



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Condições de Trabalho na Indústria Cerâmica: Avaliação da Exposição ao Calor

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

José Manuel Pires Rodrigues

Orientadores

Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela

Professor Doutor Avelino Virgílio Monteiro de Oliveira

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Avelino Virgílio Monteiro de Oliveira
Professor Adjunto DEM-ISEC

Coimbra, setembro, 2015

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

Albert Einstein.

À minha família.

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho não seria possível sem o apoio direto ou indireto de um conjunto de pessoas e entidades que contribuíram para o meu percurso académico.

Em primeiro lugar, agradecer aos Professores Doutor Divo Augusto Alegria Quintela e Doutor Avelino Virgílio Monteiro de Oliveira, pela orientação, atenção, disponibilidade e motivação constantes ao longo desta dissertação.

À Universidade de Coimbra pela transmissão de conhecimento técnico-científico e consequente preparação para o mundo profissional.

À Associação Académica de Coimbra, que foi a minha segunda casa ao longo destes anos, complementando a minha formação cívica e pessoal.

À minha experiência enquanto estudante de mobilidade em Praga, que me permitiu ter um conhecimento mais profundo sobre diferentes realidades académicas, sociais e culturais.

Aos meus amigos, pela amizade e companheirismo sempre presentes.

Por fim, mas não menos importante à minha família, pelo amor e apoio incondicionais, que foram as bases de sustentação para o alcance dos meus objetivos académicos e pessoais. O meu sincero obrigado.

Resumo

A exposição prolongada a ambientes térmicos quentes pode induzir a alterações fisiológicas sérias no corpo humano, comprometendo muitas vezes o seu sistema termorregulador. Em particular, poderão ser experienciadas situações de stresse térmico responsáveis por originar patologias, ou até mesmo acidentes de trabalho fatais.

Para entender quais as razões ou fatores que afetam este problema, é pois relevante ter conhecimento não só do comportamento termofisiológico do ser humano, como também do meio que o rodeia. A fim de estudar esta temática existem vários modelos de cálculo, que fornecem índices de caracterização de ambientes térmicos quentes, entre os quais o modelo Predicted Heat Strain (PHS), que tem como objetivo a determinação analítica e interpretação de situações de stresse térmico.

O presente trabalho tem então como objetivo estudar os efeitos da exposição ao calor em ambientes térmicos quentes na indústria cerâmica portuguesa, aplicando o modelo PHS da norma internacional ISO 7933:2004.

Para isso, é usado um programa que aplica o algoritmo de cálculo da referida norma, por forma a analisar e comparar os índices térmicos resultantes que auxiliam na caracterização das situações em estudo.

Por fim, são apresentados e analisados os resultados gráficos que comprovam um elevado número de trabalhadores em risco de stresse térmico.

Palavras-chave: Ambientes Térmicos Quentes, Stresse Térmico, Modelo PHS, Índices Térmicos, Indústria Cerâmica.

Abstract

A long exposure to hot thermal environments can lead to serious physiological changes in the human body, compromising its thermoregulatory system. In particular, the human being can experience situations of heat stress, responsible by pathologies, or even deathly accidents.

In order to understand the reasons or aspects which can affect this problem, it is important to be aware not only of the human thermoregulatory behavior, but also the environment around it. There are several calculation models to study this issue, which provide us some indexes to characterize hot thermal environments, in particular the Predicted Heat Strain (PHS) model, which goal is to do analytical determination and interpretation of thermal stress situations.

The aim of this work is to study the effects of heat exposure in hot thermal environments in the Portuguese ceramic industry, applying the PHS model provided by the international standard ISO 7933:2004.

To do this, it is used a software that applies the algorithm calculation of the international standard, in order to analyze and compare the results of the thermal indexes.

Finally, the results are represented by graphics, showing a high number of workers in thermal stress.

Keywords Hot Thermal Environments, Thermal Stress, PHS Model, Thermal Indexes, Ceramic Industry.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Simbologia e Siglas	vii
Simbologia.....	vii
Siglas	x
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Síntese de Conteúdos	3
2. Conceitos gerais sobre a exposição ao calor	4
2.1. Balanço térmico do corpo humano	4
2.2. Mecanismos de transferência de calor	5
2.3. Efeitos da exposição de calor.....	7
2.3.1. Patologias e alterações fisiológicas devido ao calor.....	7
2.3.2. Desidratação e Produtividade	9
3. Análise da ISO 7933:2004.....	11
3.1. Princípios e métodos de avaliação	12
3.2. Principais etapas de cálculo	12
3.3. Considerações da ISO 7933:2004	16
3.4. Cálculo da taxa de evaporação requerida (E_{req}), do humedecimento da pele requerido (w_{req}) e da taxa de suor requerida (Sw_{req}).....	20
3.5. Interpretação e análise do modelo de PHS	23
4. Metodologia.....	26
4.1. Caso de estudo	26
4.2. Programa de cálculo.....	28
4.2.1. Verificação do Programa	29
4.3. Inventário de dados	30
5. Resultados e Discussão.....	37
6. Conclusões.....	47
Referências Bibliográficas.....	49
ANEXO A	52
ANEXO B	56
APÊNDICE A	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Relação entre a frequência de trabalho e a temperatura do ar.....	10
Figura 5.1 Taxa de sudção máxima, requerida e prevista.....	37
Figura 5.2. Débito evaporativo máximo, requerido e previsto.....	39
Figura 5.3. Humedecimento cutâneo máximo, requerido e previsto.....	40
Figura 5.4. Eficiência evaporativa.....	41
Figura 5.5 Perda de água total em 8 horas.....	42
Figura 5.6 Temperatura rectal e temperaturas registadas.....	43
Figura 5.7 Tempo máximo admissível de exposição para armazenamento de calor.....	44
Figura 5.8 Tempos máximos admissíveis para perda de água.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3 Valores máximos admissíveis para os critérios de seleção	24
Tabela 4.1 Tabela identificativa dos locais de estudo	27
Tabela 4.2 Variáveis de entrada	28
Tabela 4.3 Variáveis de saída	29
Tabela 4.4 Dados de entrada para as indústrias 1, 2 e 3	34
Tabela 4.5 Dados de entrada para as indústrias 4, 5 e 6	35
Tabela 4.6 Dados de entrada para as indústrias 7 e 8	36

ANEXOS

Tabela A1 Classificação da Taxa metabólica (W/m^2) em função do tipo de atividade.....	52
Tabela A2 Taxa metabólica (W/m^2) em função da área de corpo envolvida e da intensidade de trabalho para determinada parte do corpo	53
Tabela A3 Taxa metabólica (W/m^2) em função de atividade específica.....	53
Tabela A4 Taxa metabólica (W/m^2) em função de atividade específica.....	54
Tabela A5 Dados relativos a um indivíduo padrão	55
Tabela B1 Valores de referência para validação do modelo PHS.....	56
Tabela B2 Limite de intervalos para a validade do modelo PHS.....	57

APÊNDICES

Tabela A1 Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS	58
Tabela A2 Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS	59
Tabela A3 Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS	60

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$\frac{A_r}{A_{Du}}$	Fração da superfície de pele envolvida nas trocas de calor por radiação	adm
A_{Du}	Área da superfície corporal de <i>DuBois</i>	m ²
A_p	Fração de superfície corporal coberta pelo vestuário refletivo	adm
C	Troca de calor por convecção	W/m ²
C_d	Troca de calor por condução	W/m ²
$C_{orr,E}$	Correção para o índice de permeabilidade dinâmica	adm
$C_{orr,la}$	Correção para o índice de permeabilidade dinâmico	adm
$C_{orr,cl}$	Correção para o isolamento térmico total dinâmico acima de 0,6 <i>clo</i>	adm
$C_{orr,tot}$	Correção para o isolamento térmico dinâmico em função do vestuário usado	adm
C_{res}	Troca de calor por convecção na respiração	W/m ²
C_v	Troca de calor por convecção	W/m ²
c_e	Calor latente da evaporação de água	J/kg · °C
c_p	Calor específico do ar a pressão constante	J/kg · °C
c_{sp}	Calor específico do corpo	W/m ²
D	Diâmetro do globo negro	mm
D_{max}	Limite máximo para a perda de água do organismo	W · h/m ² ou g
dS_{eq}	Armazenamento de calor acumulado, associado à taxa metabólica	W/m ²
E	Troca de calor por evaporação	W/m ²
E_{max}	Débito evaporativo máximo	W/m ²
E_p	Débito evaporativo previsto	W/m ²
E_{req}	Débito evaporativo requerido	W/m ²
E_{res}	Troca de calor por evaporação na respiração	W/m ²
f_{cl}	Fator de área do vestuário	adm

$F_{cl,R}$	Fator de correção para o uso de roupa refletiva	adm
F_r	Emissividade do vestuário refletivo	adm
h_{cdyn}	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o vestuário e a envolvente	W/(m ² · °C)
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação entre o vestuário e ar envolvente	W/m ² · °C
HR	Humidade relativa	%
$I_{a\ dyn}$	Resistência térmica dinâmica da camada superficial	m ² · K/W
$I_{a\ st}$	Resistência térmica estática da camada superficial	m ² · K/W
$I_{cl\ st}$	Resistência térmica estática do vestuário	m ² · K/W
I_{cl}	Isolamento térmico do vestuário	clo
i_{mdyn}	Índice de permeabilidade dinâmica à humidade	adm
i_{mst}	Índice de permeabilidade estática à humidade	adm
$I_{tot\ dyn}$	Resistência térmica total dinâmica do vestuário	m ² · K/W
$I_{tot\ st}$	Resistência térmica total estática do vestuário	m ² · K/W
K	Troca de calor por condução	W/m ²
M	Taxa metabólica	W/m ²
p_a	Pressão parcial de vapor de água	kPa
$P_{a,s}$	Pressão de vapor de água saturada a 1 atm e à temperatura da pele	mbar
$P_{a,sbh}$	Pressão de vapor de água saturada, a 1 atm e à temperatura do bolbo húmido	mbar
$p_{sk,s}$	Pressão de saturação do vapor de água à temperatura da pele	kPa
R	Troca de calor por radiação	W/m ²
r_{req}	Eficiência do processo de evaporação requerida	adm
R_{tdyn}	Resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e o vestuário	m ² · kPa/W
S	Armazenamento de calor	W/m ²
SW_{max}	Taxa de sudação máxima	W/m ²
SW_p	Taxa de sudação prevista	W/m ²
SW_{req}	Taxa de sudação requerida	W/m ²
t_a	Temperatura do ar (inspirado)	°C
t_{bh}	Temperatura do bolbo húmido	°C
t_{bhn}	Temperatura do bolbo húmido natural	°C

t_{cl}	Temperatura da superfície de vestuário	°C
$t_{cr,i}$	Temperatura interna no tempo i	°C
$t_{cr,eq i}$	Temperatura interna como função da taxa metabólica no tempo i	°C
$t_{cr,eq i-1}$	Temperatura interna em função da taxa metabólica no tempo $i - 1$	°C
$t_{cr,eq}$	Temperatura interna de equilíbrio	°C
t_{cr}	Temperatura interna	°C
t_{ex}	Temperatura do ar expirado	°C
t_g	Temperatura do globo	°C
t_r	Temperatura média radiante	°C
$t_{re,max}$	Temperatura rectal máxima	°C
$t_{re,i}$	Temperatura rectal no tempo i	°C
$t_{re,i-1}$	Temperatura rectal no tempo $i - 1$	°C
t_{re}	Temperatura rectal	°C
$t_{sk,i-1}$	Temperatura da pele instantânea no tempo $i - 1$	°C
$t_{sk,i}$	Temperatura da pele instantânea	°C
$t_{sk,eq cl}$	Temperatura média da pele em estado estático para indivíduos com vestuário	°C
$t_{sk,eq nu}$	Temperatura média da pele para indivíduos sem vestuário	°C
$t_{sk,eq}$	Temperatura média da pele em estado estático	°C
t_{sk}	Temperatura média da pele	°C
V	Caudal mássico da respiração	L/min
v_a ou v_{ar}	Velocidade do ar	m/s
v_w	Velocidade de caminhada	m/s
W	Trabalho mecânico externo	W/m ²
w	Fração equivalente da superfície da pele	adm
W_a	Humidade específica do ar inspirado	kg _{água} /kg _{ar seco}
W_{ex}	Humidade específica do ar expirado	kg _{água} /kg _{ar seco}
w_{max}	Humedecimento cutâneo máximo	adm
w_p	Humedecimento cutâneo previsto	adm
w_{req}	Humedecimento cutâneo requerido	adm
ΔS	Variação de calor armazenado	W/m ²

ε	Emissividade	adm
ε_g	Emissividade do globo negro	adm
α	Fração de massa corporal à temperatura da pele	adm
α_i	Fração de massa corporal à temperatura da pele no tempo i	adm
α_{i-1}	Fração de massa corporal à temperatura da pele no tempo $i - 1$	adm

Siglas

SHST – Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho

OMS – Organização Mundial de Saúde

OIT – Organização Internacional do Trabalho

PHS – Predicted Heat Strain

PHS calculator – Programa de cálculo Predicted Heat Strain

1. INTRODUÇÃO

A área de Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho (SHST) teve os seus primórdios no século XVIII, mais precisamente com o aparecimento da Revolução Industrial, que despoletou na Inglaterra a criação do primeiro diploma de legislação laboral: Health and Morals of Apprentices Act of 1802. Apesar de todos os esforços este acabou por não ter aplicabilidade (Rodrigues, 2006).

É pois em 1833 e novamente em Inglaterra que é colocado em prática o Factory Act of 1833, um documento legal constituído por um conjunto de ferramentas com vista a melhorar as condições de trabalho. Analogamente em Portugal, começam a surgir em 1897 as primeiras disposições legais. Contudo, só a partir dos anos 90, com a entrada para a Comunidade Económica Europeia (atual União Europeia) é que a SHST começa a ter maior destaque, iniciando-se a partir desta época a elaboração intensiva de documentação laboral legisladora, onde temáticas como as condições de trabalho, prevenção dos acidentes de trabalho e das doenças em contexto laboral ocupam lugar de discussão (Rodrigues, 2006).

É pois evidente a importância da SHST, pois só a partir da mesma é possível antever e prevenir patologias ou acidentes de trabalho, que muitas vezes se poderão traduzir não só fatais para os trabalhadores, como economicamente dispendiosos para as entidades empregadoras. A título de curiosidade, estima-se que em Portugal entre 2002 e 2011 tenham sido registados cerca de 67 141 823 dias de trabalho perdidos, ou seja uma média anual aproximada de 6 714 183 de dias perdidos, resultantes de acidentes em contexto laboral (GEE, 2014).

Segundo a Organização Internacional do Trabalho (OIT), estima-se que em 2008 cerca de dois milhões e meio de pessoas tenham morrido em todo o mundo, vítimas de acidentes de trabalho ou doença profissional (ILO, 2011).

Em Portugal, dados do Ministério da Economia refletem que o sector da indústria transformadora foi o principal responsável por acidentes de trabalho (mortais e não mortais) entre 2002 e 2011 (GEE, 2014).

Muitos destes acidentes de trabalho (mortais e não mortais) resultam do facto de o trabalhador estar sujeito a condições laborais desfavoráveis, como por exemplo ambientes térmicos extremos que despoletam graves problemas de saúde.

De forma a adaptar-se a todas as variações térmicas ambientais, o corpo humano desenvolveu mecanismos termorreguladores que mantêm o equilíbrio térmico corporal, mediante alguns limites do ambiente envolvente (WHO 1969). Contudo, quando estes não se verificam, o corpo humano deixa de conseguir responder de forma adequada às adversidades impostas, podendo ocorrer situações de stresse térmico (WHO 1969; Carter *et al.*, 2007).

