



STRESS TÉRMICO NA FRENTE DE FOGO NO COMBATE A INCENDIO FLORESTAL: AVALIAÇÃO DE RISCO^{1*}

Mário A.R. Talaia

Departamento de Física, Universidade de Aveiro, e
ISCIA - Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração, Aveiro
mart@ua.pt

Valente Ferreira

ISCIA - Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração, Aveiro
jose-antonio.ferreira@netvisao.pt

RESUMO

A temperatura é um dos parâmetros mais importantes a considerar quando se pretende avaliar o stress térmico do ser humano. Nesta investigação avalia-se um choque térmico que ocorre, muitas vezes, durante um incêndio florestal e que é suscitado quando em dado momento se faz a luta com base em água em jacto e com uma exposição durante o combate com meios sapadores.

São usados índices de stress térmico, para um ambiente quente por efeito da transferência de energia sob a forma de calor, por radiação, convecção e evaporação, nomeadamente, os índices WBGT, HSI, ITE. Os resultados são comparados com a interpretação física a partir do diagrama de duas entradas da WMO.

Palavras chave: incêndio florestal, choque térmico, stress térmico, índices bioclimáticos, hipertermia.

RÉSUMÉ

La température est l'un des paramètres les plus importants à envisager lorsque l'on cherche à évaluer la contrainte thermique de l'être humain. Dans cette investigation est évalué un choc thermique qui se produit souvent au cours d'un incendie de forêt et est soulevée lorsque, à un certain point, la lutte est fondée sur un jet d'eau et une exposition au milieu du combat avec les sapeurs.

Des indices sont utilisés pour le stress thermique. Dans un environnement chaud pour le transfert d'énergie sous forme de chaleur, par rayonnement, par convection et par évaporation, sont utilisés des indices, en particulier, le WBGT, le HSI et le ITE. Les résultats sont comparés à l'interprétation physique du diagramme des deux entrées WMO.

Mots-clé: feu de forêt, choc thermique, stress thermique, indices bioclimatiques, hyperthermie.

ABSTRACT

Temperature is one of the most important parameters to consider when attempting to evaluate the thermal stress of the human being. In this investigation is evaluated the thermal shock which happens, a lot of times, during a forest fire and occurs when the fight is done with a jet of water and one exposure during the combat with sappers means.

Here are used indices of thermal stress, to a thermal environment, to a hot atmosphere due the effect of energy transfer as heat, on behalf of radiation, convection, evaporation, namely, the WBGT, the HSI and the ITE. The results are compared with the physical interpretation from the diagram of two entries WMO.

Key words: forest fire, thermal shock, thermal stress, bioclimatic indices, hyperthermia.

¹O texto deste artigo corresponde à comunicação apresentada ao V Encontro Nacional e I Congresso Internacional de Riscos e foi submetido para revisão em 02-07-2009, tendo sido aceite para publicação em 19-02-2010.
Este artigo é parte integrante da Revista Territorium, n.º 17, 2010, © Riscos, ISBN: 0872- 8941.

Introdução

O Homem é um ser vivo homeotérmico ou seja, dentro de certos limites, independentemente da temperatura exterior, a sua temperatura interna mantém-se constante. Esta conservação da temperatura interna realiza-se através de certos mecanismos fisiológicos de regulação térmica, sendo estes responsáveis pela conservação e dissipação de energia.

Para a generalidade das células vivas, os limites máximos de tolerância da temperatura são aproximadamente 0°C e 45°C. O limite inferior, denominado temperatura crítica inferior, está relacionado com a formação de cristais de gelo na célula, que provoca a rotura da membrana celular, e sua consequente morte. O limite superior, denominado temperatura superior crítica, está relacionado com a coagulação das proteínas intracelulares que provoca igualmente a morte da célula. No caso do Homem, estes limites estão relacionados com a temperatura do ambiente mais elevada e mais baixa que permitem a manutenção da temperatura interna em cerca de 37°C, considerada como a temperatura óptima. Este valor pode oscilar devido à exposição de ambientes quentes ou frios, doenças ou prática de exercício.

Quando a temperatura ambiente não permite que o organismo humano permaneça em neutralidade térmica, como é o caso de situações de stress térmico, o organismo acciona mecanismos fisiológicos de regulação térmica de forma a manter constante a temperatura do núcleo. A temperatura cutânea média é muito influenciada pelas condições do microclima que se apresenta em redor do ser humano. Por este motivo a regulação térmica e consequente acção dos mecanismos fisiológicos de regulação térmica, são realizados atendendo à temperatura do núcleo.

As trocas ou transferências de energia sob a forma de calor, entre o corpo humano e o ambiente são realizadas segundo quatro processos: condução, convecção, radiação e evaporação. Quando ocorre um “erro” de carga positivo, é necessário que ocorram trocas de energia entre a superfície do corpo e o meio ambiente - perda de energia sob a forma de calor.

