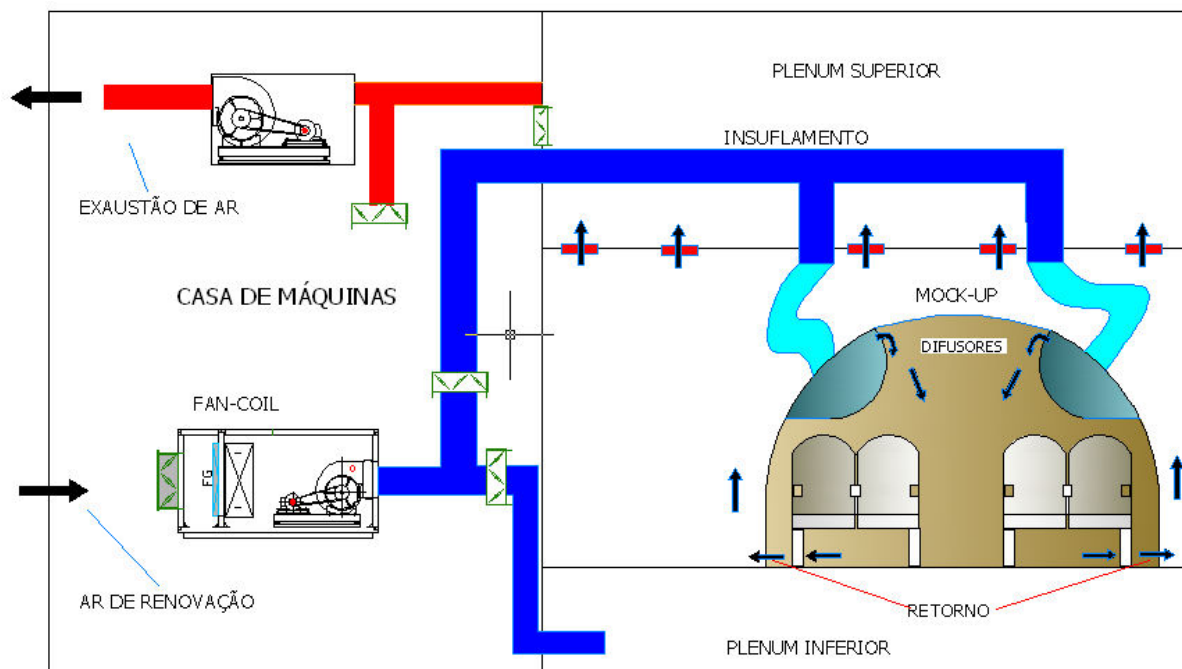


Figura 5 Fluxograma de ar da cabine do *mock-up*

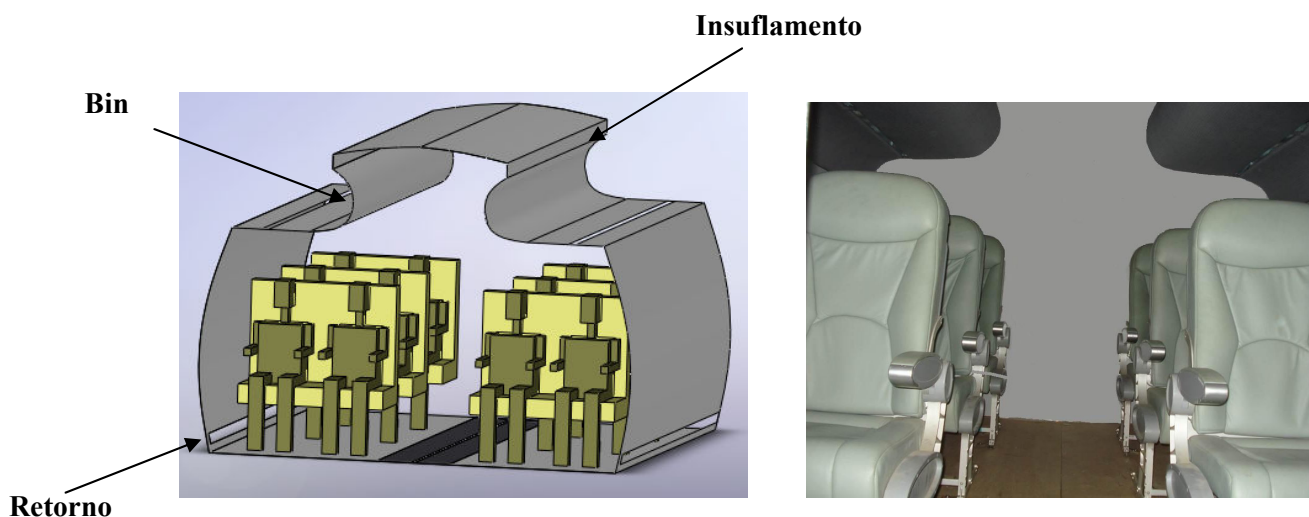


Figura 6 Detalhes do *mock-up*



Figura 7 Detalhes do insuflamento e do retorno do ar no *mock-up*



Figura 8 Manequim térmico na câmara de calibração

A calibração foi executada com o manequim trajando vestimenta com aprox. 0,6 clo, correspondente a uma vestimenta de condições de verão (resfriamento) e fluxo de calor constante de 70 W/m^2 em todos os segmentos, conforme previsto na norma ISO 14505-2 (2004).

4.3. Condições de teste na cabine do *mock-up*

Com o objetivo de analisar duas condições distintas de cabine na avaliação de conforto térmico com manequim térmico e pelas pessoas, os ensaios foram realizados considerando-se duas temperaturas de cabine, medidas no retorno do ar da cabine:

- 1) Temperatura de $24^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.
- 2) Temperatura de $19^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.

4.4 Determinação de temperaturas equivalentes

Para a avaliação de condições de conforto térmico o manequim foi posicionado na cabine, juntamente com manequins aquecidos simulando pessoas, conforme apresentado na Figura 9. Em seguida, foram levantadas temperaturas superficiais nos diversos segmentos do manequim térmico nas duas condições de temperatura da cabine (19 e 24°C). O fluxo de calor em cada segmento do manequim térmico foi mantido constante em 70 W/m^2 (mesmo valor da calibração).



Figura 9 Posicionamento do manequim térmico e dos manequins aquecidos na cabine do *mock-up*

4.5 Avaliações subjetivas

As condições de ensaio com pessoas foram as mesmas daquelas quando da realização com o manequim térmico. Este procedimento possibilita relacionar temperaturas equivalentes com os votos das pessoas quanto à sensação de conforto nos diversos segmentos do corpo.

As pessoas que participaram do ensaio estavam vestidas com roupas que proporcionam um isolamento térmico referente a 0,6 clo (condição de verão). Cada ensaio teve a duração de uma hora e as pessoas responderam perguntas sobre a sensação térmica e desconforto local.