“O stresse térmico é um problema característico de ambientes térmicos extremos, que levam a que numa primeira instância o indivíduo experiencie uma fase de vasodilatação e um aumento do ritmo cardíaco, aos quais se seguem a ativação das glândulas sudoríparas com o consequente aumento da taxa de sudação” (WHO, 1969).

Tudo isto afeta o trabalhador não só ao nível da sua capacidade física e de concentração, como também da sua saúde, podendo em última instância levar à morte. Com isto, não só a segurança do trabalhador, como a produtividade da indústria são afetadas, prejudicando desta forma a harmonia e o equilíbrio pretendidos no mundo laboral (Carter *et al.*, 2007).

Em 2011 existiam em Portugal cerca de 1 112 000 empresas, das quais 72 286 eram indústrias transformadoras (INE, 2013) e destas cerca de 385 eram indústrias cerâmicas, sendo que apenas 303 se encontravam ativas, empregando cerca de 15 205 trabalhadores (APICER, 2014).

A indústria cerâmica é uma das mais antigas em Portugal e no mundo e descrita por funcionar a altas temperaturas que, tal como já foi referido anteriormente poderão ser prejudiciais ao ser humano. É neste contexto que urge a necessidade do estudo sobre a avaliação da exposição de calor em indústrias cerâmicas, pois através do mesmo será possível contribuir para uma melhor caracterização destes ambientes, e consequentemente para uma melhoria no quotidiano laboral.

1.1. Objetivos

Pretende-se com este estudo caracterizar o ambiente térmico da indústria cerâmica portuguesa. Para o efeito é reunido um conjunto de informação de trabalhos de investigação já desenvolvidos, que incluíam medições desde 1994 a 2012 de 8 unidades industriais, resultando assim 21 locais de estudo. Dessa informação são conhecidos parâmetros tais como: a temperatura média radiante, a temperatura do globo, as temperaturas do bolbo húmido natural e seco, o metabolismo e o isolamento térmico do vestuário.

Aplica-se o modelo PHS, definido na norma ISO 7933:2004, onde a informação necessária e não referida acima é calculada ou assumida, com base em literatura científica.

A partir dos resultados obtidos pretende-se analisar possíveis casos de stresse térmico, e as razões mais prováveis para o mesmo.

1.2. Síntese de Conteúdos

Esta dissertação está dividida em seis capítulos:

No primeiro capítulo é feito um enquadramento sobre a temática a abordar e são definidos os objetivos e metas para o presente trabalho.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de conceitos essenciais, nomeadamente o balanço térmico do corpo humano, os mecanismos de transferência de calor e os seus efeitos.

No terceiro capítulo procede-se à análise pormenorizada da norma ISO 7933:2004, de forma a entender o modelo PHS.

No quarto capítulo é descrita a metodologia usada neste trabalho, em particular, a apresentação do caso de estudo, do programa de cálculo e do inventário de dados.

No capítulo cinco são apresentados graficamente os resultados, e discutidos com base na literatura científica apresentada ao longo deste trabalho.

Por fim, são expostas as conclusões deste trabalho no capítulo seis.

2. CONCEITOS GERAIS SOBRE A EXPOSIÇÃO AO CALOR

2.1. Balanço térmico do corpo humano

O corpo humano está constantemente sujeito a trocas de calor com o meio envolvente, resultantes da energia gerada e dissipada. Este balanço térmico deve ser o mais equilibrado possível, por forma a manter uma temperatura corporal constante - neutralidade térmica. Contudo, o estado de neutralidade térmica é condição necessária mas não suficiente para que se verifique conforto térmico (Lamberts *et al.*, 2008).

Segundo a American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, o conforto térmico é o “*estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda*” (ANSI/ASHRAE, 2004), ou seja, uma pessoa que esteja sob o efeito de um campo assimétrico de radiação pode efetivamente estar em condição de neutralidade térmica, mas ainda assim não atingir o estado de conforto térmico (Lamberts *et al.*, 2008).

O corpo humano possui um sistema termorregulador que realiza a manutenção térmica, mediante alguns limites do ambiente envolvente. Em situações térmicas extremas, em que são ultrapassados os limites de conforto térmico, o sistema termorregulador pode não tolerar a sobrecarga térmica imposta, levando a que o ser humano possa experienciar situações de stresse térmico (Camargo & Furlan, 2011).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), o stresse térmico é definido como a quantidade de calor que necessita ser dissipada ou produzida, para que o corpo se mantenha em equilíbrio térmico (WHO, 1969).

Este equilíbrio é descrito pelo balanço térmico do corpo no que diz respeito às suas trocas energéticas:

$$M \pm R \pm C_v \pm C_d - E = \Delta S \quad (2)$$

onde, M [W/m^2] é a taxa metabólica, R [W/m^2] a troca de calor por radiação, C_v [W/m^2] a troca de calor por convecção, C_d [W/m^2] a troca de calor por condução, E [W/m^2] a troca de calor por evaporação e ΔS [W/m^2] a variação de calor armazenado (Leite, 2002).

A temperatura corporal ronda aproximadamente os 37°C (Braz, 2005). No entanto, esta é variável consoante o indivíduo, sendo por isso usual que o intervalo de temperatura normal seja considerado entre os 34°C e 39°C. Caso a temperatura seja inferior ou superior ao intervalo anteriormente referido, o corpo humano poderá experienciar situações de hipotermia e hipertermia, respetivamente. A partir destes limites, toda a descida ou subida de temperatura corporal entre os 24 °C ou 44 °C poderá levar a graves consequências de saúde e, em última instância, à morte. Apesar de tudo, Taylor defende que o ser humano é bastante resiliente e por isso consegue sobreviver a temperaturas corporais extremas de 14,4 °C e 47 °C, seguidas hipotermia e hipertermia, respetivamente (Taylor 2006).

É pois perceptível, que o corpo humano é muito mais sensível aquando variações de temperatura corporal a altas temperaturas, do que a baixas temperaturas. Neste contexto, sendo as indústrias cerâmicas responsáveis pelo funcionamento a altas temperaturas a prevenção assume então um maior relevo.

É importante também referir que o stresse térmico depende não só de fatores individuais, como o metabolismo e o isolamento térmico do vestuário, mas também de fatores do ambiente envolvente, tais como a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade do ar e a humidade do ar (Lamberts *et al.*, 2008).

2.2. Mecanismos de transferência de calor

Para compreender os efeitos inerentes à exposição de calor é importante entender primeiro como funciona a transferência de calor entre o homem e o exterior.

O corpo humano e o meio envolvente estão constantemente sujeitos a uma dinâmica de transferência de calor, resultante das diferenças de temperaturas existentes. Esta transferência de energia térmica pode acontecer sob a forma de calor sensível ou latente (Estrela, 2013), através de mecanismos designados por condução, convecção e radiação.

O mecanismo de transferência de calor por condução ocorre ao nível molecular, mediante o contacto entre dois meios. Trata-se de pois de uma transferência de energia sensível (Bergman *et al.*, 2011).

O processo de convecção resulta da transferência de calor entre um corpo e um fluido em movimento (que para o caso de estudo é o ar atmosférico). A troca de calor por convecção será tanto maior, quanto maior for a velocidade de escoamento do ar (Bergman *et al.*, 2011).

Ao fenómeno da transmissão de calor sob a forma de ondas eletromagnéticas a partir de um corpo, dá-se o nome de radiação. Para que ocorra transferência de calor é necessário que a temperatura de um corpo não corresponda a zero absoluto (Cengel & Ghajar, 2010).

Alguns dos mecanismos acima referidos (Convecção, Condução e Radiação) demonstram-se ineficientes ou com efeito inversamente desejado para ambientes com temperaturas superiores a 36 °C, verificando-se nestas condições que a evaporação se torna o único mecanismo de transferência de calor (Magalhães *et al.*, 2001).

De salientar a importância do vestuário nos mecanismos de transferência de calor, uma vez que este possui não só uma camada têxtil isolante, como permite também a formação de uma camada de ar (não renovada) na superfície do corpo, ambas responsáveis pela redução das trocas de calor por condução e convecção (Estrela, 2013). Como a condutibilidade da água faz aumentar a troca de calor através da roupa, é por isso pertinente referir que a capacidade de minimizar a transferência de calor a partir do vestuário é afetada quando na presença de roupas molhadas ou húmidas (como por exemplo em roupa suada) (Magalhães *et al.*, 2001).

Outro fator também a ter em conta é a aclimação, capacidade individual adaptativa de um ser humano resistir a uma exposição constante de temperaturas elevadas. É pois perceptível que um indivíduo aclimatado suporta mais facilmente a exposição ao calor (por um período de tempo continuado), do que um indivíduo não aclimatado. Isto deve-se ao facto de no primeiro caso a produção de suor ser superior comparativamente ao segundo, permitindo por isso maior libertação de calor por forma a atingir o equilíbrio térmico.

2.3. Efeitos da exposição de calor

O ser humano possui mecanismos de gerar e libertar calor entre o corpo e o ambiente. É pois importante que essa permuta de energia ocorra na mesma proporção, por forma a atingir o equilíbrio térmico. No entanto, em condições de stresse térmico é provável que o ser humano não consiga alcançar esse equilíbrio, uma vez que a resposta fisiológica torna-se insuficiente, face a uma situação de desconforto térmico (sobrecarga térmica).

A corrente sanguínea tem como função transportar não só o oxigénio, como também o calor interno do corpo para a pele, onde aqui é dissipado pelos mecanismos de transferência de calor já referidos. No entanto, em situações de desconforto como acima descrita, o stresse térmico faz com que seja aplicado sobre o sistema cardiovascular uma carga adicional, aumentando assim o ritmo cardíaco e consequentemente a temperatura profunda do corpo (Rodahl, 2003)

A tolerância do ser humano ao calor está relacionada com o grau de humidade do ambiente. Em ambientes secos, a evaporação é eficiente, pelo que temperaturas exteriores de 65,5°C poderão ser suportadas durante um determinado período de tempo. Quando se verificam condições de humidade intermédia, a temperatura corporal máxima suportada é cerca de 40°C, enquanto que a mínima aproximadamente de 35,3°C. Já em condições de ambientes saturados, a temperatura corporal começa a subir, assim que se verifique uma temperatura exterior superior a 34,4°C (Magalhães *et al.*, 2001).

Com isto poderão ser despoletadas patologias ou alterações fisiológicas graves que comprometem a saúde do ser humano. Este tema é analisado na secção seguinte.

2.3.1. Patologias e alterações fisiológicas devido ao calor

Golpe de calor

Na presença de condições desfavoráveis ao ser humano, nomeadamente ambientes térmicos agressivos a que lhes estão associados uma atividade física significativa, poderá ocorrer aquilo a que os especialistas denominam como golpe de calor, uma das mais preocupantes consequências despoletadas pelo stresse térmico (Estrela, 2013).

Quando o sistema de termorregulação falha e a sudação cessa existe um aumento exponencial de temperatura corporal (≥ 40 °C) (Judge, 2003) que compromete

assim a saúde do indivíduo (Mendes, 2009). Se esta temperatura atingir os 42 °C, este poderá sofrer graves lesões cerebrais ou até mesmo levar à morte (Manual Merk, 2009).

Exaustão de calor

Quando existe suduação do corpo sem que ocorra a devida reposição de líquidos pode ocorrer a exaustão de calor, consequente da sobrecarga térmica e cardiovascular em simultâneo (Estrela, 2013). De referir que o ser humano devidamente aclimatado consegue sobreviver por um período de tempo bastante significativo sem reposição de líquidos num ambiente térmico moderado. Contudo, quando isso não se verifica, o tempo de exposição é drasticamente reduzido (Estrela, 2013).

Cãibras de calor

Caibras de calor designam-se por espasmos musculares graves, resultantes de uma perda excessiva de líquidos e de défice salino (eletrólitos, como o sódio, potássio e magnésio) pela suduação, durante a exposição a elevadas temperaturas e a níveis de atividade física intensos e prolongados. O excesso de vestuário de proteção contribui para o aumento da taxa de suduação (Manual Merk, 2009).

Esgotamento por depleção salina

Numa situação de ambiente quente combinada de uma atividade física intensa, o ser humano pode sofrer uma elevada perda de cloreto de sódio. Caso esta perda se torne significativa e não exista uma reposição sal compensatória, poderá ocorrer aquilo a que se denomina por esgotamento por depleção salina.

Naturalmente que as perdas de cloreto de sódio serão superiores em indivíduos não aclimatados, pois os indivíduos aclimatados possuem uma dieta composta de característica de quantidades de sal suficientes para colmatarem estas situações (Hudson *et al.*, 2003).

Síncope de calor

Resulta de uma redução do volume sanguíneo e de oxigénio que chega ao cérebro, devido à grande quantidade de sangue disponibilizada para a superfície da pele, podendo ocorrer para uma temperatura profunda do corpo na ordem dos 38 °C (Judge, 2003; Mendes, 2009)

Outros efeitos

Erupções cutâneas

As erupções cutâneas definem-se como irritações causadas pela obstrução dos poros da pele. Estas ocorrem em situações de pele molhada ou húmida durante longos períodos de tempo (Judge, 2003), onde não tem lugar o processo evaporativo.

De referir ainda que a fadiga térmica transiente (resultante de uma exposição prolongada associada a uma perda de líquidos significativa) e a deficiência de suor (característica de uma sensação de calor, esgotamento e um aumento repentino do ritmo cardíaco) poderão comprometer a coordenação motora, o desempenho laboral e, em última instância levar ao colapso.

2.3.2. Desidratação e Produtividade

Desidratação

A desidratação do corpo humano é um dos problemas mais relevantes quando se fala de ambientes térmicos quentes.

O ser humano possui um sistema de regulação hidromineral que realiza a manutenção de água e sais minerais do corpo. Contudo, este sistema apenas suporta até determinados limites térmicos que, quando ultrapassados, naturalmente comprometem a performance humana, podendo na pior das hipóteses levar à morte (Parsons, 2002).

O estado de hidratação pressupõe um equilíbrio entre as entradas (por ingestão de água) e das saídas (por meio de suor, urina, fezes, entre outros). Trata-se de um processo de balanço hidromineral contínuo e dinâmico, onde existe um controlo da água disponível, mediante estímulos corporais (retenção, segregação e excreção), para que se verifique assim uma distribuição apropriada da água ao longo do corpo (Parsons, 2002).

Toda a água perdida pelo corpo deve ser repostada, isto é, se um indivíduo perde 1 L de água através de suor, então deve repor esse litro de água. Contudo, torna-se difícil estimar a quantidade de água necessária a ingerir em ambientes térmicos quentes.

Um indivíduo de 75 kg possui cerca de 45 L de água no corpo, ou seja 60 % do seu peso. Obviamente que esta proporção é dependente da composição do corpo, mediante

maior ou menor existência de massa gorda. É assim perceptível a importância da água no nosso organismo (Parsons, 2002).

A água existente no organismo pode ser encontrada em 3 meios: intracelular (até 67 % do corpo), extracelular: plasma e sangue (até 8 %), e intersticial: entre células e vasos sanguíneos (até 25 %) (Parsons, 2002).

Ingerir a quantidade certa de água, não significa por si só uma reidratação automática, isto é, o controlo e distribuição de água não é feito na mesma velocidade e proporção ao longo do corpo, uma vez que existem zonas que carecem de uma maior quantidade, comparativamente a outras. Concluindo, é imperativo olhar para a desidratação de uma forma preventiva, pois uma vez atingida o sistema regulador fica afetado e não é aconselhável exercer mais atividade ao longo do dia, podendo conduzir a uma série de patologias graves. (Parsons, 2002).

Produtividade

É sabido que o ambiente térmico é um dos fatores mais relevantes no que diz respeito à produtividade, sinistralidade e saúde dos trabalhadores.