Quando se fala em stress térmico em ambiente quente, fala-se da hipertermia que está relacionada com uma temperatura do corpo elevada, normalmente acima de 40°C. Nestas circunstâncias o corpo humano é incapaz de promover a perda de energia sob a forma de calor ou reduzir a produção de calor. Um aumento elevado da temperatura do corpo pode ser causado tanto por elementos externos como por reacção do organismo. Há sintomas que devem ser valorizados na hipertermia quando cessa a transpiração, aumenta a frequência cardíaca, intensifica-se a respiração; ocorre confusão mental, tontura, náusea e dor de cabeça. Uma via

de travar a hipertermia é interromper a exposição ao(s) factor(es) desencadeante(s) e usar *métodos de arrefecimento*.

Neste trabalho de investigação estamos particularmente interessados numa exposição do corpo humano na frente de fogo durante o combate a incêndio florestal.

É aceite que a temperatura humana considerada normal está próxima dos 36,5 °C. De 37,5°C a 40°C considera-se que não há riscos graves para a saúde. Acima de 40°C pode favorecer convulsões. Se ultrapassar uma temperatura de 43°C, o ser humano deverá ser levado aos serviços de urgência hospitalar, pois pode ocorrer morte (devido à destruição parcial da estrutura das proteínas, à instabilidade das membranas celulares, à alteração das vias metabólicas dependentes de oxigénio, etc.).

Se houver condições externas para que a temperatura corporal ultrapasse 51 °C, irá ocorrer rigidez muscular e morte instantânea.

Os órgãos internos (fígado, cérebro, coração e músculos esqueléticos) são os principais responsáveis pela produção de calor. Este calor é então transferido através do fluxo sanguíneo para a pele, onde é perdido para o meio ambiente. Quando a temperatura do meio é superior à temperatura da pele, o corpo ganha energia sob a forma de calor, sendo o processo de evaporação o único meio de diminuir a temperatura corporal.

A transferência de energia sob a forma de calor por radiação sobre o corpo humano tem pelo menos dois efeitos. Um é a queima à distância. Por exemplo, a energia recebida do Sol, caracterizada pela radiação solar na unidade de tempo e por unidade de área, que incide numa superfície exterior, chama-se constante solar S . O valor medido à superfície da terra é aproximadamente 1353W.m². A energia recebida do Sol é predominante de forma de energia radiante, de natureza electromagnética (radiação solar). A emitância radiante integral E_b (o índice b representa corpo negro, do inglês “black”) é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (lei de STEFAN-BOLTZMANN), sendo o seu valor determinado a partir da expressão $E_b = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ representa a constante de STEFAN-BOLTZMANN (IQBAL, 1983; MCINTOSH E THOM, 1981). O corpo humano absorve parte da energia que é intersectada pela superfície exposta, cerca de 70-80%, condicionada pelo albedo (fracção de energia reflectida pela superfície intersectada). A energia que é absorvida provoca um aumento da temperatura interna do corpo, por aplicação directa da lei de Stefan-Boltzmann.

O corpo humano é essencialmente constituído por água. A água funciona como um reservatório de calor, pois demora muito tempo a aumentar a temperatura, mas também demora muito tempo a arrefecer. Esta situação deve-se ao alto valor da capacidade térmica mássica da

água cujo valor é $4185,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. A capacidade térmica mássica do diferencial do corpo humano aceite é cerca de $1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Se for assumido que a percentagem de água é de 60% para um ser humano com 75kg de massa, facilmente se conhece a capacidade térmica mássica ponderada do corpo humano e, portanto, a quantidade de energia sob a forma de calor, através da expressão

$$\text{ou} \quad \frac{Q}{\Delta T} \cong \sum m_i c_i \quad (1)$$

$$\text{e} \quad \frac{Q}{\Delta T} \cong m_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{tecidos}} c_{\text{tecidos}} \quad (2)$$

$$\frac{Q}{\Delta T} \cong 230 \quad (3)$$

Da expressão (3) é possível concluir que, para uma pessoa adulta que tenha problemas de transpiração, um aumento da temperatura interna do corpo humano de 1°C provoca 230kJ de energia que deve ser dissipada (pode-se considerar golpe de calor).

Se for considerada como superfície exposta uma área de $5,0,5 \text{ m}^2$ [de acordo com DUBOIS E DUBOIS (1916) o valor típico da área da superfície extensível do corpo nu para um homem com 75kg e 1,7m de altura é de $1,7 \text{ m}^2$], para a absorção de energia sob a forma de calor num intervalo de tempo ou seja para uma potência P de $10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ou $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (situação com uma potência de fogo de $2000 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ e a uma distância de 5m) a relação $\Delta t / \Delta T$ é determinada usando a expressão

$$\frac{\Delta t}{\Delta T} = \frac{mc}{SP} \quad (4)$$

$$\text{e} \quad \frac{\Delta t}{\Delta T} = 46 \text{ s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \quad (5)$$

A interpretação física derivada a partir da observação da expressão (5) permite concluir que em cada intervalo de tempo de 46s é registado um aumento da temperatura interior do corpo humano de 1°C .