Os procedimentos de ensaio e questionário foram os previstos na norma ISO 14505-3 (2006), que prevê o mínimo de 8 votos realizados em cabines de veículos automotivos para avaliação subjetiva. No presente trabalho foram realizados testes subjetivos com 11 pessoas do sexo masculino, das quais 8 já haviam realizado vôos comerciais.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 Avaliação de conforto térmico utilizando manequim térmico

Uma vez obtidas as temperaturas superficiais, t_s , para cada segmento do corpo, considerando condições de temperatura de cabine de 19 e 24 °C, foram determinadas as temperaturas equivalentes, t_{eq} , para análise de condições de conforto térmico, utilizando a Equação (3)

$$t_{eq} = t_s - \frac{\dot{Q}}{h_{cal}} \quad (3)$$

com os coeficientes de transferência de calor calibrados, h_{cal} , apresentados em Moura (2009).

As temperaturas equivalentes obtidas para cada segmento do corpo nas duas condições de temperatura de cabine são apresentadas na Figura 10, em diagrama de sensação térmica proposto pela norma ISO 14505-2 (2004).

Da análise da Figura 10 é possível verificar que para temperatura de cabine de 24°C ocorre tendência à leve sensação de calor, enquanto para a temperatura de 19°C há tendência à leve sensação de frio.

5.2 Avaliações subjetivas

Avaliações subjetivas para levantamento da sensação térmica foram realizadas utilizando questionário apresentado em Moura (2009), com participação de 11 voluntários vestidos com roupas de verão equivalentes a 0,6 clo. Com a aplicação dos questionários foi possível realizar o levantamento do voto térmico médio (VTM) para cada parte do corpo considerada, cujos resultados são apresentados na Figura 10. A escala considerada para a determinação de VTM é apresentada na Figura 11.

Na análise do VTM (Fig. 11) observa-se que a temperatura de cabine de 19°C ocasiona um desconforto menor do que a temperatura de 24°C, sendo que os valores de VTM na temperatura de cabine de 24°C mostram leve sensação de calor na maior parte do corpo dos voluntários.