Por exemplo, quando os limites do stresse térmico sob efeito de calor ou frio são ultrapassados e o trabalho é interrompido, a produtividade torna-se nula. Quando o desconforto térmico é significativo, a capacidade de concentração do trabalhador diminui, levando a um aumento da probabilidade de ocorrência de acidentes e conseqüentemente a uma redução do nível de produtividade. Tudo isto são exemplos óbvios de que existe uma relação direta entre a o stresse térmico e o nível de produtividade dos trabalhadores, quando sujeitos a ambientes térmicos quentes, moderados ou frios. (Parsons, 2002).

A figura 1 demonstra a relação entre a temperatura do ar e a frequência relativa de acidentes em contexto laboral

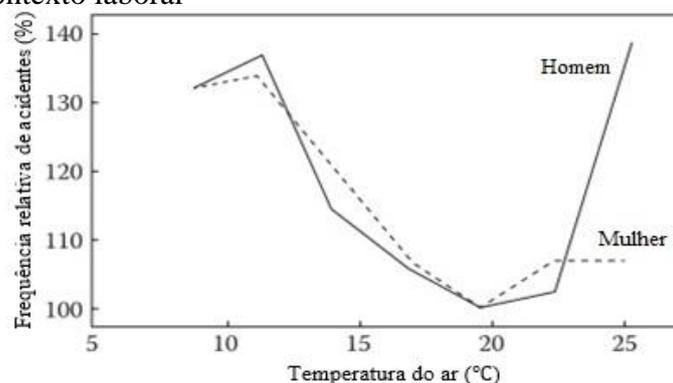


Figura 1 - Relação entre a frequência de acidentes de trabalho e a temperatura do ar (sector militar). Adaptado de Parsons, 2002

3. ANÁLISE DA ISO 7933:2004

A norma ISO 7933:1989 tem como objetivo a determinação analítica e interpretação do stresse térmico com base no índice da sudação requerida. “*Esta norma internacional especifica um método de avaliação e interpretação do stresse térmico a que está sujeita uma pessoa em um ambiente quente, através do índice da taxa requerida de suor (Sw_{req}). Descreve um método para o cálculo do balanço térmico, bem como para o cálculo da taxa de suor requerida pelo corpo, para manter esse balanço em equilíbrio*” (Lamberts *et al.*, 2008).

Aquando a sua publicação muitas foram as suas críticas, particularmente quando comparada com outros artigos que referiam algumas das limitações da norma internacional, tais como:

- A previsão da temperatura da pele;
- A influência do vestuário nas trocas de calor por convecção e evaporação;
- O efeito combinado de vestuário e movimento;
- O aumento da temperatura interna ligada à atividade;
- A previsão da duração de exposição máxima permitida;
- A perda máxima de água (Malchaire *et al.* 2001).

Identificadas as debilitações, um grupo de laboratórios e cientistas reuniu-se em torno de um projeto em avaliação de ambientes térmicos quentes com o seguinte objetivo: desenvolver avanços na área dos fatores térmicos, melhorar não só os métodos disponíveis para avaliar os riscos de doenças provenientes de ambientes térmicos quentes, mas também o método de cálculo da taxa de sudação requerida, definida pela ISO 7933:1989 (Malchaire *et al.*, 2001).

Com isto surgiu então uma versão melhorada da ISO 7933:1989, denominada por ISO 7933:2004. O objetivo era o mesmo, a determinação analítica e interpretação do stresse térmico. No entanto, a norma mais antiga fornecia esse cálculo com base no índice de sudação requerida, enquanto a mais recente pelo modelo Predicted Heat Strain. Na prática, a forma de cálculo do modelo PHS é semelhante ao do índice de sudação requerida, mas com algumas modificações e adições (Parsons, 2002).

3.1. Princípios e métodos de avaliação

A metodologia usada tem em conta o balanço térmico do corpo em função de alguns parâmetros. Estes dividem-se em: parâmetros característicos do ambiente e parâmetros individuais do trabalhador.

Os parâmetros físicos característicos do ambiente são:

- Temperatura do ar, t_a [°C];
- Temperatura média radiante, t_r [°C];
- Pressão parcial de vapor, p_a [kPa]
- Velocidade do ar, v_a [m/s]

Os parâmetros individuais do trabalhador são:

- Taxa metabólica, M [W/m²];
- Isolamento térmico do vestuário, I_{cl} [clo]

3.2. Principais etapas de cálculo

Equação geral do balanço térmico

O balanço térmico pode ser descrito pela seguinte equação:

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad (3)$$

O significado da mesma traduz-se pela igualdade da diferença entre a produção de calor interno do corpo (Taxa metabólica, M) e o trabalho mecânico externo (W), e o somatório das restantes trocas de calor, nomeadamente trocas de calor por convecção (C_{res}) e evaporação (E_{res}) na respiração, trocas de calor por condução (K), convecção (C), radiação (R) e evaporação (E) e, pelo eventual armazenamento de calor no corpo (S).

Taxa metabólica (M)

Enquanto que na ISO 7933:1989 ainda não são referidas especificações acerca da taxa metabólica, já na ISO 7933:2004 isso não acontece, ou seja, são particularizadas

algumas indicações para avaliar a taxa metabólica em função do tipo de atividade, da área de corpo envolvida ou de atividades específicas e, por conseguinte, apresentados valores tendo como base a ISO 8996 (Anexo A).

Trabalho mecânico externo (W)

Na maioria das situações industriais o trabalho mecânico externo apresenta um valor reduzido, podendo por isso ser desprezado.

Convecção na respiração (C_{res})

A troca de calor por convecção na respiração [W/m^2] pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$C_{res} = 0,072 \times c_p \times V \times \frac{t_{ex} - t_a}{A_{Du}} \quad (3.1)$$

onde c_p [$J/(kg \cdot ^\circ C)$] traduz-se pelo calor específico do ar seco a pressão constante, V [L/min] o caudal mássico da respiração, t_{ex} [$^\circ C$] a temperatura do ar expirado e A_{Du} [m^2] a área da superfície corporal de *DuBois*.

O fluxo de calor por convecção respiratória pode ainda ser estimado pela seguinte expressão empírica:

$$C_{res} = 0,00152 M (28,56 + 0,885t_a + 0,641p_a) \quad (3.2)$$

Evaporação na respiração (E_{res})

A troca de calor na respiração por evaporação [W/m^2] pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E_{res} = 0,072 \times c_e \times V \times \frac{W_{ex} - W_a}{A_{Du}} \quad (3.3)$$

onde c_e [$J/(kg \cdot ^\circ C)$] traduz-se pelo calor latente de evaporação de água, W_{ex} [$kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$] a humidade específica do ar expirado e W_a [$kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$] a humidade específica do ar inspirado.

O fluxo respiratório de evaporação pode ainda ser estimado pela seguinte expressão empírica:

$$E_{res} = 0,00127 M (59,34 + 0,53t_a - 11,63p_a) \quad (3.4)$$

Condução (K)

A troca de calor por condução não é tida em conta diretamente, uma vez que esta assemelha-se às perdas de calor por convecção e radiação que ocorreriam, se a superfície do corpo não estivesse em contacto com algum corpo sólido.

Convecção (C)

A troca de calor por convecção [W/m^2] ocorrida entre a superfície da pele e o meio que a rodeia pode ser expressa por:

$$C = h_{cdyn} \times f_{cl} \times (t_{sk} - t_a) \quad (3.5)$$

onde h_{cdyn} [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] traduz-se pelo coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vestuário e a envolvente, f_{cl} [adm] o fator de área do vestuário e t_{sk} [$^\circ C$] a temperatura média da pele.

O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a pele e a superfície do vestuário, h_{cdyn} pode ser estimado a partir do maior valor das seguintes expressões:

$$2,38|t_{sk} - t_a|^{0,25} \quad (3.6)$$

$$3,25 + 5,2v_{ar} \quad (3.7)$$

$$8,7v_{ar}^{0,6} \quad (3.8)$$

onde v_{ar} [m/s] representa a velocidade do ar.

Radiação (R)

A troca de calor por radiação [W/m^2] ocorrida entre a superfície da pele e o meio que a rodeia traduz-se pela seguinte equação:

$$R = h_r \times f_{cl} \times (t_{sk} - t_r) \quad (3.9)$$

onde h_r [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] traduz-se pelo coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vestuário e ar envolvente, .

O coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vestuário e o ar envolvente, h_r pode ser estimado usando a seguinte equação:

$$5,67 \times 10^{-8} \varepsilon \times \frac{A_r}{A_{Du}} \times \frac{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4}{t_{cl} - t_r} \quad (3.10)$$

onde ε [adm] traduz-se pela emissividade , e $\frac{A_r}{A_{Du}}$ [adm] a fração da superfície de pele envolvida nas trocas de calor por radiação. Este ultimo toma o valor de 0,67 para um indivíduo agachado, 0,70 para um indivíduo sentado e 0,77 para um indivíduo de pé.

A temperatura da superfície de vestuário, t_{cl} [$^\circ C$] pode ser obtida mediante processos iterativos.

No caso do uso de roupa refletiva, h_r deve ser corrigido pelo factor $F_{cl,R}$, ou seja:

$$h_{corrigido} = h_r \times F_{cl,R} \quad (3.11)$$

onde:

$$F_{cl,R} = (1 - A_p)0,97 + A_p \times F_r \quad (3.12)$$

em que A_p [adm] representa a fração de superfície corporal coberta pelo vestuário refletivo, e F_r [adm] a emissividade do vestuário refletivo.

Evaporação na superfície da pele (E)

A troca de calor máxima por evaporação na superfície da pele [W/m^2], E_{max} é atingida quando a superfície da pele se encontra completamente humedecida, podendo ser expressa por:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{tdyn}} \quad (3.13)$$

onde, R_{tdyn} [$\text{m}^2 \cdot \text{kPa}/\text{W}$] traduz-se pela resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e o vestuário, $p_{sk,s}$ [kPa] a pressão de saturação do vapor de água à temperatura da pele.

A troca de evaporação na superfície da pele é diferente caso a pele se encontre parcialmente humedecida, isto é:

$$E = w \times E_{max} \quad (3.14)$$

onde w [adm] é o humedecimento cutâneo, isto é, a fração equivalente da superfície da pele humedecida.

Armazenamento De Calor (S)

O armazenamento de calor no corpo (S) é calculado mediante a soma algébrica de todos os fluxos de calor representados anteriormente.

3.3. Considerações da ISO 7933:2004

Armazenamento de calor acumulado, associado à taxa metabólica, dS_{eq}

Mesmo na presença de ambientes neutros, a temperatura corporal interna atinge (após um determinado período de tempo) um valor estacionário, designado por temperatura interna de equilíbrio ($t_{cr,eq}$). Esta temperatura está relacionada com a taxa metabólica (M) e o armazenamento de calor associado ao aumento da temperatura até atingir esse valor

estacionário (dS_{eq}), que em nada contribui para o aparecimento de suor. Deve por isso ser deduzido na equação do balanço térmico:

$$dS_{eq} = c_{sp} \times (t_{cr,eq\ i} - t_{cr,eq\ i-1}) \times (1 - \alpha) \quad (3.15)$$

onde c_{sp} [W/m^2] representa o calor específico do corpo, $t_{cr,eq\ i-1}$ [$^{\circ}C$] a temperatura interna como função da taxa metabólica no tempo $i - 1$ e α [adm] a fração de massa corporal à temperatura da pele.

Para determinado indivíduo, pode ser assumido que a temperatura interna de equilíbrio aumenta em função da taxa metabólica, de acordo com a seguinte expressão:

$$t_{cr,eq} = 0,0036 (M - 55) + 36,8 \quad (3.16)$$

Contudo, verifica-se que a temperatura interna atinge um equilíbrio após um período de tempo de 10 min:

$$t_{cr} = 36,8 + (t_{cr,eq} - 36,8) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{10}\right)\right) \quad (3.17)$$

Esta expressão pode ainda ser traduzida na seguinte:

$$t_{cr,eq\ i} = t_{cr,eq\ i-1} \times k + t_{cr,eq} \times (1 - k) \quad (3.18)$$

onde

$$k = \exp\left(\frac{-incr}{10}\right) \quad (3.19)$$

Temperatura média da pele

O cálculo da temperatura da pele pela ISO 7933:1989 apresenta algumas limitações, na medida em que sugere a mesma forma de cálculo independentemente de o indivíduo estar em movimento ou em repouso, com ou sem vestuário

A nova versão da norma (ISO 7933:2004) contempla já essa informação, como se pode verificar de seguida.

Determinação da temperatura média da pele num período de tempo instantâneo,

$t_{sk,eq nu}$

Para indivíduos sem vestuário adequado ($I_{cl} \leq 0,2$):

$$t_{sk,eq nu} = 7,19 + 0,064t_a + 0,061t_r - 0,348v_a + 0,198p_a + 0,000M \quad (3.20) \\ + 0,616t_{re}$$

onde t_{re} [°C] representa a temperatura rectal.

Para indivíduos com vestuário adequado ($I_{cl} \geq 0,6$):

$$t_{sk,eq nu} = 12,17 + 0,020t_a + 0,044t_r - 0,253v_a + 0,194p_a \quad (3.21) \\ + 0,005346M + 0,51274t_{re}$$

Para valores de I_{cl} entre 0,2 e 0,6 a temperatura da pele em estado estático é definida por:

$$t_{sk,eq} = t_{sk,eq nu} + 2,5 \times (t_{sk,eq cl} - t_{sk,eq nu}) \times (I_{cl} - 0,2) \quad (3.22)$$

Determinação da temperatura da pele instantânea, $t_{sk,i}$

A temperatura da pele instantânea, $t_{sk,i}$ [°C] é dada por:

$$t_{sk,i} = 0,7165t_{sk,i-1} + 0,2835 t_{sk,eq} \quad (3.23)$$

De notar que o tempo de resposta da pele é cerca de 3 min, onde a equação acima é utilizada.

Determinação das características de isolamento do vestuário

A ISO 7933:1989 apenas apresenta informação tabelada sobre o isolamento térmico, quer para diferentes conjuntos de vestuário já definidos, quer indiretamente por adição do isolamento parcial de cada um dos itens de vestuário usado. Não contempla pois a influência do efeito combinado do vestuário e do movimento, a reflexão térmica de

radiação ou a permeabilidade ao vapor de água, algo já presente na ISO 7933:2004, como demonstrado de seguida.

Em condição estática

Para indivíduos sem vestuário adequado ($I_{cl} \leq 0,2$) e em condições estáticas sem movimento, quer do ar quer do indivíduo, as trocas sensíveis de calor ($C + R$) podem ser estimadas por:

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_a}{I_{tot\ st}} \quad (3.24)$$

onde a resistência de calor estática, $I_{tot\ st} = 0,111 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Para indivíduos com vestuário adequado ($I_{cl} \geq 0,6$), esta resistência de calor estática, $I_{tot\ st}$ pode ser estimada usando a seguinte equação:

$$I_{tot\ st} = I_{cl\ st} + \frac{I_{a\ st}}{f_{cl}} \quad (3.25)$$

em que o fator de área de vestuário, f_{cl} é dado por:

$$f_{cl} = 1 + 1,97 I_{cl\ st} \quad (3.26)$$

Em condição dinâmica

A atividade do indivíduo e a ventilação são muitas vezes responsáveis pela redução do isolamento do vestuário, uma vez que alteram as características originais do mesmo e da camada de ar adjacente. Por este motivo, é pertinente fazer a sua correção. A correção do isolamento do vestuário em condição estática e do isolamento da camada de ar externa podem ser estimados a partir das seguintes equações:

$$I_{tot\ dyn} = C_{orr,tot} \times I_{tot\ st} \quad (3.27)$$

$$I_{a\ dyn} = C_{orr,la} \times I_{a\ st} \quad (3.28)$$

$$C_{orr,tot} = C_{orr,cl} = e^{(0,043+0,398v_{ar}+0,066v_{ar}^2-0,378v_w+0,094v_w^2)} \quad (3.29)$$

Para $I_{cl} \geq 0,6 clo$ (indivíduos sem vestuário adequado ou camada de ar adjacente):

$$C_{orr,tot} = C_{orr,la} = e^{(-0,472v_{ar}+0,047v_{ar}^2-0,342v_w+0,117v_w^2)} \quad (3.30)$$

e para $0 clo \leq I_{cl} \leq 0,6 clo$, por:

$$C_{or,tot} = (0,6 - I_{cl})C_{orr,la} + I_{cl} \times C_{orr,cl} \quad (3.31)$$

com v_{ar} limitado a 3 m/s e v_w limitado a 1,5 m/s.