Considere-se o caso de hipertermia. Nesta situação não há eficácia dos mecanismos de termorregulação e dos comportamentos preventivos, e são estabelecidas situações de stress térmico que podem levar a danos graves no metabolismo e “falência” dos órgãos internos, associada a “erro” de carga positivo, devido a temperatura corporal média ser superior a 42°C (MTSA, 2001).

Por exemplo, para uma temperatura de 42°C , a que corresponde um aumento em cerca de 5°C , serão necessários, de acordo com a expressão (5), apenas 230s

ou cerca de 4min, para a temperatura interna corporal passar de 37°C para 42°C . É de facto muito pouco tempo (é bom lembrar que se está perante uma situação crítica de ausência de transpiração). Nestas circunstâncias o choque térmico pode levar à morte ou à falência cardíaca.

Adicionalmente, o stress produzido pelo medo, a inalação de ar demasiado quente, a actividade desenvolvida, a retirada do local, etc., pode aumentar a quantidade de calor absorvido pelo corpo reduzindo o prazo para ser desencadeado um choque térmico. As roupas de protecção absorvem energia sob a forma de calor por radiação e aquecem. Estas por sua vez, transferem energia sob a forma de calor para o corpo humano por condução, por convecção e por radiação. As roupas devem ser confeccionadas com alguma “folga” de modo a permitirem a formação de correntes de convecção e estas acelerarem a taxa de evaporação (devida à transpiração). Se esta situação não for levada em consideração ou se for limitado o processo de evaporação (importante para a cedência de energia interna do corpo humano) os tecidos superficiais podem “cozer”.

Num incêndio de grande dimensão, a roupa do bombeiro deve condicionar o tempo de exposição, de modo a ser evitado um choque térmico. Quando um bombeiro florestal está totalmente coberto, com o fim de não se expor à energia radiante proveniente das chamas, pode não ter capacidade de avaliar a radiação térmica que recebe e esta situação pode suscitar choque térmico. O equipamento utilizado pode não ter qualquer protecção contra o ar quente, fumos e gases tóxicos, nem contra explosões de gás. A inalação destes aerossóis pode matar instantaneamente por queimadura das vias respiratórias e dos pulmões.

Na literatura da especialidade há informação de que o uso de roupa de lã ou de algodão facilita o processo de evaporação do suor. Antebraços nus permitem controlar o poder da energia sob a forma de calor por radiação que é interceptada pela superfície cutânea de modo a evitar o limite de dor (potência por unidade de área superior a $2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$).

A necessidade de água para compensar a taxa de evaporação pode ser avaliada através de dois factores: (1) devido à frente de fogo, com fraca intensidade, assume-se um nível de metabolismo de 500W (por exemplo, compare-se este valor com os seguintes valores típicos aceites: para actividade em floresta manuseando uma motosserra $205 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; para agricultura lavrando com uma junta de animais $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; para construção civil manuseando pedras $275 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; para a agricultura manuseando uma enxada com 24 golpes por minuto $380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) e outro (2) devido a performance do meio ambiente envolvente, sendo aceite 200W (considerando a potência interceptada pela superfície corporal, cuja

área de frente estimada é 0,14m²). Assim, a potência total será de 700W que deverá ser compensada através do processo de evaporação, de modo a ser evitado choque térmico.

O tempo máximo na ausência de arrefecimento interior do corpo humano pode ser avaliado, partindo da expressão geral, em que $P = 700 \text{ W}$ e $mc = 230 \text{ kJ} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{mc} \Leftrightarrow \Delta t \cong 328,57 \Delta T \quad (6)$$

Para uma $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ o tempo máximo para choque térmico será cerca de 27min.

Para haver compensação ou equilíbrio térmico é necessário que a superfície corporal possa eliminar uma quantidade de líquido de suor. Esta avaliação é realizada a partir do conceito físico de calor de transformação L ou de variação de entalpia e dada através de

$$Q = mL \Leftrightarrow Q = \rho VL \quad (7)$$

em que ρ representa a massa volúmica do líquido e V o volume do líquido.

O calor de transformação depende da temperatura. Para uma temperatura de cerca de 40°C o valor tabelado é de $574,7 \text{ Cal} \cdot \text{g}^{-1}$ ou $2,405 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (IRIBARNE E CHO, 1980).

A partir de manipulações matemáticas a expressão (7) toma o aspecto

$$\frac{V}{\Delta t} = \frac{P}{\rho L} \quad (8)$$

Conhecida a potência (energia por unidade de tempo) interceptada pela superfície do corpo humano é possível avaliar a taxa de perda de água ou a taxa de reposição. Nestas circunstâncias, para uma potência de 700 W e um tempo de 27,5 min, resulta uma necessidade de cerca de 0,5 L de água. No fim de uma hora, a necessidade é de cerca de 1,1 L de água. Assim, para equilibrar esta perda de água, é necessário beber uma quantidade no mínimo igual ou mesmo um pouco superior.

Num incêndio florestal é determinante conhecer o poder do fogo para avaliar a quantidade de água necessária ao seu ataque, adoptar estratégias de combate e defesa, conhecer os riscos que o grupo de bombeiros irá enfrentar e fazer prevenção de evacuação se necessário.