Pela análise das Figuras 10 e 11, observa-se que o comportamento apresentado no diagrama de VTM (Fig. 11) é semelhante ao apresentado no diagrama de sensação térmica construído com temperaturas equivalentes (Fig. 10). Nota-se, contudo, um leve deslocamento dos resultados de VTM para o lado direito do diagrama quando comparados com aqueles do diagrama de sensação térmica construído com temperaturas equivalentes.

De uma forma geral, pode se dizer que os resultados obtidos na avaliação subjetiva apresentaram boa concordância com os resultados obtidos com a avaliação por meio da temperatura equivalente e utilização do diagrama de sensação térmica da norma ISO 14505-2 (2004). Estes resultados mostram que, para as condições de cabine avaliadas, o diagrama de sensação térmica da norma representa razoavelmente bem as condições de conforto na cabine. E que as pessoas sentiram um leve desconforto por calor na temperatura de 24°C

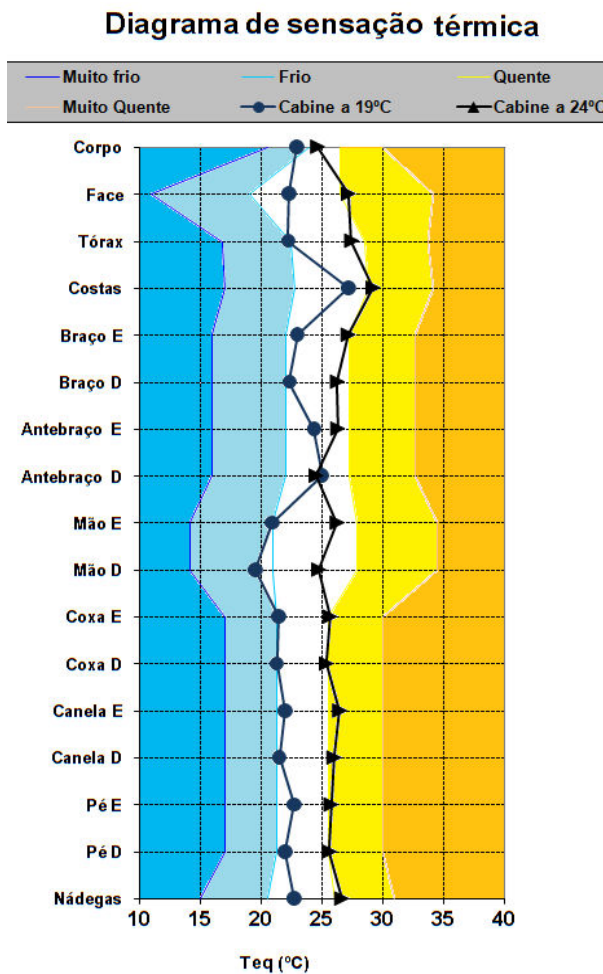


Figura 10- Temperaturas equivalentes em diagrama de sensação térmica segundo norma ISO 14505-2 (2004)

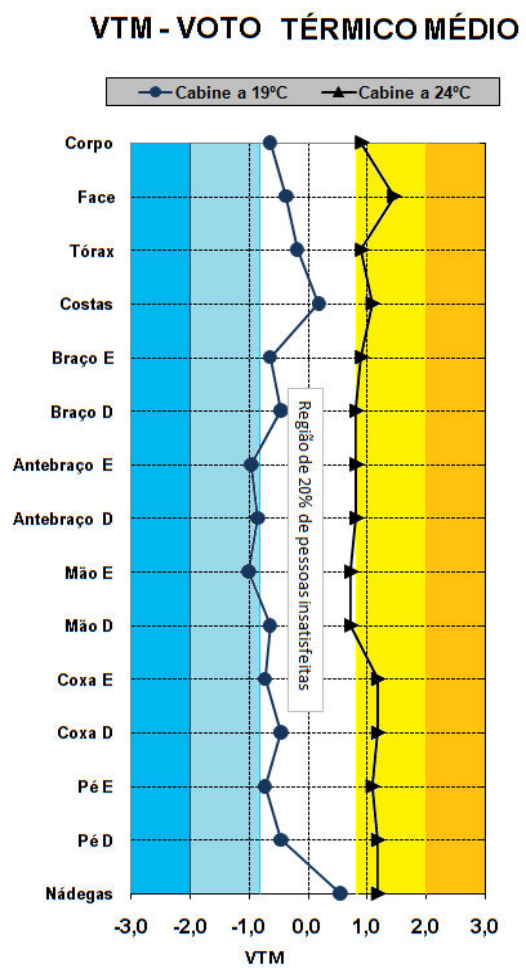


Figura 11 - Voto térmico médio (VTM)