Quando a velocidade de caminhada é indefinida ou o indivíduo se encontra em repouso, o valor de v_w pode ser calculado a partir de:

$$v_w = 0,0052(M - 58) \quad \text{com } v_w \leq 0,7 \text{ m/s} \quad (3.32)$$

Finalmente, $I_{cl dyn}$ pode ser derivado por:

$$I_{cl dyn} = I_{tot dyn} - \frac{I_a dyn}{f_{cl}} \quad (3.33)$$

3.4. Cálculo da taxa de evaporação requerida (E_{req}), do humedecimento da pele requerido (w_{req}) e da taxa de suor requerida (Sw_{req})

A equação geral do balanço térmico pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E + S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R \quad (3.34)$$

O processo descrito por esta equação (balanço térmico) assegura a manutenção do equilíbrio térmico corporal, não ocorrendo desta forma armazenamento de calor no corpo, podendo por isso assumir-se que $S = 0$.

Assim, a taxa de evaporação requerida [E_{req}], que representa a troca de calor através do processo de evaporação na superfície da pele, pode ser transformada em:

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - dS_{eq} \quad (3.35)$$

Já o humedecimento cutâneo requerido (w_{req}) pode ser representado por:

$$w_{req} = \frac{E_{req}}{E_{max}} \quad (3.36)$$

onde E_{max} representa a troca de calor máxima por evaporação na superfície da pele, definida por:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - pa}{R_{tdyn}} \quad (3.37)$$

A resistência evaporativa pode ser estimada a partir da seguinte equação:

$$R_{tdyn} = \frac{I_{tot\ dyn}}{\frac{i_{mdyn}}{16,7}} \quad (3.38)$$

O índice de permeabilidade de vestuário dinâmico (i_{mdyn}) é igual ao índice de permeabilidade de vestuário estático (i_{mst}) corrigido pela influencia do ar e do movimento do corpo, ou seja:

$$i_{mdyn} = i_{mst} \times C_{orr,E} \quad (3.39)$$

com

$$C_{orr,E} = 2,6 C_{orr,tot}^2 - 6,5 C_{orr,tot} + 4,9 \quad (3.40)$$

E a taxa de suor requerida (Sw_{req}) expressa em W/m^2 é dada por:

$$Sw_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}} \quad (3.41)$$

onde r_{req} [adm] é a eficiência do processo de evaporação requerida, ou seja tem em conta a porção de suor que cai devido à variação de humedecimento cutâneo localizado.

Eficiência evaporativa

Quando a taxa de evaporação requerida (E_{req}) é superior à taxa de evaporação máxima (E_{max}), é esperado que a pele esteja completamente humedecida, ou seja $w_{req} > 1$.

w_{req} implica que a pele esteja coberta por uma camada de água, ao invés da fração equivalente da pele que é coberta com suor.

Para $w_{req} < 1$, a eficiência é dada por:

$$r_{req} = \frac{1 - w_{req}^2}{2} \quad (3.42)$$

Para $w_{req} > 1$, a eficiência é dada por:

$$r_{req} = \frac{2 - w_{req}^2}{2} \quad (3.43)$$

De referir que o humedecimento cutâneo requerido está limitado a um valor mínimo de 5%.

3.5. Interpretação e análise do modelo de PHS

Para a interpretação do modelo PHS são usados dois critérios para o stress térmico (w_{max} , Sw_{max}), e dois critérios para a tensão térmica ($t_{re,max}$, D_{max}).

Mediante a observação da tabela 3 pode concluir-se que a taxa de suor máxima em indivíduos aclimatados é em média 25 % superior à dos indivíduos não aclimatados. Os limites de desidratação (D_{max}) são baseados numa taxa de desidratação máxima de 3 % (valor usado para grupo de trabalhadores industriais, não estando por isso contemplados grupos especiais, como por exemplo pessoal militar ou desportista, onde os métodos de reposição de líquidos se verificam mais sofisticados).

No que diz respeito à reposição de líquidos, sabe-se em geral que os trabalhadores não ingerem a quantidade de água necessária para compensar a quantidade perdida, característica do processo de sudação.

Para uma exposição de 4-8 h, é observada em metade dos trabalhadores uma taxa de reidratação (independente da quantidade de suor produzido) de 60 %, em média, e é maior do que 40 % em 95 % dos casos. Assim, baseado nas taxas de reidratação, D_{max50} e D_{max95} são determinados:

$$60 \% \text{ de reposição de } 7.5 \% \text{ de perdas} = 4.5 \%$$

$$\text{então } 7,5 - 4,5 = \% \text{ (Desidratação)}$$

$$40 \% \text{ de reposição de } 5 \% \text{ perdas} = 2 \%$$

então

$$5 - 2 = 3 \% \text{ (Desidratação)}$$

Tabela 3 – Valores máximos admissíveis para os critérios de seleção

	Indivíduo não aclimatado	Indivíduo aclimatado
Humedecimento máximo		
w_{max} [adimensional]	0,85	1,0
Taxa de sudação máxima		
Sw_{max} [W/m ²]	$(M - 32)A_D$	$1,25(M - 32)A_D$
Desidratação máxima e Perda de água		
$D_{max\ 50}$ [% de massa corporal]	7,5	7,5
$D_{max\ 95}$ [% de massa corporal]	5	5
Limite máximo de temperatura rectal		
$t_{re,max}$ [°C]	38	38

Adaptado de Parsons, 2002

Temperatura rectal

A temperatura rectal é derivada do armazenamento de calor (S), onde:

$$S = E_{req} - E_p + S_{eq} \quad (3.44)$$

O armazenamento de calor conduz a um aumento de temperatura interna, tendo em conta o aumento da temperatura da pele. A fração de massa corporal na temperatura interna média é dada por:

$$(1 - \alpha) = 0,7 + 0,09(t_{cr} - 36,8) \quad (3.45)$$

onde $(1 - \alpha)$ é limitada a 0,7 para $t_{cr} < 36,8$ °C e 0,9 para $t_{cr} > 39,0$ °C.

$$t_{cr,i} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{2}} \left[\frac{dS_i}{c_p W_b} + t_{cr,i-1} - \frac{t_{cr,i-1} - t_{sk,i-1}}{2} \alpha_{i-1} - t_{sk,i} \frac{\alpha_i}{2} \right] \quad (3.46)$$

A temperatura rectal é pois estimada a partir de:

$$t_{re,i} = t_{re,i-1} + \frac{2t_{cr,i} - 1,962t_{re,i-1} - 1,31}{9} \quad (3.47)$$

O máximo limite de exposição permitida, D_{lim} , é alcançado assim que a temperatura rectal ou a perda de água acumulada atingirem os valores correspondentes da tabela 3. Se E_{max} é negativo, isto é condensação, ou o tempo de exposição permitido estimado é menor que 30 min, ou então o método não é aplicável.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho baseia-se na norma internacional ISO 7933:2004, que traduz o mecanismo termorregulador do corpo humano e seu balanço térmico, a partir do modelo PHS, útil no estudo de ambientes térmicos quentes. Apesar de este modelo ser caracterizado pela sua complexidade de aplicação e extensão, o certo é que fornece informação muito completa para a caracterização de situações de tensão térmica, aproximando-se assim da realidade.

De forma a aplicar este modelo é necessário o conhecimento de parâmetros individuais do trabalhador e de parâmetros do ambiente térmico envolvente, descritos mais à frente.

Ao longo deste capítulo será descrito todo o processo metodológico e de cálculo para o caso de estudo referido na secção 4.1.

4.1. Caso de estudo

A partir da informação compilada no contexto da indústria cerâmica portuguesa, realizou-se uma tabela resumo das 8 unidades industriais em estudo e dos seus 21 locais de trabalho. A tabela 4.1 dá-nos a informação sobre a localização geográfica e o código identificativo adotado, os locais de trabalho e espaço temporal dessas medições, e o início, duração e período de repouso determinado com base no índice WBGT definido na norma ISO 7243:1989.

Tabela 4.1 – Tabela identificativa dos locais de estudo

Unidade Industrial	Distrito	Código de Local Trabalho	Código do Trabalhador	Local de Trabalho	Ano/Mês de medições	Início de medições [h:min]	Duração de medições [min]	Período de repouso calculado [min]
Cerâmica 1	Coimbra	C1,1	OP1	Em Cima Do Forno Túnel	1994/setembro	12:27	60	21
		C1,2	OP2	Junto À Moagem		15:00	60	***
Cerâmica 2	Aveiro	C2,1	OP3	Junto À Entrada Do Forno	1994/julho	15:00	30	***
		C2,2	OP4	Junto Ao Gerador De Calor		16:00	49	5
Cerâmica 3	Leiria	C3,1	OP5	Junto Ao Quadro De Controlo	1994/setembro	17:10	39	3
		C3,2	OP6	Interior Do Forno Hoffman		15:56	26	6
		C3,3	OP7	Em Cima Do Forno Hoffman		12:10	41	5
		C3,4	OP8	Zona Junto Ao Forno Túnel		16:45	20	***
Cerâmica 4	Leiria	C4,1	OP9	Em Cima Do Forno De Cozedura	2012/junho	12:30	60	15
		C4,2	OP10	Zona De Fiacção		15:00	35	***
		C4,3	OP11	Zona Da Empacutadora		16:20	60	24
Cerâmica 5	Aveiro	C5,1	OP12	Acabamento Junto Ao KER 10	2012/junho	11:10	60	***
		C5,2	OP13	Máquina De Tanques		13:20	60	***
Cerâmica 6	Coimbra	C6,1	OP14	Olaria Niv 3	2012/junho	12:40	60	***
		C6,2	OP15	Zona Próxima Do Forno Keramisher		15:20	60	***
Cerâmica 7	Aveiro	C7,1	OP16	Olaria 11	2012/junho	11:30	40	28
		C7,2	OP17	Junto Ao Forno De Secagem		14:30	60	10
		C7,3	OP18	Zona Próxima À Cabine De Retoque A Quente		16:35	30	***
		C7,4	OP19	Zona Junto À Saída Do Forno De Rezoimento		17:45	40	8
Cerâmica 8	Leiria	C8,1	OP20	Plataforma Superior Do Atomizador I	2012/junho	11:35	60	***
		C8,2	OP21	Plataforma Superior Do Atomizador II		14:30	60	9

Adaptada de Oliveira *et al.*, 2015

4.2. Programa de cálculo

Para avaliar a tensão térmica dos locais de trabalho conhecidos recorreu-se à metodologia proposta na norma ISO 7933:2004, que apresenta um algoritmo de cálculo para a aplicação do modelo PHS. Dada a sua complexidade recorreu-se ao auxílio de um programa em linguagem *Matlab*, desenvolvido por Estrela (2013), no âmbito da sua dissertação de mestrado.

As tabelas 4.2 e 4.3 dão-nos a informação necessária sobre as variáveis de entrada a conhecer, e as variáveis de saída geradas pelo programa.

Tabela 4.2 – Variáveis de entrada

	Descrição	Unidade
Dados do Trabalhador	Peso	kg
	Altura	m
	Trabalhador aclimatado [Sim; Não]	-
	Posição de trabalho [Sentado; De pé; Agachado]	-
	Existe uma boa reposição de água? [Sim; Não]	-
	Metabolismo	W/m ²
	Isolamento térmico do vestuário	clo
	Duração do período trabalho	h
Dados do ambiente envolvente	Temperatura do ar	°C
	Temperatura do globo	°C
	Pressão parcial do vapor de água	kPa
	Velocidade do ar	m/s
	Trabalho mecânico externo	W
	Direção de deslocamento do Trabalhador [Sim; Não]	°
	Velocidade de deslocamento do Trabalhador [Sim; Não]	m/s

Tabela 4.3 – Variáveis de saída

Descrição	Unidade
Temperatura rectal	°C
Perda de água (SWtotg)	g
Tempo máximo de exposição admissível para armazenamento de calor (Dlimtre)	min
Tempo máximo de exposição admissível para desidratação em 50 % (Dlimloss95)	min
Tempo máximo de exposição admissível para desidratação em 90 % (Dlimloss50)	min
Humedecimento cutâneo máximo (wmax)	adm
Humedecimento cutâneo requerido (wreq)	adm
Humedecimento cutâneo previsto (wp)	adm
Taxa de sudação máxima (SWmax)	W/m ²
Taxa de sudação requerida (SWreq)	W/m ²
Taxa de sudação prevista (SWp)	W/m ²
Débito evaporativo máximo entre a pele e o ambiente (Emax)	W/m ²
Débito evaporativo requerido (Ereq)	W/m ²
Débito evaporativo previsto (Ep)	W/m ²

4.2.1. Verificação do Programa

Antes da aplicação do programa foi realizada uma verificação do seu correto funcionamento usando como referência os valores de dez situações de trabalho definidas na ISO 7933:2004 (Anexo B).

No que diz respeito aos valores de entrada para os parâmetros individuais do trabalhador, definem-se o grau de aclimação, a postura, o metabolismo (M) e o isolamento térmico do vestuário (I_{cl}). Relativamente às características morfológicas do indivíduo, a norma internacional adota um peso médio de 75 kg e uma altura de 1,80 m.

Quanto aos valores de entrada para o ambiente de trabalho envolvente, consideram-se os valores da temperatura do ar (t_a), da pressão parcial de vapor de água (p_a), da temperatura média radiante (t_r) e da velocidade do ar (v_a). Por último são ainda definidas a direção do deslocamento do trabalhador (θ) e a velocidade de deslocamento do trabalhador.

A partir da tabela 4.2 é fácil entender que para o funcionamento do programa não é requerida a temperatura média radiante (t_r), mas sim a temperatura do globo (t_g),

variável essa não contemplada no anexo B. Por isso foi necessário recorrer a cálculos auxiliares de forma a obter a temperatura do globo (t_g).

As medições realizadas previamente a este trabalho foram feitas com o auxílio de uma unidade de registo e monitorização (ref. 1219), e uma unidade de medida (MM0030) da *Brüel & Kjaer*, por forma a obter os valores das temperaturas do globo (t_g), do bolbo húmido natural (t_{bhn}) e do bolbo seco (t_a). Considerando o equipamento em causa de diâmetro (D) e emissividade do globo negro (ε_g) iguais a 150 mm e 0,95, respetivamente (Oliveira *et al.*, 2015) e, uma vez que o regime encontrado para as dez situações de trabalho listadas no anexo B foi de convecção forçada ($v_a \geq 0,15$ m/s), adotou-se então a equação 4.1 (definida no anexo E da ISO 7726:1998) para o cálculo da temperatura do globo (t_g):

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (4.1)$$

O programa calcula os valores da temperatura rectal final (t_{re}), da perda de água, do tempo máximo de exposição admissível para armazenamento de calor ($D_{lim\ tre}$), do tempo máximo de exposição admissível para desidratação em 50 % da classe trabalhadora ($D_{lim\ loss50}$) e do tempo de exposição admissível para a desidratação em 95 % da classe trabalhadora ($D_{lim\ loss95}$). Após confronto dos resultados obtidos com os de referência (anexo B) verificou-se então a validade do programa, tendo em conta que os resultados obtidos respeitam a precisão de +/- 0,1 °C para a temperatura rectal prevista, e de 1 % de erro para a perda de água, conforme definido pela norma internacional.