Na frente de combate o bombeiro deve ter conhecimento dos riscos envolvidos. A distância às chamas condiciona a potência térmica que intersecta a área corporal.

Conforme referido anteriormente, estamos particularmente interessados no choque térmico que ocorre, muitas vezes, durante um incêndio florestal e que é suscitado quando, em dado momento, se faz a luta com base em água em jacto ou nevoeiro e com a exposição

durante o combate com meios sapadores, ou seja, com abafadores, pás, enxadas, moto-roçadoras, e outros, como se mostra na fig. 1. Embora esta última forma de combate seja feita um pouco mais distante da frente de chamas é bastante usual, sendo o ambiente envolvente (temperatura, gases, partículas, etc.) e o esforço físico dispendido extremamente elevado.



Fig. 1 - Imagens de luta com o fogo com base em água e meios sapadores.

Para avaliar a oportunidade da ocorrência de choque térmico usaram-se diferentes índices de stress térmico, que foram aplicados a uma colecção de dados simulada. Os dados usados tiveram como suporte a temperatura mínima que o corpo falece numa situação de hipertermia. Nestas circunstâncias, considerou-se importante uma temperatura superior a 40°C e uma humidade relativa alta devido, como anteriormente referido, ser a luta feita com base em água de jacto. A velocidade do vento será considerada sempre que oportuno e sempre que o modelo o permita.

Índices de stress térmico

Foram usados alguns índices de stress térmico, para ambiente quente por efeito do calor, nomeadamente os índices *HSI*, *ITE*, *WBGT* e diagrama de duas entradas da *WMO*.

HSI - Heat Stress Index

O *HSI*, Índice de Stress por CALOR (tradução do inglês "Heat Stress Index") é um índice para avaliação de stress térmico e foi definido pela primeira vez por BELDING E HATCH (1955). O índice *HSI* traduz a proporção entre a evaporação necessária para manter o equilíbrio térmico e a evaporação máxima conseguida no ambiente térmico, expressa em percentagem,

$$HSI = \frac{E_{REQ}}{E_{MAX}} 100 \quad (9)$$

onde E_{REQ} representa a evaporação necessária para manter o equilíbrio térmico ou perda requerida por evaporação ($\text{W} \cdot \text{m}^2$) e E_{MAX} a evaporação máxima conseguida no ambiente térmico ($\text{W} \cdot \text{m}^2$).

O índice *HSI* pressupõe uma temperatura da pele constante de 35°C, uma superfície corporal de 1,86m² e despreza as trocas de calor através da respiração.

A evaporação necessária e a máxima são calculadas a partir das expressões

$$E_{REQ} = M - R - C \quad (10)$$

$$E_{MAX} = K_3 v^{0,6} [56 - e(T)] \quad (11)$$

em que E_{MAX} representa a perda máxima por evaporação com limite superior de 390W.m⁻², $e(T)$ a pressão parcial de vapor à temperatura T , R o calor perdido por radiação (W.m⁻²) dado por $R = K_1 (35 - T_{RM})$, C o calor perdido por convecção (W.m⁻²) dado por $C = K_2 v^{0,6} (35 - T)$ e T_{RM} a temperatura radiante.

As constantes K_1 , K_2 e K_3 , e têm valores diferentes para indivíduos nus ou vestidos. A Tabela I indica alguns valores típicos usados para indivíduos vestidos.

Tabela I: Constantes para índice HSI [adaptado de CORLETO (1998)].

constante	valor com roupa
K_1	4,4
K_2	4,6
K_3	7,0

O valor máximo permitido de E_{MAX} de 390Wm⁻² permite obter uma taxa de evaporação de cerca de 1,1L.h⁻¹ para um homem de superfície corporal 1,86m² e que se encontre em perfeito estado de saúde. Este valor equivale a taxa de evaporação máxima que pode ser mantida num período de 8 horas (MTSA, 2001).

Se a E_{REQ} for superior que E_{MAX} , o organismo não consegue manter o balanço térmico e a temperatura interna do corpo humano aumenta, pois há armazenamento de calor no corpo, correspondendo a um valor de *HSI* superior a 100%.

A interpretação do índice de stress por calor, *HSI*, é considerada para uma exposição de 8 horas de trabalho contínuo.

Por exemplo, para $40 < HSI < 60$ o stress por calor é intenso e pressupõe risco para a saúde do indivíduo. O risco pode ser atenuado se o indivíduo possuir uma boa condição física, havendo necessidade de aclimatização.

Para $70 < HSI < 90$ o stress por calor é muito intenso, os indivíduos deverão ser seleccionados mediante rigoroso exame médico e há necessidade de ingestão de água e sais minerais. Para $HSI = 100$ indica stress por calor máximo tolerado por indivíduos jovens, em boa forma física e aclimatizados. $HSI > 100$ indica um tempo de exposição

limitado por um aumento da temperatura interna e são necessárias estratégias de intervenção imediatas.