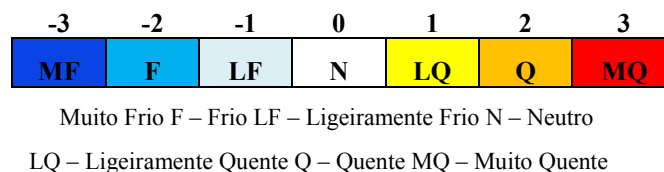


Figura 12 Escala utilizada na obtenção do voto térmico médio (VTM)

6. CONCLUSÕES

Verificou-se a ocorrência de uma boa aproximação entre as avaliações de conforto térmico feitas por meio das temperaturas equivalentes utilizando manequim térmico instrumentado e os resultados das análises subjetivas realizadas por meio de questionários. Nas avaliações subjetivas ocorreu um pequeno deslocamento dos resultados para o lado direito no diagrama de VTM. Nas temperaturas de cabine avaliadas, de 19°C e 24°C, verificou-se que nas duas condições os resultados de conforto térmico ficaram na faixa de conforto aceitável para cabines de veículos.

Ademais, a utilização de *mock-ups* tem sido uma importante ferramenta no estudo de conforto térmico em cabines de aeronaves, proporcionando flexibilidade e autonomia para o pesquisador.

7. REFERÊNCIAS

- Gameiro da Silva, M. C. (2002). Measurements of Comfort in Vehicles. Meas. Sci. Technol. 13 (2002) R41 – R60 PII: S095-0233(02)27461-5.
- Gao N. P, Niu J. L. (2007). Personalized ventilation for commercial aircraft cabins. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- Guan, Y.; Hosni, M. H.; Jones, W. J.; Giolda, T. P. (2003). Investigation of Human Thermal Comfort under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 2: Thermal Sensation Modeling. ASHRAE Trans., 109(2): 898-907.
- Hinninghofen H.; Enck P. (2006). Passenger well-being in airplanes. Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical (in press).
- Irgens, S.; Melikov. A. (2004) Assessment of the thermal environment in an aircraft cabin. Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra. Portugal. 5-8 September 2004.
- ISO 14505-2. (2004). Ergonomics of the thermal environment – Evaluation of thermal environment in vehicle – Part2: Determination of Equivalent Temperature. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 14505-3 (2006). Ergonomics of the Thermal Environment – Evaluation of Thermal Environment in Vehicles Part 3: Evaluation of Thermal Comfort Using Human Subjects. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jacobs P, Gids W.F.(2005) .The aircraft seat as indoor air quality and temperature control system. Proceedings of Indoor Air 2005. Beijing.
- Madsen, T. L.; Olesen, B.; Reid, K. (1986). New methods for evaluation of the thermal environment in automotive vehicles, ASHRAE Transactions 92 part 1B, 38-54.
- Moura, D. Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de aeronave. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 74p.
- Nilsson, H.O. (2004). Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Modes. Stockholm. Tese (Doutorado) – Department of Technology and Built Environment – University of Gävle, Sweden. 202p.
- Pennecot, J.; Bosbach, J.; Wagner, C.; Rafael, M.; Lerche, T.; Repp, S. (2004) Mixed convection in Idealized Airplane-Cabins: A Comparison Between Numerical Simulations and Particle Image Velocimetry Measurements. Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra. Portugal. 5-8 September.
- Strøm-Tejsten P, Wyon D P, Zukowska D, Jama A, Fang L. (2005). Occupant Evaluation of 7-hour Exposures in a Simulated Aircraft Cabin – Part 2: Thermal effects. Proceedings of Indoor Air 2005, p. 1-10, Beijing.
- Strøm-Tejsten P, Zukowska D, Jama A, Wyon D P. (2007). Assessment of the Thermal Environment in a Simulated Aircraft Cabin Using Thermal Manikin Exposure. Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki, p. 1-10.
- Zhang T, Chen Q. (2007). Novel Air Distribution Systems for Commercial Aircraft Cabins. Building and Environment (42):1675-1684.
- Zhang Z, Chen X, Mazundar S, Zhang, T. Chen, Q. (2007). Experimental and Numerical Investigation of Airflow and Contaminant Transport in an Airliner Cabin Mock-up. Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki, p. 1-10.

7. AGRADECIMENTOS

O autor Danilo de Moura gostaria de agradecer à FAPESP pela concessão de bolsa de mestrado. Os autores Victor Barbosa Felix e Arlindo Tribess gostariam de agradecer ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado e de pesquisa, respectivamente.