4.3. Inventário de dados

Com base em Oliveira *et al.*, 2015, realizou-se uma recolha de dados de entrada para a aplicação do programa e conseqüente geração de resultados. De que referir que de toda a panóplia de dados contidos no referente artigo, apenas foram usados os valores médios.

A aplicação do programa requer, conforme já referido, a introdução de um conjunto de dados iniciais. Relativamente às características do trabalhador, considerou-se

um indivíduo aclimatado com um peso médio de 70 kg e uma altura de 1,70 m (com base na informação cedida pela ISO 8996:2004 – anexo A), em posição de pé e com uma boa reposição de água. Foram ainda adotadas as 8 horas de trabalho diárias, e não se consideraram ainda a direção de deslocamento do trabalhador, tal como a sua velocidade de deslocamento. Os valores de metabolismo e isolamento térmico considerados estão coligidos nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

No que diz respeito aos dados do ambiente envolvente foi necessário o conhecimento da temperatura do ar (t_a), da temperatura do globo (t_g), da pressão parcial de vapor de água (p_a), da velocidade do ar (v_a) e do trabalho mecânico externo que, neste estudo, se considerou de 0 W (vd. tabelas 4.4, 4.5, 4.6). De destacar que todos os dados das tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 estão de acordo com os limites de validade da ISO 7933, definidos no anexo B.

Foi ainda necessário realizar cálculos auxiliares para determinar a pressão parcial de vapor de água (p_a), uma vez que não constava de forma direta na informação previamente recolhida.

A partir das temperaturas do ar e de bolbo húmido, foi possível determinar a humidade relativa e a pressão parcial de vapor de água, através das expressões sugeridas por *Antoine* (Samaca, 2013):

A pressão de vapor de água saturada a 1 atm e à temperatura da pele, $P_{a,s}$ [mbar] é dada por:

$$P_{a,s} = \exp\left(18,956 - \frac{4030,18}{t_a + 235}\right) \quad (4.2)$$

Por outro lado, a pressão de vapor de água saturada, a 1 atm e à temperatura do bolbo húmido, $P_{a,sh}$ [mbar] é dada por:

$$P_{a,sh} = \exp\left(18,956 - \frac{4030,18}{t_{bh} + 235}\right) \quad (4.3)$$

em que que t_{bh} [°C] corresponde à temperatura do bolbo húmido.

A temperatura do bolbo húmido foi calculada a partir das seguintes expressões contidas em Malchaire *et al.*, 2014:

Se $t_g - t_a \leq 4^\circ\text{C}$, então:

$$t_{bhn} = t_a - \delta(t_a - t_{bh}) \quad (4.4)$$

onde δ toma o valor de:

$$0,85 \quad \text{se } v_a \leq 0,003 \text{ m/s} \quad (4.4.1)$$

$$0,069 \log v_a + 0,96 \quad \text{se } 0,03 < v_a < 3 \text{ m/s} \quad (4.4.2)$$

$$1 \quad \text{se } v_a \geq 3 \text{ m/s} \quad (4.4.3)$$

Caso $t_g - t_a > 4^\circ\text{C}$, então:

$$t_{bhn} = t_{bh} - 0,2 + 0,25(t_g - t_a) + \varepsilon \quad (4.5)$$

onde ε toma o valor de

$$1,3 \quad \text{se } v_a \leq 0,1 \text{ m/s} \quad (4.5.1)$$

$$\frac{0,1}{v_a^{1,1}} \quad \text{se } 0,1 < v_a < 1 \text{ m/s} \quad (4.5.2)$$

$$0,1 \quad \text{se } v_a \geq 1 \text{ m/s} \quad (4.5.3)$$

Para a pressão parcial de vapor de água, P_a [mbar] tem-se que:

$$P_a = P_{a, sbh} - 0,667(t_a - t_{bh}) \quad (4.6)$$

A pressão parcial de vapor de água [P_a] em kPa é dada pela divisão da equação 4.6 por 10:

$$P_a = \frac{P_{a,s} - 0,667(t_a - t_{bh})}{10} \quad (4.7)$$

Somando as expressões 4.3 e 4.6, P_a [mbar] toma a forma de:

$$P_a = \exp\left(18,956 - \frac{4030,18}{t_{bh} + 235}\right) - 0,667(t_a - t_{bh}) \quad (4.8)$$

Por fim a humidade relativa, HR [%] é dada por:

$$HR = \frac{P_a}{P_{a,s}} \times 100 \quad (4.9)$$

Por fim, apresentam-se as tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 relativas aos dados de entrada para os locais em estudo.

Tabela 4.4 – Dados de entrada para as indústrias 1,2 e 3

		Indústria 1		Indústria 2		Indústria 3			
		C1,1	C1,1	C2,1	C2,2	C3,1	C3,2	C3,3	C3,4
Dados do Trabalhador	Operário	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8
	Peso [kg]	70	70	70	70	70	70	70	70
	Altura [m]	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
	Trabalhador aclimatado [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Posição de trabalho [Sentado; De pé; Agachado]	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé
	Existe uma boa reposição de água? [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Metabolismo [W/m^2]	297	297	180	180	239	297	239	180
	Isolamento térmico do vestuário [clo]	0,90	0,90	0,65	0,65	0,60	0,65	1,00	0,90
	Duração do período trabalho [h]	8	8	8	8	8	8	8	8
Dados do ambiente envolvente	Temperatura do ar [$^{\circ}C$]	29,0	34,9	34,5	36,2	27,8	39,3	37,8	29,9
	Temperatura de globo [$^{\circ}C$]	35,7	35,8	37,1	52,3	34,1	63,0	41,8	44,8
	Temperatura média radiante [$^{\circ}C$]	40,98	36,52	39,15	62,90	39,15	76,97	44,81	55,31
	Temperatura do bolbo húmido natural [$^{\circ}C$]	19,4	23,9	24,9	25,2	19,2	27,0	22,1	21,2
	Temperatura do bolbo húmido [$^{\circ}C$]	17,3	22,8	24,0	20,8	17,2	20,7	20,6	17,1
	Pressão parcial do vapor de água [kPa]	1,2	2,0	2,3	1,4	1,3	1,2	1,3	1,1
	Humidade relativa [%]	30,0	35,3	41,6	23,7	33,8	16,8	19,4	25,9
	Velocidade do ar [m/s]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trabalho mecânico externo [W]	0	0	0	0	0	0	0	0

4.5 – Dados de entrada para as indústrias 4, 5 e 6

		Indústria 4			Indústria 5		Indústria 6	
		C4,1	C4,2	C4,3	C5,1	C5,2	C6,1	C6,2
Dados do Trabalhador	Operário	OP9	OP10	OP11	OP12	OP13	OP14	OP15
	Peso [kg]	70	70	70	70	70	70	70
	Altura [m]	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
	Trabalhador aclimatado [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Posição de trabalho [Sentado; De pé; Agachado]	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé
	Existe uma boa reposição de água? [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Metabolismo [W/m^2]	273	224	310	235	280	310	338
	Isolamento térmico do vestuário [clo]	0,65	0,65	0,41	0,41	0,41	0,60	0,60
Duração do período trabalho [h]	8	8	8	8	8	8	8	
Dados do ambiente envolvente	Temperatura do ar [°C]	41,3	37,3	41,6	30,6	30,6	27,6	25,7
	Temperatura de globo [°C]	42,1	39,5	43,0	30,9	31,0	28,3	26,6
	Temperatura média radiante [°C]	42,71	41,20	44,05	31,15	31,34	28,91	27,39
	Temperatura do bolbo húmido natural [°C]	24,0	25,1	25,1	21,6	23,2	22,2	19,3
	Temperatura do bolbo húmido [°C]	22,3	23,9	23,5	20,7	22,5	21,7	18,7
	Pressão parcial do vapor de água [kPa]	1,4	2,1	1,7	1,8	2,2	2,2	1,7
	Humidade relativa [%]	18,1	32,5	21,0	40,7	49,7	59,5	51,0
	Velocidade do ar [m/s]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trabalho mecânico externo [W]	0	0	0	0	0	0	0

4.6 – Dados de entrada para as indústrias 7 e 8

		Indústria 7				Indústria 8	
		C7,1	C7,2	C7,3	C7,4	C8,1	C8,2
Dados do Trabalhador	Operário	OP16	OP17	OP18	OP19	OP20	OP21
	Peso [kg]	70	70	70	70	70	70
	Altura [m]	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
	Trabalhador aclimatado [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Posição de trabalho [Sentado; De pé; Agachado]	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé	De Pé
	Existe uma boa reposição de água? [Sim; Não]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Metabolismo [W/m^2]	407	407	355	400	254	254
	Isolamento térmico do vestuário [clo]	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
	Duração do período trabalho [h]	8	8	8	8	8	8
Dados do ambiente envolvente	Temperatura do ar [°C]	34,2	33,1	32,0	32,3	31,6	37,1
	Temperatura de Globo [°C]	33,7	36,4	34,7	33,1	38,3	45,2
	Temperatura média radiante [°C]	33,29	39,02	36,88	33,76	43,46	51,02
	Temperatura do bolbo húmido natural [°C]	26,2	23,7	23,4	23,5	21,2	23,3
	Temperatura do bolbo húmido [°C]	25,4	22,8	22,6	22,6	19,1	20,9
	Pressão parcial do vapor de água [kPa]	2,7	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4
	Humidade relativa [%]	49,5	41,2	44,3	43,5	29,8	22,0
	Velocidade do ar [m/s]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trabalho mecânico externo [W]	0	0	0	0	0	0

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo são apresentados graficamente os resultados obtidos através do programa *PHS calculator*, de forma a caracterizar o comportamento termofisiológico dos trabalhadores do ramo da indústria cerâmica.

A análise e discussão de resultados é feita a partir da literatura referida ao longo deste estudo, e em particular com base na informação proveniente da norma internacional ISO 7933:2004.

A partir do apêndice A podem ser consultados, com maior pormenor, todos os resultados obtidos para cada local de trabalho.

Taxa de Sudação

Como sabido, a taxa de sudação é caracterizada pela quantidade de calor dissipada, nomeadamente em forma de suor através do mecanismo de evaporação, assegurando deste modo o equilíbrio térmico.

A partir da figura 5.1 é possível observar e comparar a taxa de sudação requerida (Sw_{req}), prevista (Sw_p) e máxima (Sw_{max}) para os 21 locais de trabalho considerados.

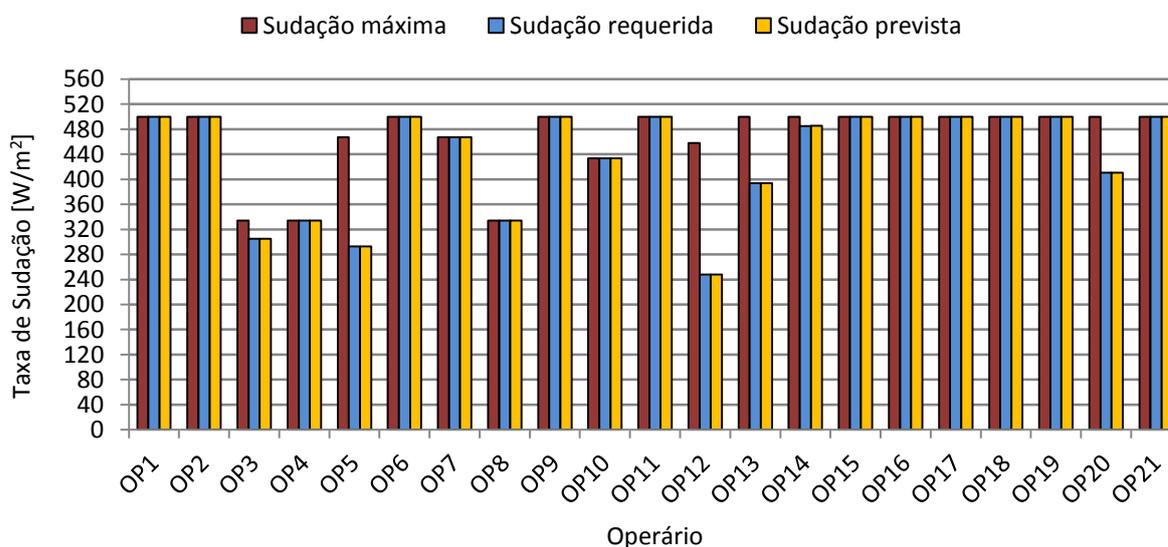


Figura 5.1 - Taxa de sudação máxima, requerida e prevista

Como previsível, as taxas de sudação requerida e prevista não ultrapassam a taxa de sudação máxima, uma vez que esta é, à priori, uma condição definida pela norma internacional ISO 7933:2004. Não obstante este facto, verifica-se que na maioria das situações a taxa de sudação prevista (Sw_p) coincide com a taxa de sudação máxima (Sw_{max}). Nestes casos, existe a possibilidade de o sistema termorregulador não conseguir dar uma resposta eficiente, de forma a manter o equilíbrio térmico face às condições apresentadas. Tal acontece pelo facto de a quantidade de calor gerada ser superior à quantidade de calor libertada, fazendo com que o corpo acumule calor e com isso induza a um aumento da temperatura corporal. Esta situação ocorre nos locais OP1, OP2, OP4, OP6, OP7, OP8, OP9, OP10, OP11, OP15, OP16, OP17, OP18, OP19 e OP21.

O facto de a taxa de sudação prevista (Sw_p) ser inferior à taxa de sudação máxima (Sw_{max}) significa que a resposta do sistema termorregulador é suficiente para manter o equilíbrio térmico, face às condições apresentadas. Os locais OP3, OP5, OP12, OP13, OP14 e OP20 enquadram-se neste cenário.

Débito Evaporativo

Por forma a manter o equilíbrio térmico corporal é imperativo que haja um balanço térmico constante entre o calor gerado e libertado. O mecanismo de transferência de calor responsável por este efeito é a evaporação de suor da superfície da pele (débito evaporativo) que, quando eficiente, assegura a manutenção do equilíbrio térmico corporal, não ocorrendo desta forma armazenamento de calor ($S = 0$), mantendo assim a temperatura corporal aceitável.