O tempo máximo de exposição *AET* (tradução do inglês "Allowable Exposure Time"), expresso em minutos, pode ser determinado através da expressão

$$AET = \frac{2440}{E_{REQ} - E_{MAX}} \quad (12)$$

O valor de *HSI* determinado para situações caracterizadas por pequenas velocidades do ar pode indiciar situações mais severas que as indicadas por outros índices de stress térmico. A contribuição do movimento de ar devido ao movimento corporal é desprezada e a transpiração não é feita uniformemente (gotas de suor que caem e não evaporam na pele não contribuem para um arrefecimento do corpo).

ITE - Índice da Temperatura Efectiva

A temperatura efectiva é um dos índices de stress térmico com uma maior área de aplicação. O Índice da Temperatura Efectiva *ITE* estabelecido por HOUGHTEN E YAGLOU (1923) permite relacionar os efeitos da temperatura T do ar e da humidade relativa do ar *HR* no conforto/desconforto do ser humano.

Assim, dois ambientes com a mesma temperatura efectiva devem admitir a mesma resposta térmica, mesmo com valores diferentes de temperatura do ar e de humidade relativa do ar desde que se registre o mesmo valor da velocidade do ar (ASHRAE, 2001).

Na prática, o Índice da Temperatura Efectiva pode ser avaliado de duas formas, ou através de cartas psicrométricas ou analiticamente.

De acordo com THOM (1959) o *ITE* pode ser determinado analiticamente recorrendo à expressão,

$$ITE = 0,4(T_{wn} + T) + 4,8 \quad (13)$$

em que T_{wn} representa a temperatura húmida e T a temperatura do ar.

MIKANI E AMORIM (2005) disponibilizam valores limites para o índice *ITE*. Segundo estes autores há stress provocado por ambiente quente quando $ITE \geq 25,6^\circ\text{C}$.

WBGT - Wet Bulb Globe Temperature

O índice *WBGT*, Índice de Temperatura de Bolbo Húmido e de Temperatura de Globo (tradução do inglês "Wet Bulb Globe Temperature Index") é um dos mais utilizados na avaliação de conforto térmico.

De acordo com YAGLOU e MINARD (1957), o índice WBGT foi desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos da América após uma investigação sobre acidentes por calor sofridos pelo pessoal militar.

A norma que regulariza a determinação do índice WBGT é a ISO 7243 (1989) que define o nível de desconforto do ambiente em situações onde por razões técnico-económicas se torna impossível aplicar a norma ISO 7730 (2005). O índice WBGT é determinado através das seguintes expressões que são fornecidas pela norma ISO 7243 (1989).

Para um ambiente externo com radiação solar directa:

$$WBGT = 0,7T_{wn} + 0,2T_g + 0,1T_a \quad (14)$$

Para um ambiente interior ou exterior sem radiação solar directa:

$$WBGT = 0,7T_{wn} + 0,3T_g \quad (15)$$

onde T_{wn} representa a temperatura do bolbo húmido com ventilação natural (°C) e T_g a temperatura do globo (°C).

Em casos de ambientes heterogéneos, onde os parâmetros do espaço em redor do indivíduo não são constantes, o índice WBGT deverá ser calculado em três posições diferentes (nível da cabeça, nível do abdómen e nível do tornozelos da pessoa relativamente ao nível do solo).

Uma vez conhecido o valor do índice WBGT é possível, comparando com valores de referência como se mostra na Tabela II, determinar o nível de “stress” térmico a que o indivíduo está sujeito e, caso se justifique, limitar o seu tempo de exposição às condições térmicas que originam o “stress” térmico medido (MARTINET E MEYER, 1999).

TABELA II: Valores de referência de WBGT [adaptado de CORLETO (1998) e MARTINET E MEYER (1999)].

Trabalho braçal moderado	Trabalhador aclimatizado	Trabalhador aclimatizado	Trabalhador não aclimatizado
Taxa Metabólica (W.m ⁻²)	$v < 1,5 \text{ m.s}^{-1}$	$v \geq 1,5 \text{ m.s}^{-1}$	
$130 < M < 200$	27,8	30,5	25,7

A aclimatização é o processo de adaptação fisiológica (essencialmente por variações do fluxo sanguíneo e ritmo cardíaco) que aumenta a tolerância do indivíduo a um dado ambiente térmico por um período longo.

Se o índice WBGT for superior aos valores indicados na Tabela 2 será necessário implementar uma de duas soluções alternativas, partindo do princípio que nada se poderá fazer quanto à actividade do trabalhador: diminuir o tempo de permanência no local de trabalho (por exemplo, criando um esquema de turnos que permita

alternância nos locais mais críticos); criar condições que permitam uma diminuição do índice WBGT local.

A fig. 2 mostra para cada taxa metabólica a estratégia que se pode adoptar para uma actividade em termos de diferentes valores do índice WBGT.