Esta troca de calor está condicionada por alguns fatores, tais como o a humidade do ar, a resistência térmica do vestuário, o movimento do trabalhador ou do ar envolvente. No entanto, pode afirmar-se que a evaporação de suor torna-se máxima quando o humedecimento da superfície da pele é total, como demonstrado no capítulo 3. A partir da figura 5.2 é possível observar e comparar o débito evaporativo requerido (E_{req}), previsto (E_p) e máximo (E_{max})

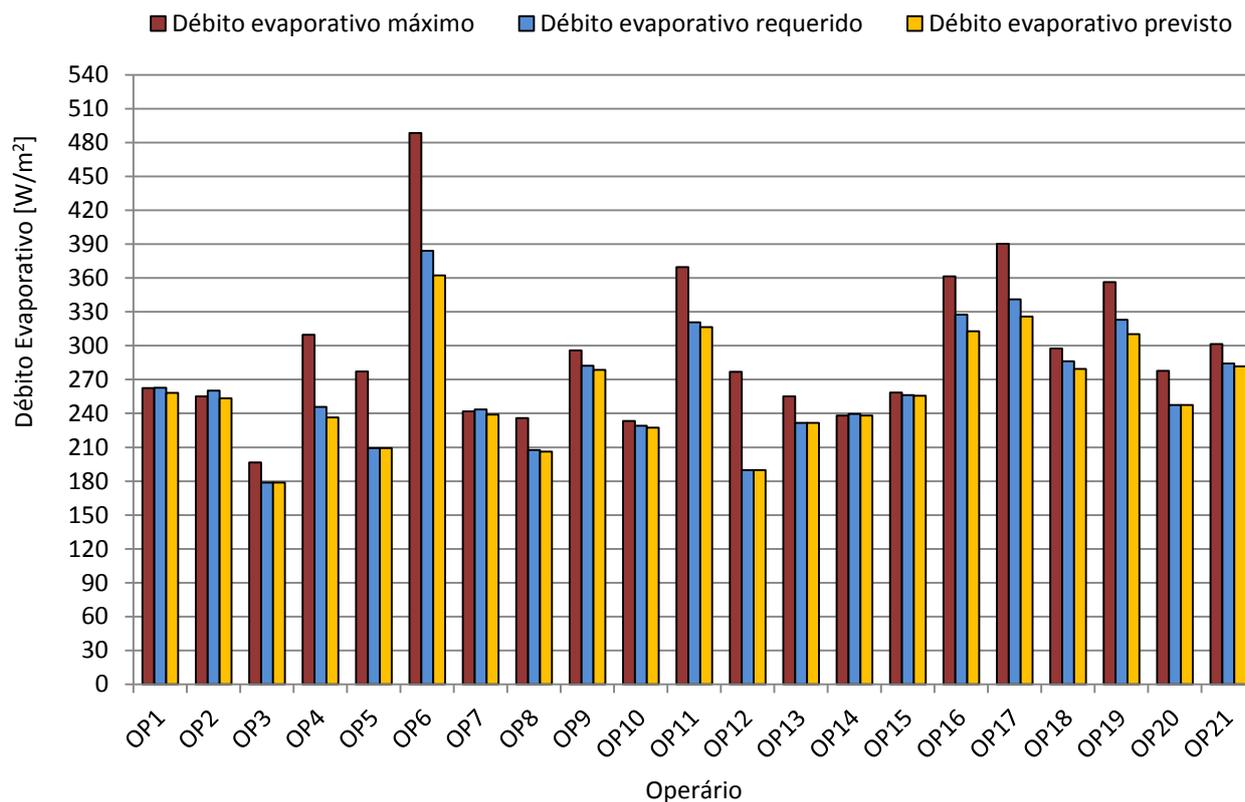


Figura 5.2 – Débito evaporativo máximo, requerido e previsto

Pode dizer-se que quando o débito evaporativo requerido é superior ao débito evaporativo máximo, então é porque a pele se encontra totalmente humedecida, ou seja, o humedecimento cutâneo requerido (w_{req}) é superior a 1. Os locais OP1, OP2 e OP7 e OP14 apresentam este cenário.

Nos casos em que a evaporação prevista é consideravelmente inferior à evaporação requerida, significa que a troca de calor não ocorre de forma eficiente, apresentando por isso um isolamento térmico do vestuário e/ou a humidade relativa do ar elevadas.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos torna-se mais simples analisar de forma particular os casos mais preocupantes, em que o débito evaporativo previsto é consideravelmente inferior ao débito evaporativo requerido. Para esta análise é importante ter presente a informação sobre a taxa metabólica, humidade relativa do ar, temperatura do globo e isolamento térmico do vestuário (*vd.* tabelas 4.4, 4.5, 4.6).

Por observação da figura 5.2 podemos concluir que os casos mais preocupantes são:

Caso OP6

O trabalhador OP6 apresenta uma atividade muito alta (297 W/m^2) e um isolamento de vestuário baixo ($I_{cl} = 0.65 \text{ clo}$). No entanto, pode concluir-se que opera em condições de ambiente desfavoráveis, uma vez que as temperaturas de globo e bolbo seco são elevadas, $63 \text{ }^\circ\text{C}$ e $39,3 \text{ }^\circ\text{C}$, respetivamente. No que diz respeito à humidade relativa, esta apresenta um valor reduzido ($\text{HR} = 16,8 \%$), característica de ambientes pouco saturados.

Humedecimento cutâneo e Eficiência Evaporativa

A partir da figura 5.3 é possível observar o humedecimento cutâneo requerido (w_{req}), previsto (w_p) e máximo (w_{max}).

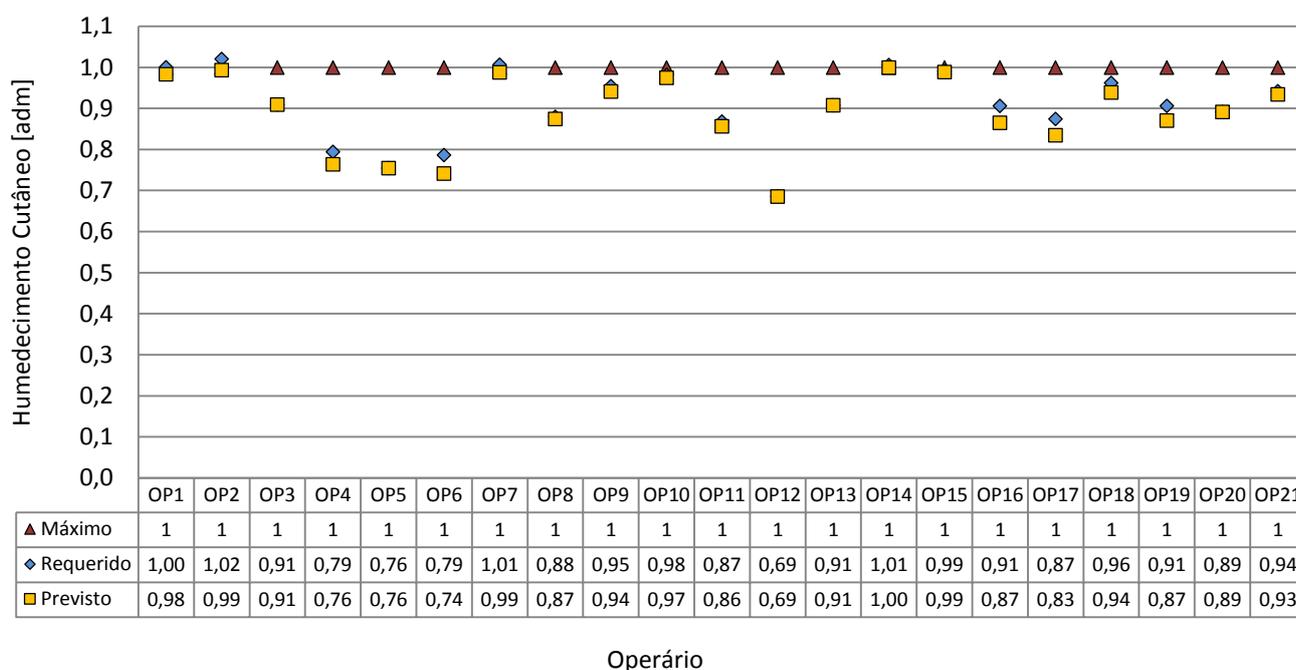


Figura 5.3 – Humedecimento cutâneo máximo, requerido e previsto

No que diz respeito ao humedecimento cutâneo máximo, este tem o seu máximo igual a 0,85 e 1, para indivíduos não aclimatados e aclimatados, respetivamente. Como previsível este valor não é ultrapassado em todos os trabalhadores.

No que diz respeito ao humedecimento cutâneo previsto, este não pode tomar um valor superior à unidade (tal como se verifica em todas as situações), uma vez que a troca de calor por evaporação é limitada à camada de água existente, ou seja à superfície corporal.

Para o cálculo da taxa de sudação prevista, o humedecimento cutâneo requerido pode efetivamente ser superior a 1. Isto acontece quando o débito evaporativo requerido é superior ao débito evaporativo máximo, implicando que a pele esteja totalmente humedecida. Tal acontece nos casos OP1, OP2, OP7 e OP14. De referir que nos locais OP9, OP10, OP15 e OP18 os trabalhadores apresentam uma eficiência evaporativa abaixo do limite estipulado pela norma (5 %). Quando assim acontece, este valor passa automaticamente a ser tomado em consideração.

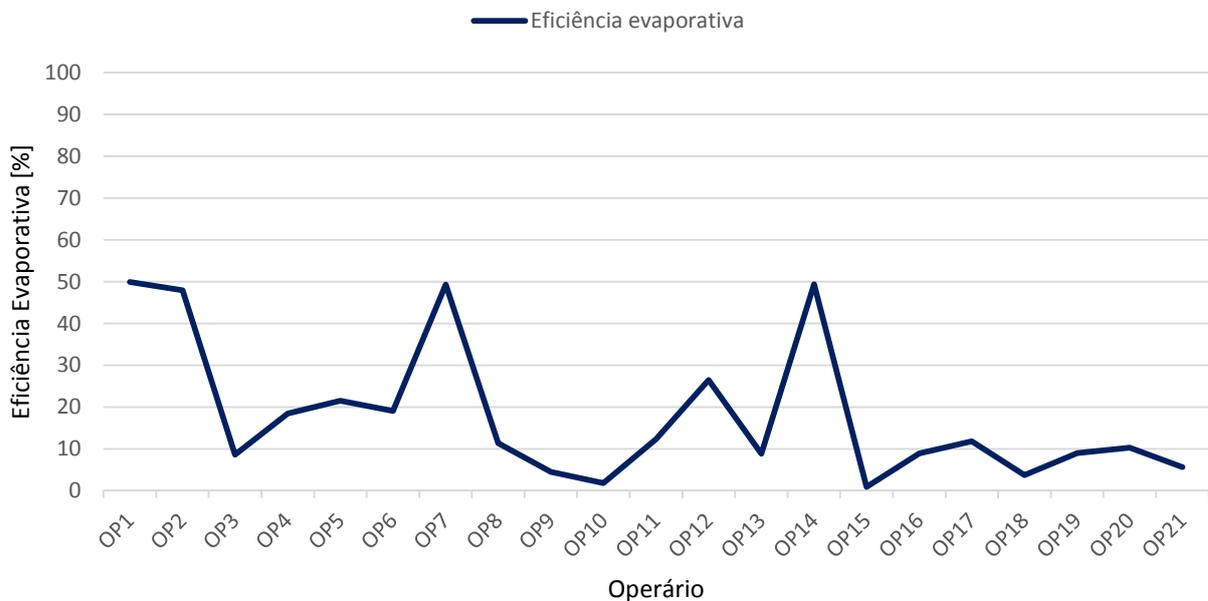


Figura 5.4 – Eficiência evaporativa

Perda de água total

É essencial ter em conta a perda de água no indivíduo, uma vez que deve existir um balanço constante entre as perdas e saídas de água, por forma a manter um equilíbrio hidromineral que permita ao corpo responder às suas necessidades fisiológicas.

A figura 5.5 ilustra os resultados da perda de água total.

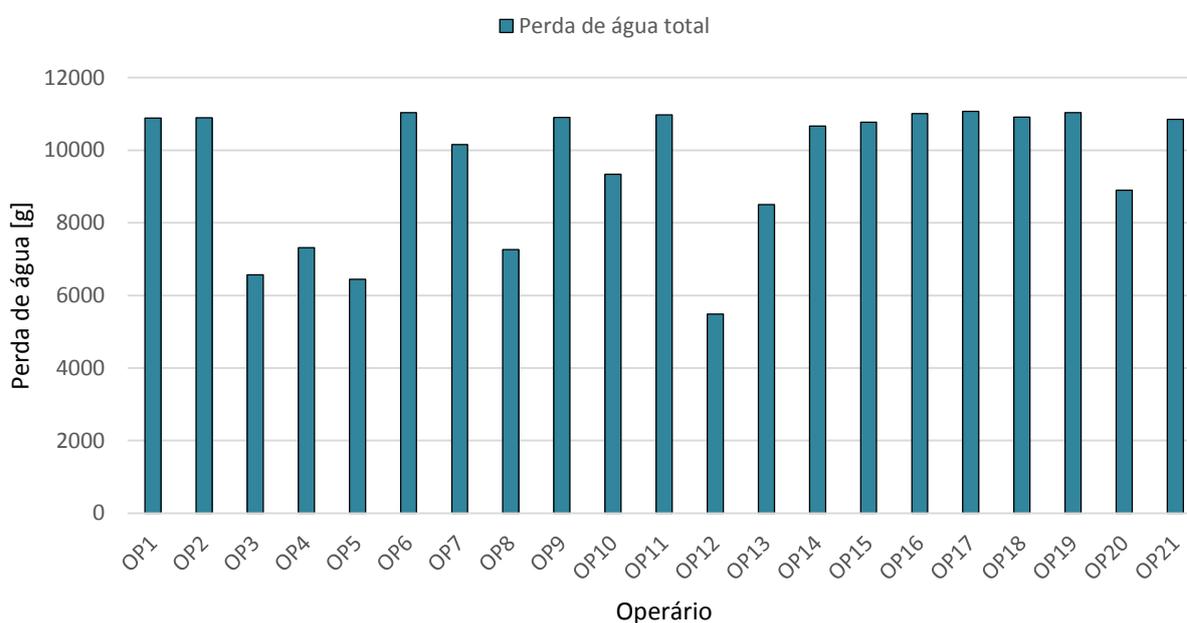


Figura 5.5 – Perda de água total em 8h

Um indivíduo aclimatado perde em média cerca de 1,5 L de água por dia, através da pele, urina, fezes e respiração. No entanto, em atividades intensas, a perda de água pode alcançar valores mais elevados (Parsons, 2002).

A partir da figura 5.5 pode concluir-se que existe uma perda de água total por indivíduo entre os 5 e 12 L, para um período de 8 horas laborais (adotado neste estudo). Considerando uma média horária, pode afirmar-se que a perda de água por indivíduo varia sensivelmente entre os 0,6 L e 1,38 L.

No entanto, uma vez que neste estudo se pressupõe que existe uma boa reposição de água e que não são conhecidos os tempos de descanso, não é possível então retirar conclusões específicas acerca da desidratação dos trabalhadores. Apenas se pode afirmar que os indivíduos onde se verifica menor perda de água são: OP3, OP4, OP5, OP8 e OP12 que apresentam uma perda de água horária abaixo de 1L, enquanto que os restantes acima de 1L.

Temperatura rectal e temperaturas registadas

A partir da figura 5.6 pode observar-se a combinação da temperatura rectal prevista com as temperaturas características de ambientes térmicos, nomeadamente a temperatura do globo, a temperatura do bolbo húmido e a temperatura do bolbo seco. De notar que a linha a tracejado indica a temperatura rectal máxima (38°C), definida pela norma ISO 7933:2004.

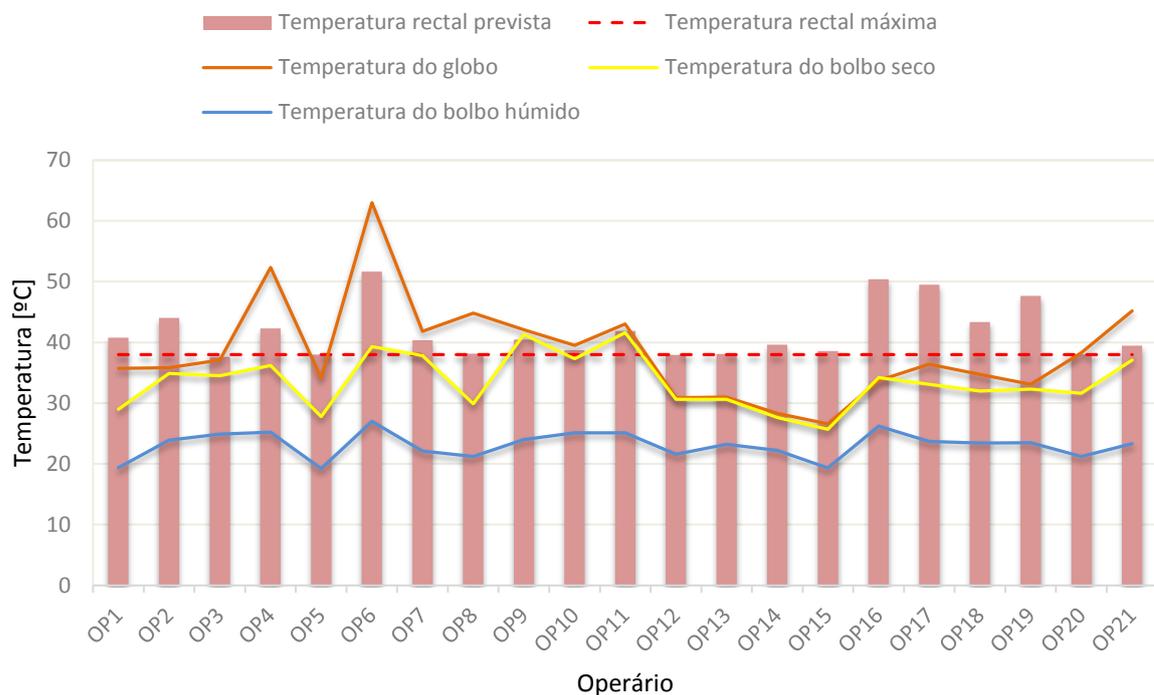


Figura 5.6 – Temperatura rectal e temperaturas registadas.

É pois evidente que ambientes térmicos desfavoráveis induzem a uma maior temperatura rectal prevista. Por isso, é normal que a trajetória das linhas referentes às temperaturas do globo, do bolbo húmido e do bolbo seco acompanhem a trajetória da temperatura rectal prevista.

Por observação da figura 5.6 pode concluir-se que à exceção dos trabalhadores OP3, OP5 e OP12 todos eles ultrapassam o limite da temperatura rectal máxima. Ainda

assim os trabalhadores OP8, OP10, OP13, OP15 e OP20 apresentam uma temperatura rectal prevista ligeiramente superior à temperatura rectal prevista.

Por conseguinte, há que destacar os trabalhadores OP2, OP6, OP16, OP17 e OP19 pela elevada temperatura rectal prevista, onde o trabalhador OP6 detém o maior valor, 51,6 °C.

Tempo de exposição máximo de exposição para armazenamento calor

A partir da figura 5.7 é possível identificar os tempos de exposição para armazenamento de calor.

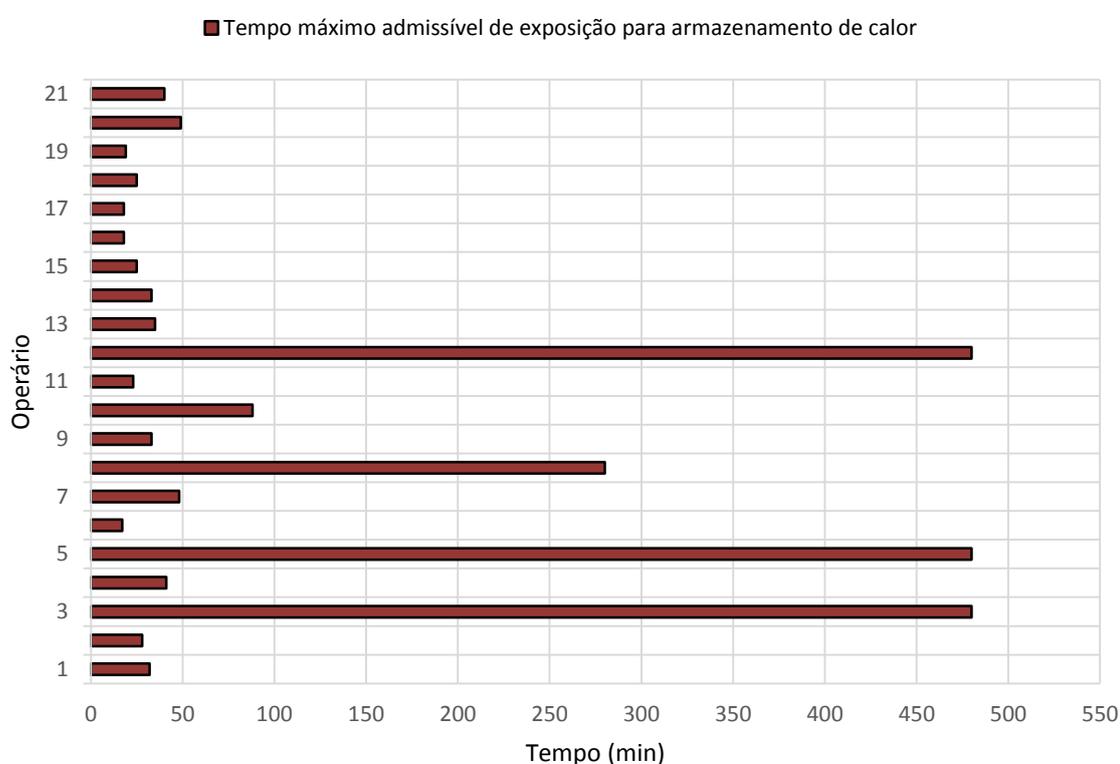


Figura 5.7 – Tempo máximo admissível de exposição para armazenamento de calor

Este parâmetro é de extrema relevância, uma vez que sempre que existe um aumento de temperatura corporal e o sistema termorregulador deixa de responder de forma eficaz, é necessário tomar medidas relativamente ao tempo de exposição. Tempo esse que é condicionado assim que são atingidas a perda hídrica e temperatura rectal máximas. É importante referir que a análise feita é incompleta, pois não existe informação sobre o modo

como os trabalhadores estão expostos às condições térmicas apresentadas, isto é, tempo de permanência contínua, intervalo de repouso ou rotação de local de trabalho.

Partindo do pressuposto que se operam 8 horas diárias, pode afirmar-se que os trabalhadores OP3, OP5 e OP12 não apresentam qualquer perigo em permanecer no seu local de trabalho.

No entanto, os trabalhadores que por norma permanecem num único local de trabalho, devem realizar pelo menos uma interrupção, ou seja, a cada 4 horas. Neste sentido, os trabalhadores acima referidos devem realizar pelo menos um período de interrupção. Acrescentar, o trabalhador OP8 apenas suporta 280 minutos, sendo por isso aconselhável um maior número de interrupções ou rotação do local de trabalho.

À exceção dos indivíduos referidos, todos os outros suportam valores até um máximo de 88 minutos de exposição, ou seja, números reduzidos quando comparados com os restantes. Entende-se assim, que para estes devem ser tidas em conta as medidas já aqui mencionadas, entre outras, para uma longa exposição a condições de ambientes térmicos quentes desfavoráveis.

Tempo máximo admissível de exposição para perda hídrica

Como já referido anteriormente, à parte do balanço térmico apresentado, a perda de água deve ser restrita a um valor máximo, D_{max} , tal que permita a manutenção do equilíbrio hidromineral do corpo.

A partir da norma internacional ISO 7933:2004 pode dizer-se que os limites para a desidratação são de 7,5 % e 5 % de massa corporal para a trabalhadores comuns e 95 % da classe trabalhadora, respetivamente, quer para indivíduos aclimatados como não aclimatados. É de prever que os trabalhadores aclimatados possuam uma maior capacidade de transpiração, comparativamente aos trabalhadores não aclimatados, isto porque possuem melhores condições de adaptabilidade às condições térmicas.

No entanto, os valores acima referidos são considerados para um trabalhador com uma reposição de água aceitável. Caso tal não aconteça, a desidratação pode iniciar-se aos 3 % de massa corporal. Neste caso de estudo isto não se verifica, uma vez que foi adotado que os indivíduos em questão teriam uma boa reposição de água.

A diferença dos resultados apresentados para o “Trabalhador Comum” e para “95 % Da Classe Trabalhadora”, está relacionada com o facto de o segundo apresentar uma amostragem maior, e por conseguinte tempos de exposição menor.

A partir da figura 5.8 pode concluir-se que à exceção dos trabalhadores OP3, OP5, OP8 e OP12, todos os outros apresentam um tempo máximo admissível de exposição para perda de água na situação de 95 % da população trabalhadora preocupante, uma vez que apresentam valores reduzidos entre os 159 e 268 minutos, inclusive. Isto pode ser justificado pelo facto de a grande maioria dos trabalhadores apresentar uma elevada taxa metabólica combinada com condições térmicas adversas, necessitando de libertar calor num menor período de tempo.

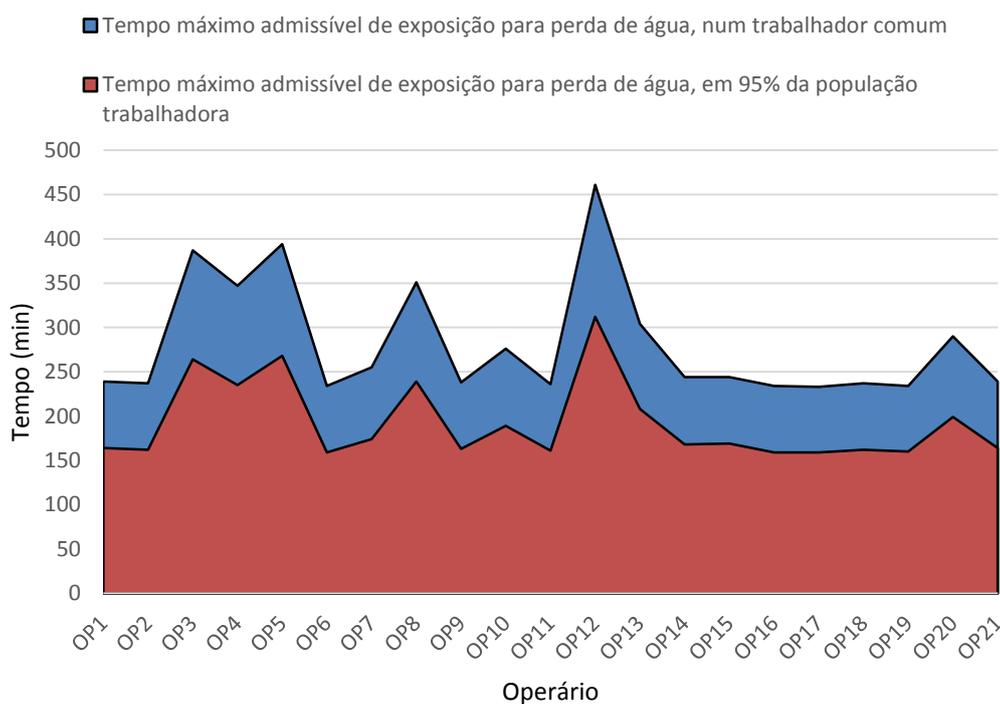


Figura 5.8 – Tempos máximos admissíveis para perda de água

6. CONCLUSÕES

Este estudo abordou as condições de trabalho da indústria cerâmica portuguesa que, como sabido, estão sujeitas a elevadas temperaturas.

Na revisão bibliográfica efetuou-se uma revisão breve do comportamento do corpo humano face a situações térmicas severas, dos mecanismos de transferência de calor, e ainda dos efeitos de exposição de calor, nomeadamente as suas patologias e consequências.

Procedeu-se também a uma análise detalhada da norma ISO 7933:2004 baseada no índice PHS. Este modelo surge em consequência da evolução do índice da sudação requerida, definido na norma ISO 7933:1989. Como exemplo dessas modificações tem-se o aperfeiçoamento do coeficiente de transferência por convecção, radiação e evaporação, da temperatura média da pele, da temperatura rectal, da taxa de sudação, e ainda o critério para a determinação do tempo limite de exposição, diferenciado entre a classe trabalhadora.

A metodologia usada teve como base um programa que contém o algoritmo de cálculo do modelo PHS. Previamente foi realizada uma verificação da sua validade. Para o efeito, foram utilizados os valores para as condições padrão definidas pela ISO 7933:2004. Adicionalmente foi ainda reconfirmada essa validade, utilizando um programa denominado por “Prevheat”, desenvolvido pelo investigador *Jacques Malchaire*, da Universidade Católica de Louvain que, através de um contacto estabelecido, amavelmente cedeu o programa de cálculo e alguma bibliografia.

Com base em trabalhos de investigação já desenvolvidos, foi realizada uma recolha de dados que caracterizam o sector da cerâmica, necessitando apenas de alguns cálculos auxiliares para a introdução de algumas variáveis no programa de cálculo. Foi então compilada a informação de 21 locais de trabalho, com base em medições realizadas entre 1994 e 2012, em 8 unidades industriais.

Os resultados obtidos mostram que existe um número elevado de trabalhadores em risco de stresse térmico. Apesar disso, é de sublinhar que nos cálculos efetuados foram assumidas algumas informações, tais como o tempo de atividade laboral, a aclimação do indivíduo, a sua posição, a reposição de água, e a inexistência quer da velocidade de deslocamento do trabalhador, quer da sua direção. A acrescentar, não foram conhecidos nem

os tempos de repouso/alternância de turnos dos trabalhadores, nem a temperatura exterior dos locais, algo limitador para a interpretação dos resultados.

Comparativamente a outros índices térmicos, tais como o índice WBGT, embora complexa, a metodologia PHS demonstrou ser muito completa na informação apresentada, permitindo assim uma caracterização mais pormenorizada sobre os locais em estudo.

Apesar de tudo, é importante ressaltar que relativamente aos possíveis casos de stresse térmico, devem ser tomadas medidas de atuação e prevenção, no sentido de melhorar as condições laborais existentes e evitar a ocorrência de patologias e /ou acidentes de trabalho.

Algumas dessas medidas de atuação e prevenção podem estar centradas no comportamento do indivíduo, tais como uma correta dieta alimentar, ingerindo elevadas quantidades de água à temperatura ambiente e evitando tanto a ingestão de bebidas alcoólicas como de alimentos ricos em gorduras, moderar a cafeína, e ingerir quantidades adequadas de sal para compensar a transpiração.

Outras formas de prevenir o aparecimento de stresse térmico são: implementação de sistemas de ventilação, realização de turnos de trabalho, evitar exposições longas ao calor, enclausuramento ou arrefecimento de máquinas, ou o uso adequado de proteção individual, tais como vestuário térmico especial ou viseiras.

Para eventuais trabalhos futuros propõe-se o estudo de medidas de melhoria a serem aplicadas nos casos de stresse térmico e os seus impactos, de forma a perceber qual a sua magnitude no contexto laboral. Por outro lado, seria também interessante explorar a relação entre as previsões do modelo PHS e a produtividade, uma vez que são desconhecidos modelos que consigam calcular ou prever essa relação. Tal contribuiria para uma avaliação mais realista do impacto da sobrecarga térmica na produtividade industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 - *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2004.
- APICER – Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica e de Cristalina, *Indústria Cerâmica*. Acedido em 10 de Fevereiro de 2015 em: <http://www.ceramica.pt/setor>.
- Bergman, T.L.; Lavine, A.S.; Incropera, F.P.; De Witt, D.P (2011), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, J. Wiley & Sons, N.Y..
- Braz, José (2005). *Fisiologia da termorregulação normal*. Revista Neurociências. Departamento de Anestesiologia da Faculdade de Medicina de Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, Brasil.
- Camargo, M & Furlan, M. (2011). *Resposta fisiológica do corpo humano às temperaturas elevadas: exercício, extremos de temperatura e doenças térmicas*. Revista Saúde e Pesquisa, Vol.4, Nº2, pp. 278-288.
- Carter, Robert et al. (2007). *Doenças provocadas pelo calor*. Gatorade Sport Science Institute, Brasil.
- Cengel, Y.; A. Ghajar, A (2010). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Inc. N. Y..
- Estrela, T.F.C. (2013), *Avaliação de Ambientes Térmicos Quentes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- GEE- Gabinete de Estratégia e Estudos (2014). *Séries Cronológicas, Acidentes de Trabalho (2002-2011)*. Ministério da Economia, Lisboa.
- Hudson, Joel et al. (2003). *Heat Stress Control and Casually Management – Technical Bulletin*. Headquarters Department of the Army and Air Force, Washington.
- ILO - International Labour Organization (2011). *XIX World Congress on Safety and Health at Work: Global Trends and Challenges*, International Labour Office, First edition, 2011.
- INE- Instituto Nacional de Estatística (2013). *Empresas em Portugal 2011*. Instituto Nacional de Estatística, I.P., Edição 2013, Lisboa.
- ISO 7933:2004 (2004). *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*. International Standard, Final Draft, Geneve.