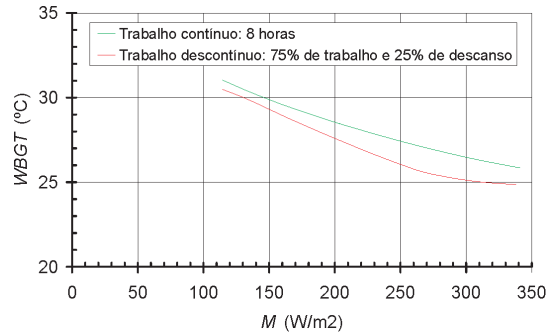


Fig. 2 - Curvas de valores de referência de WBGT, para ciclos de trabalho/descanso.

A simplicidade do método está sujeita a certas limitações devido a restrições nos valores das variáveis. A curva limite do índice é aplicada a indivíduos cujo vestuário possui a resistência térmica de 0,6 clo.

Diagrama da WMO (1987)

O diagrama da World Meteorological Organization (WMO, 1987) permite obter indicações muito interessantes apenas com a entrada, num diagrama termodinâmico, da temperatura do ar e da humidade relativa do ar. Estratégias de intervenção são sugeridas para cada tipo de ambiente circundante do indivíduo.

Índices de sobrecarga fisiológica

Não são testados nesta investigação, mas parece-nos oportuno fazer a sua apresentação pois a frequência cardíaca pode ser utilizada como índice de avaliação do stress térmico. Tal como já foi referido, um aumento de temperatura promove um aumento do débito sanguíneo e consequentemente da frequência cardíaca.

GIVONNI E GOLDMAN (1973) desenvolveram expressões para a determinação da variação da frequência cardíaca com o tempo e correcções para se ter em conta o grau de aclimatização dos indivíduos. A frequência cardíaca pode ser avaliada a partir da expressão

$$FC = 22,4 + 0,18M + 0,25[5T - 2e(T_d)] \quad (16)$$

em que M representa a taxa metabólica (W.m⁻²), T a temperatura do ar e $e(T_d)$ (°C) e a pressão parcial do vapor à temperatura do ponto de orvalho (hPa).

Também, GIVONNI E GOLDMAN (1973) propuseram equações para prever a frequência cardíaca de pessoas em

ambientes quentes, através de um índice de frequência cardíaca *IFC*

$$IFC = 0,4M + \frac{2,5}{I_{CL}}(T - 36) + 80e^{0,0047(E_{REQ} - E_{MAX})} \quad (17)$$

em que I_{CL} representa o isolamento térmico da roupa, E_{REQ} a carga térmica metabólica e E_{MAX} a capacidade de arrefecimento por evaporação.

A experiência mostra que para um valor de $IFC > 225$ existe uma relação exponencial, à medida que a frequência cardíaca se aproxima do valor máximo, através da expressão

$$FC_e = 65 + (FC_e - 65)(1 - e^{-3t}) \quad (18)$$

em que FC_e representa a frequência cardíaca de equilíbrio (batimentos por minuto) e t o tempo (horas). Na expressão (16) o valor de 65 indica a frequência cardíaca em condições de repouso e bem-estar.

Estudos realizados por TALAIA e RODRIGUES (2008), TALAIA *et al.* (2007), RODRIGUES e TALAIA (2006) e TALAIA (2004) mostram que se podem estabelecer correlações interessantes entre índices quando são aplicados a diferentes ambientes (laboral, intelectual, indústria, edifícios, ambiente atmosférico, e outros).

Resultados e discussão

A análise de resultados teve como base uma colecção de dados (considerados simulados) cujas condições ambientais são: temperatura do ar de 30°C a 42°C, humidade relativa do ar de 40% a 90% e velocidade do ar acima de 1,5m.s⁻¹.

O índice *HSI* foi avaliado para as condições simuladas aplicadas numa atmosfera demasiado quente e numa atmosfera demasiado húmida. Foi construído um algoritmo tendo por base o balanço energético com a variável de saída *HSI*, como se ilustra na fig. 3.

Foram obtidos diferentes valores para *HSI* e verificou-se que a velocidade do ar é determinante na diminuição do valor do índice.

	A	B	C	D	E
1					
2	LANÇAR	30.0			
3					
4					
5		ta (°C)	tr (°C)	Ereq(W/m2)	HSI
6		30.0	30.0	325.0	293
7		30.0	33.8	341.7	308
8		30.0	37.5	357.9	323
9					
10					

Fig. 3 - Imagem da utilização de um algoritmo - Índice HSI.

Para uma temperatura do ar de 30°C, $v \geq 5m.s^{-1}$ e um metabolismo de 376W.m⁻², avaliou-se um $E_{REQ} > 350 W.m^{-2}$ (evaporação necessária para manter o equilíbrio térmico ou perda requerida por evaporação) e um $E_{MAX} \geq 228 W.m^{-2}$ (evaporação máxima conseguida no ambiente térmico). O valor de $HSI \gg 100$ indica que o tempo de exposição deve ser limitado por provocar um aumento da temperatura interna do corpo humano, o que obriga a aplicação de estratégias urgentes de prevenção.

Para uma temperatura do ar de $T=40^\circ C$ o valor $HSI \gg \gg \gg \gg 100$. O algoritmo mostra que o valor da variável *HSI* apresenta limitações quando $T \geq 35^\circ C$ devido à energia sob a forma de calor perdida por convecção e à perda máxima por evaporação com limite superior de 390W.m⁻² (depende da velocidade).

Na prática, uma atmosfera com temperatura e humidade relativa altas condiciona a taxa de evaporação da superfície cutânea molhada. Uma intensidade do vento demasiada alta favorece uma evaporação activa do suor que molha a pele tornando-a mais seca e mais vulnerável para se queimar.

O índice *WBGT* para os dados simulados permite obter valores entre 24°C e 41°C. Nas condições de $T=30^\circ C$ e $HR=40\%$ o $WBGT= 24^\circ C$. A observação do gráfico da fig.2 mostra que para um metabolismo de 500W (ou 295W.m⁻², tendo por base a área típica nu corporal) o máximo admissível para o índice, em condições normais de intervenção, é cerca de 25°C, valor muito próximo de 24°C. Quando a humidade relativa aumenta para 90% obtém-se um $WBGT = 29^\circ C$. Há um maior desconforto quando a pressão parcial de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho aumenta e por esta razão é dificultado o processo de evaporação. Para $T=42^\circ C$ e $HR = 40\%$ o $WBGT = 34^\circ C$. Esta situação está em concordância com a teoria. Se a humidade relativa aumentar para 90% regista-se um $WBGT = 41^\circ C$.

De acordo com a teoria e considerando uma actividade com um metabolismo superior a 350W e para uma velocidade do ar de pelo menos 1,5m.s⁻¹, o limite máximo de $WBGT = 28,9^\circ C$. Nestes termos, os valores simulados mostram que estamos perante condições severas de ambiente quente, excepto para uma $T = 30^\circ C$ e $HR = 40\%$.

A literatura mostra que para um valor de $WBGT = 30^\circ C$ se devem reduzir as actividades e que para $WBGT > 31^\circ C$ as actividades devem ser totalmente suspensas.

A aplicação do índice *ITE* permite obter os seguintes resultados. Nas condições de $T = 30^\circ C$ e $HR = 40\%$ o $ITE = 25^\circ C$. Quando a humidade relativa aumenta para 90% obtém-se $ITE = 28^\circ C$. Para $T = 42^\circ C$ e $HR = 40\%$ o $ITE = 34^\circ C$. Se a humidade relativa aumentar para 90% regista-se um $ITE = 38^\circ C$.

Os valores determinados usando o índice *ITE* estão fortemente correlacionados com os valores obtidos através da aplicação do índice *WBGT*; de facto, o coeficiente de correlação é quase igual à unidade. As conclusões retiradas da aplicação dos dois índices são análogas, pois há stress provocado por ambiente quente quando $ITE \geq 25,6^\circ\text{C}$.

O diagrama da World Meteorological Organization (WMO, 1987) permite de maneira simples obter indicações valiosas e indica, também, algumas estratégias de prevenção, como se mostra na Fig. 4.

Nesta figura, os círculos a cor “dourada” correspondem a temperaturas de 30°C e 32°C . Localizam-se numa zona que é de ambiente quente com necessidade de ventilação. Os círculos de cor “azul” localizam-se numa zona considerada demasiado húmida. Há desconforto devido à dificuldade de se efectuar o processo de evaporação do suor porque a atmosfera apresenta um alto valor de pressão parcial de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho, ou seja o ar tem dificuldade em “receber” ou “absorver” mais vapor de água.

Os círculos de cor “vermelha” localizam-se numa zona considerada demasiado quente. Nestas circunstâncias é aconselhável abandonar o local ou reduzir ao mínimo o tempo de exposição. O tempo de permanência deverá ser considerado como uma variável inversa da temperatura, ou seja o tempo de exposição diminui à medida que a temperatura do ar aumenta.

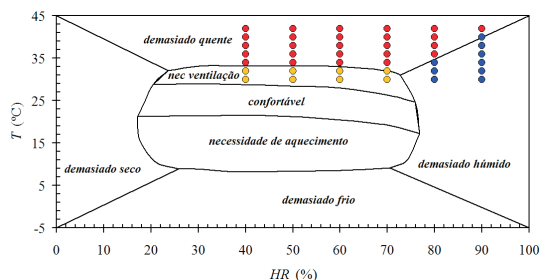


Fig. 4 - Diagrama de sensação térmica adaptado (WMO, 1987).

Considerações finais

Foram usados alguns índices de stress térmico, para ambiente quente por efeito do calor, que usam diferentes variáveis de entrada.

O índice *HSI* por considerar um balanço energético que é determinado pelos efeitos da transferência de energia sob a forma de calor por convecção, radiação e evaporação é o que apresenta maiores cuidados de aplicação. Neste índice, o aumento da intensidade do vento diminui o valor do *HSI*, no entanto, esta diminuição deve ser considerada em termos da taxa de evaporação do suor do indivíduo.

Os índices *ITE* e *WBGT* iniciaram as mesmas conclusões. Uma correlação entre os dados obtidos de ambos permite obter um excelente coeficiente de correlação. A vantagem prática é que o índice *ITE* é de mais fácil aplicação.