- ISO 7933:1989 (1989). *Hot Environments – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Stress Using Calculation of Required Sweat Rate*. International Standard, First Edition, Geneve.
- ISO 8996:2004 (2004). *Determination of metabolic rate*. International Standard, Final Draft, Geneve.
- ISO 7726:1998 (1998). *Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring quantities*. International Standard, Geneve.
- Judge, J. (2003), *Thermal stress*, ITEC 471. Acedido em Março de 2015, em:<<http://www.public.iastate.edu>>.
- Lamberts *et al.* (2008). *Conforto e Stress Térmico*, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Leite, E. S. C. M. (2002). *Stresse térmico por calor – estudo comparativo dos métodos e normas de quantificação*. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Magalhães, Sónia; Albuquerque, Roberto Roncon; Pinto, Jorge Correia; Moreira, Adelino Leite (2001). *Termorregulação*. Texto de Apoio. Serviço de Fisiologia, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Porto.
- Malchaire, J.; Alfano, Francesca R. d’Ambrosio; Palella, Boris Igor; Riccio, Giuseppe (2014). *WBGT Index Revisited After 60 Years of Use*, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Malchaire, J.; Piette, A.; Kampmann, B.; Mehnert, P.; Gebhardt, H. J.; Havenith, G.; Hartong, E.; Holmer, I.; Parsons, K.; Alfano, G.; Griefahn, B. (2001). *Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model*. Occupational Hygiene and Work Physiology, Catholic University of Louvain, Belgium.
- Manual Merk (2009), Edição de Saúde para a Família Biblioteca Médica Online. Acedido em Março de 2015 em: <<http://www.manualmerk.net>>.
- Mendes, R.J.P. (2009), *Exposição térmica em incêndios florestais – vestuário de protecção e condições de trabalho de bombeiros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra
- Oliveira, A. Virgílio M.; Gaspar, Adélio R.; Raimundo, António M.; Quintela, Divo A. (2015). *Assessment of thermal environments: Working conditions in the Portuguese ceramic industry in 1994 and 2012*. Journal Work, no. 3, pp. 457-470, 2015.
- Parsons, Ken (2002). *Human Thermal Environments – The effect of Hot, Moderate and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. 3th edition, CRC Press, N.Y.
- Rodahl, K. (2003), *Occupational Health Conditions in Extreme Conditions*. Ann. Occup. Hyg., Vol. 47, No. 3, pp. 241-252. British Occupational Hygiene Society, Publish by Ocford University Press, Oslo.

- Rodrigues, C. (2006), *Higiene e Segurança no Trabalho – Manual Técnico do Formando*, Núcleo de Formação, Estudos e Consultoria. Consultado em 11 de Janeiro de 2015 em:<http://elearning.iefp.pt/pluginfile.php/49027/mod_resource/content/0/p780/Manual_Tecnico_do_Formador_Higiene_e_Seguranca_do_Trabalho.pdf>.
- Samaca, G.V. (2013). *Diseño de un sistema de evaluación y seguimiento de los efectos en la salud de los trabajadores expuestos a altas temperaturas ambientales, aplicado en una empresa de exploración sísmica 2011*. Maestria en salud y seguridad en el trabajo. Facultad de Enfermería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Taylor, Nigel (2006). *Challenges of Temperature Regulation When Working in Hot Environments*. Human Performance Laboratories, School of Health Sciences, University of Wollongong, Australia.
- World Health Organization (WHO), (1969). *Health factors involved in working under conditions of heat stress*. World Health Organization (WHO), Technical Report Series, no. 412, Geneve.

ANEXO A

Este anexo apresenta informação sobre valores de referência usados para a taxa metabólica e dados específicos de um indivíduo padrão, de acordo com a norma internacional ISO 8996:2004.

Tabela A1 – Classificação da Taxa metabólica (W/m^2) em função do tipo de atividade
(adaptado da ISO 8996:2004)

Classe	Taxa metabólica	Exemplos
Repouso	70	Sentado, de pé em descanso.
Atividade muito leve	90	Trabalho manual leve (escrever, datilografar, desenhar); trabalho de mãos (pequenas ferramentas de bancada, inspeção, montagem ou triagem de materiais leves).
Atividade leve	115	Trabalho de braços (conduzir um veículo em condições normais, operação de troca de pé, ou pedal); operar com máquinas ou com ferramentas de baixa potência; caminhada leve).
Atividade moderada	145	Mão sustentada e trabalho de braços (martelar pregos, limar); trabalho de braços ou pernas operações fora da estrada de camiões, tratores ou equipamentos de construção.
Atividade moderada a alta	175	Trabalho de braços ou tronco; trabalhar com martelo pneumático, montagem de tratores, manuseamento intermitente de material moderadamente pesado, empurrar ou puxar carrinhos leves ou de mão, andar a uma velocidade de 4 km/h a 5 km/h; conduzir um carro de neve.
Atividade alta	200	Trabalho intenso de braços ou tronco, carregar material pesado, pá; trabalhar com martelo; corte de árvores com motosserra, cavar; andar numa velocidade entre 5 km / h e 6 kmh. Empurrar ou puxar carrinhos de mão com carga pesada; lascar peças fundidas; colocar blocos de cimento; conduzir carro de neve em terreno pesado.
Atividade muito alta	➤ 230	Trabalho muito intenso num ritmo rápido; trabalhar com machado; trabalhar com pá ou cavar; escalar, movimentar em rampas ou escadas; andar rápido em passos pequenos; correr; andar numa velocidade superior a 6 km/h, andar em neve solta e profunda.

Tabela A2 – Taxa metabólica (W/m^2) em função da área de corpo envolvida e da intensidade de trabalho para determinada parte do corpo (adaptado da ISO 8996:2004)

Áreas do corpo envolvidas	Trabalho		
	Leve	Médio	Pesado
Ambas as mãos	65	85	95
Uma mão	100	120	140
Ambos os braços	135	150	165
Todo o corpo	190	255	345

Tabela A3 – Taxa metabólica (W/m^2) em função de atividade específica (adaptado da ISO 8996:2004)

Tipo de atividade		Taxa metabólica	
Repousar		40	
Descansar sentado		55	
Descansar em pé		70	
Caminhar	Em terreno plano sem carga	2 km/h	110
		3 km/h	140
		4 km/h	165
		5 km/h	200
	Em terreno plano com carga	10 kg a 4 km/h	185
		30 kg a 4 km/h	250
	Subir sem carga	Terreno com inclinação 5°	180
		Terreno com inclinação 15°	210
		Terreno com inclinação 25°	300
	Subir a 4 km/h e com uma carga de 20 kg	Terreno com inclinação de 15°	270
		Terreno com inclinação de 25°	410
	Descer a 5 km/h e sem carga	Terreno com inclinação de 5°	135
		Terreno com inclinação de 15°	140
Terreno com inclinação de 25°		180	

Tabela A4 – Taxa metabólica (W/m^2) em função de atividade específica (adaptado da ISO 8996:2004)

Tipo de atividade		Taxa metabólica
Subir escadas	Subir uma escada com inclinação de 70° com velocidade média de 11,2 m/min	Sem carga
		Com carga de 20 kg
Empurrar ou puxar porta paletes	Velocidade 3,6 km/h	Empurrar: 12 kg
		Puxar: 16 kg
Empurrar empilhador	Velocidade 4,5 km/h	Com carga 100 kg
Manusear um martelo com as duas mãos, com uma massa de 4,4 kg, 15 golpes por minutos		290
Trabalhos de carpintaria	Serrar à mão	
	Utilizar máquina de serrar	
	Utilizar uma plaina de mão	
Colocação de tijolos	5 tijolos por minuto	170
Aparafusar		100
Cavar um buraco		290
Trabalhar com ferro	42 golpes/min	100
	60 golpes/min	190
Trabalhar com maquinaria	leve	100
	moderada	140
	alto	210
Trabalhar com uma ferramenta de mão	leve	100
	moderado	160
	alta	230

Tabela A5 – Dados relativos a um indivíduo padrão (adaptado da ISO 8996:2004)

	Homem	Mulher
Altura [m]	1,75	1,7
Peso [kg]	70	60
Área superficial de corpo DuBois [m²]	1,8	1,6
Idade [anos]	30	30

ANEXO B

Este anexo apresenta informação sobre valores de referência usados para a validação do algoritmo de cálculo do modelo PHS da norma internacional ISO 7933:2004.

Tabela B1 – Valores de referência para validação do modelo PHS (adaptado da ISO 7933:2004)

Parâmetros (unidades)	Exemplos de condições de trabalho									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aclimatização	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Postura	De pé	De pé	De pé	De pé	Sentado	Sentado	De pé	De pé	De pé	De pé
t_a (°C)	40	35	30	28	35	43	35	34	40	40
p_a (kPa)	2,5	4	3	3	3	3	3	3	3	3
t_r (°C)	40	35	50	58	35	43	35	34	40	40
v_a (m/s)	0,3	0,3	0,3	0,3	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
M (W/m ²)	150	150	150	150	150	103	206	150	150	150
I_{cl} (clo)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,4	0,4
θ (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
Velocidade de deslocamento (m/s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
t_{re} final (°C)	37,5	39,8	37,7	41,2	37,6	37,3	39,2	41	37,5	37,6
Perda de água (g)	6168	6935	7166	5807	3892	6763	7236	5548	6684	5379
$D_{lim tre}$ (min)	480	74	480	57	480	480	70	67	480	480
$D_{lim loss50}$ (min)	439	385	380	466	480	401	372	480	407	480
$D_{lim loss95}$ (min)	298	256	258	314	463	271	247	318	276	339

Tabela B2 – Limite de intervalos para a validade do modelo PHS (adaptado da ISO 7933:2004)

Parâmetros	Unidade	Mínimo	Máximo
t_a	°C	15	50
p_a	kPa	0	4,5
$t_r - t_a$	°C	0	60
v_a	m/s	0	3
M	W	100	450
I_{cl}	clo	0,1	1

Quando um ou mais parâmetros se encontram fora destes limites, é recomendável o uso do modelo PHS com precaução, tendo especial atenção aos indivíduos expostos.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta informação sobre os resultados obtidos, após a aplicação do programa de cálculo que descreve o modelo PHS.

Tabela A1 – Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS

Parâmetro	Unidade	Indústria 1		Indústria 2		Indústria 3			
		C1,1	C1,1	C2,1	C2,2	C3,1	C3,2	C3,3	C3,4
		OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8
Duração de um período de trabalho	min	480	480	480	480	480	480	480	480
Temperatura rectal prevista	°C	40,7	44,0	37,6	42,3	38,0	51,6	40,4	38,1
Perda de água em 480 minutos	g	10883	10898	6565	7317	6447	11036	10157	7258
Tempo máximo admissível de exposição para armazenamento de calor	min	32	28	480	41	480	17	48	280
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água, num trabalhador comum	min	239	237	387	347	394	234	255	351
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água em 95 % da população trabalhadora	min	164	162	264	235	268	159	174	239
Humedecimento cutâneo máximo	adm	1	1	1	1	1	1	1	1
Humedecimento cutâneo requerido	adm	1	1,02	0,91	0,79	0,76	0,79	1,01	0,88
Humedecimento cutâneo previsto	adm	0,98	0,99	0,91	0,76	0,76	0,74	0,99	0,87
Eficiência evaporativa	%	49,92	47,94	8,62	18,45	21,49	19,09	49,33	11,31
Sudação máxima	W/m ²	500	500	334,01	334,01	467,17	500	467,17	334,01
Sudação requerida	W/m ²	500	500	304,94	334,01	292,89	500	467,17	334,01
Sudação prevista	W/m ²	500	500	304,94	334,01	292,89	500	467,17	334,01
Débito evaporativo máximo	W/m ²	262,59	255	196,51	309,58	277,32	488,43	241,89	235,94
Débito evaporativo requerido	W/m ²	262,8	260,2	178,76	245,92	209,4	384,06	243,51	207,55
Débito evaporativo previsto	W/m ²	258,23	253,31	178,76	236,53	209,40	362,38	239,05	206,32

Tabela A2 – Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS

Parâmetro	Unidade	Indústria 4			Indústria 5		Indústria 6	
		C4,1	C4,2	C4,3	C5,1	C5,2	C6,1	C6,2
		OP9	OP10	OP11	OP12	OP13	OP14	OP15
Duração de um período de trabalho	min	480	480	480	480	480	480	480
Temperatura rectal prevista	°C	40,5	38,7	41,9	37,9	38,1	39,6	38,6
Perda de água em 480 minutos	g	10902	9340	10973	5486	8499	10670	10773
Tempo máximo admissível de exposição para armazenamento de calor	min	33	88	23	480	35	33	25
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água, num trabalhador comum	min	238	276	236	461	304	244	244
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água em 95 % da população trabalhadora	min	163	189	161	312	208	168	169
Humedecimento cutâneo máximo	adm	1	1	1	1	1	1	1
Humedecimento cutâneo requerido	adm	0,95	0,98	0,87	0,69	0,91	1,01	0,99
Humedecimento cutâneo previsto	adm	0,94	0,97	0,86	0,69	0,91	1,00	0,99
Eficiência evaporativa	%	4,48	1,79	12,33	26,5	8,82	49,41	0,89
Sudação máxima	W/m ²	500	433,32	500	458,14	500	500	500
Sudação requerida	W/m ²	500	433,32	500	248,12	393,71	484,91	500
Sudação prevista	W/m ²	500	433,32	500	248,12	393,71	485,34	500
Débito evaporativo máximo	W/m ²	295,9	233,32	369,66	276,88	255,16	238,23	258,46
Débito evaporativo requerido	W/m ²	282,34	229,11	320,87	189,81	231,57	239,63	256,15
Débito evaporativo previsto	W/m ²	278,52	227,44	316,61	189,81	231,57	238,23	255,57

Tabela A3 – Resultados obtidos, após aplicação do modelo PHS

Parâmetro	Unidade	Indústria 7				Indústria 8	
		C7,1	C7,2	C7,3	C7,4	C8,1	C8,2
		OP16	OP17	OP18	OP19	OP20	OP21
Duração de um período de trabalho	min	480	480	480	480	480	480
Temperatura rectal prevista	°C	50,4	49,5	43,3	47,6	38,0	39,5
Perda de água em 480 minutos	g	11013	11071	10914	11037	8901	10848
Tempo máximo admissível de exposição para armazenamento de calor	min	18	18	25	19	49	40
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água, num trabalhador comum	min	234	233	237	234	290	239
Tempo máximo admissível de exposição para perda de água em 95 % da população trabalhadora	min	159	159	162	160	199	164
Humedecimento cutâneo máximo	adm	1	1	1	1	1	1
Humedecimento cutâneo requerido	adm	0,91	0,87	0,96	0,91	0,89	0,94
Humedecimento cutâneo previsto	adm	0,87	0,83	0,94	0,87	0,89	0,93
Eficiência evaporativa	%	8,9	11,79	3,7	8,95	10,29	5,59
Sudação máxima	W/m ²	500	500	500	500	500	500
Sudação requerida	W/m ²	500	500	500	500	410,5	500
Sudação prevista	W/m ²	500	500	500	500	410,5	500
Débito evaporativo máximo	W/m ²	361,42	390,18	297,43	356,36	277,69	301,49
Débito evaporativo requerido	W/m ²	327,66	341,11	286,21	322,88	247,48	284,14
Débito evaporativo previsto	W/m ²	312,77	325,75	279,39	310,36	247,48	281,71