O diagrama da WMO (1987) de duas entradas parece ser uma ferramenta de trabalho a valorizar. Na prática, com a entrada do valor da temperatura do ar e da humidade relativa do ar é possível conhecer a sensação térmica do local e medidas de prevenção a adoptar.

No geral, os resultados obtidos pelos diferentes métodos são concordantes.

Esta investigação é oportuna pois mostra que as ferramentas usadas são adequadas para se conhecerem estratégias a adoptar quando se está em presença de choque térmico que ocorre, muitas vezes, durante um incêndio florestal e que é suscitado quando em dado momento se faz a luta com base em água em jacto e com a exposição durante o combate com meios sapadores.

Referências bibliográficas

- ASHRAE (2001) - *Handbook of Fundamentals - Physiological Principles for Comfort and Health*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Chapter 8, Atlanta, p. 1-32.
- BELDING E HATCH (1955) - “Index for evaluating heat stress in terms resulting physiological strain”. *Heating piping Air Condit*, 27, p. 29-136.
- CORLETO, R. (1998) - *The evaluating of Heat Stress indices using physiological comparisons in an alumina refinery in a sub-tropical climate*. Master Science Thesis, Faculty, Faculty of Science and Technology at Deakin University, Geelong, Australia, 176 p.
- DUBOIS, D. E DUBOIS, E.F. (1916) - “A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known”. *Archives of Internal Medicine*, 17, p. 863-875.
- GIVONNI, B. E GOLDMAN, R.F. (1973) - “Predicting heart rate response to work, environment and clothing”. *J. App. Physiological*, 34 (2), p. 201-204.
- HOUGHTEN E YAGLOU (1923) - *ASHVE Researche Report No 673*. ASHVE Transactions 29, p. 361
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2005) - ISO 7730/2005, *Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique*. International Standardisation Organisation, Geneva, Suisse.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1989) - ISO 7243/1989, *Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*. International Standardisation Organisation, Geneva, Suisse.
- IRIBARNE, J.V. E CHO, H.R. (1980) - *Atmospheric physics*. R. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- IQBAL, M. (1983) - *An introduction to solar radiation*. Academic Press, Ontario.
- MCINTOSH, D.H. E THOM, A.S. (1981) - *Essentials of meteorology*. The Wykeham Sciences Series, Taylor and Francis, Ltd, London.
- MIKANI, C. E AMORIM, M. (2005) - "Características de temperatura e conforto térmico em ambiente urbano e rural: episódios de Verão". *Actas da VI Semana de Geografia: A Geografia e os paradigmas do século XXI*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP- Presidente Prudente, Brasil.
- RODRIGUES, F.A.G. E TALAIA, M.A.R. (2006) - "Heat Stress Indicators in an Industrial Building". *Proceedings of the HB 2006 - Healthy Buildings*. Editors: FERNANDES, E.O., SILVA, M.G AND PINTO, J.R., Vol. II *Indoor Climate*. ISBN 978-989-95067-0-8, Lisbon, p. 57-60.
- TALAIA, M.A.R. (2004) - "O Conforto Humano e as Alterações Ambientais". *Proceedings of the XXVIII Jornadas Científicas, La Meteorologia y El Clima Atlánticos*, 5º Encuentro Hispano-Luso de Meteorologia: La Meteorologia y Climatologia en los Sectores Público y Privado, CDROM, ISBN: 84-8320-261-1, Badajoz, Espanha, p. 474-483.
- TALAIA, M. E RODRIGUES, F. (2008) - "Conforto e Stress Térmico: Uma Avaliação em Ambiente Laboral". *Proceedings em CD-ROM da CLME'2008 / II CEM*. 5º Congresso Luso - Moçambicano Engenharia - 2º Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo. Editores: GOMES *et al.* ISBN: 978-972-8826-20-8. Edições INEGI. Artigo 11A020, 15 páginas.
- TALAIA *et al.* (2007) - "Calor nas Indústrias. Reportagem de Maria Cardoso. Revista mensal de Saúde e Segurança do Trabalho".. *Protecção*, 184, Abril/2007, p. 32-54.
- THOM, E.C (1959) - "The discomfort index". *Weatherwise*, 12 (1), p. 57-60.
- W.M.O. (1987) - *World Climate Programme Applications, Climate and Human Health*. World Meteorological Organization.
- YAGLOU, P. E MINARD, D. (1957) - "Control of heart causalities at military training camps". *Am A Arch, Ind. Health*, 16, p. 302-316.
- Outras Fontes
- MARTINET, C. E MEYER, J.P. (1999) - *Travail à la chaleur et confort thermique*. Sitio Oficial do Institut National de Recherche et de Sécurité [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/ns%20184/\\$file/ns184.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/ns%20184/$file/ns184.pdf) (on-line: 03/07/ 2006).
- MTSA - Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (2001) - *Organización de Salud y Seguridad en el Trabajo - O.I.T.* Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. 3ª edición. http://www.ucm.es/info/seas/estres_lab/enciclo/indice_gral.htm (on-line: 16/05/2006).