



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Comportamento termofisiológico do corpo humano em situações de exposição aos ambientes quentes típicos das indústrias cerâmica e vidreira

Thermophysiological behavior of human body in exposure to hot environments typical of ceramic and glass industries

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Rafael Oliveira Ronda

Orientadores

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Professor Doutor Avelino Virgílio Monteiro de Oliveira

Júri

Presidente Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

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

Coimbra, Setembro, 2017

“Duas verdades nunca se podem contradizer”

Galileu Galilei

Aos meus pais

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, agradecer aos Professores António Manuel Mendes Raimundo e Avelino Virgílio Monteiro de Oliveira, pela orientação, atenção e disponibilidade ao longo desta dissertação.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio e amizade ao longo deste percurso académico.

Aos meus pais e irmão pela seu apoio e dedicação constante.

Resumo

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo analisar o comportamento termofisiológico do corpo humano em situações de exposição prolongada e/ou repetida ao calor típico dos ambientes térmicos quentes frequentes nas indústrias cerâmica e vidreira portuguesas. Sabe-se que uma exposição prolongada a estes ambientes muito quentes pode levar a que a temperatura profunda do corpo humano atinja valores superiores aos limites da termorregulação normal, o que poderá ter consequências graves e, em casos muito extremos, fatais.

Para prever a evolução do estado térmico dos trabalhadores, e assim fazer uma estimativa do nível de stress térmico a que estão sujeitos, recorre-se a dois *softwares* de simulação da resposta do comportamento termofisiológico do corpo humano. Um dos programas é específico para a determinação de índices de caracterização de ambientes térmicos quentes recorrendo para o efeito ao modelo PHS da norma internacional ISO 7933-2004. O outro, designado por Huthereg, prevê a resposta térmica transiente de um indivíduo através de um modelo multi-nodo de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano. Deste modo, é ainda, possível comparar as previsões de duas ferramentas distintas, ambas passíveis de ser utilizadas na análise do potencial de geração de stress térmico por exposição a ambientes térmicos quentes.

Numa primeira fase analisaram-se os postos de trabalho através dos valores previstos para a temperatura final no reto e no hipotálamo. Com base nestas previsões foi possível caraterizar cada posto de trabalho com base numa escala de 4 níveis de potencial de stress térmico: favorável, aceitável, crítico e muito crítico. Constatou-se que as duas ferramentas de previsão, o modelo PHS e o programa Huthereg, não são perfeitamente consonantes, pois, em algumas situações preveem estados térmicos diferentes.

A seguir analisaram-se mais em pormenor quatro casos concretos, em que as condições de trabalho eram bastantes diferentes entre si. Estes quatro casos diferenciam-se por apresentarem valores substancialmente diferentes entre si de nível de metabolismo ou de isolamento do vestuário ou de temperatura do ar ambiente ou de temperatura média radiante ou de humidade relativa. De modo a abranger ambas as indústrias, optou-se por seleccionar dois casos da indústria vidreira e dois da indústria cerâmica.

Para avaliação do nível de stress térmico dos trabalhadores recorreu-se às previsões do *software* Huthereg (da evolução temporal dos valores da taxa de evaporação e das temperaturas do hipotálamo, retal e máxima da pele) e do modelo PHS (da temperatura retal, da taxa de evaporação, da sudação final e do tempo limite de exposição). Sempre que possível efetuou-se uma comparação emparelhada das previsões dos dois métodos utilizados, utilizando para isso as ferramentas estatísticas média aritmética das diferenças relativas, desvio padrão das diferenças relativas, desvio quadrático médio e coeficiente de Pearson. Embora os valores previstos pelos dois métodos apontem sempre no mesmo sentido, existem diferenças que chegam a ser significativas.

Foi possível concluir que, em termos de stress térmico sentido pelos trabalhadores, a indústria vidreira é bem mais problemática do que a indústria cerâmica. Na primeira existem postos de trabalho muito críticos, em que, se a exposição dos trabalhadores for prolongada ou não for intercalada com períodos de recuperação adequados, pode levar o corpo humano para níveis térmicos com potencial de causarem danos graves.

Palavras-chave: Ambientes térmicos quentes, Huthereg, Indústria cerâmica, Indústria vidreira. PHS

Abstract

This dissertation aims to analyze the thermophysiological behavior of the human body in situations of prolonged and / or repeated exposure to heat typical of hot thermal environments frequent in the Portuguese ceramic and glass industries. It is known that prolonged exposure to these very hot environments can cause the deep temperature of the human body to reach values higher than the limits of normal thermoregulation, which can have profound consequences and, in very extreme cases, fatal.

To predict the evolution of the thermal state of the workers, and to estimate the level of thermal stress to which they are exposed, we use two *softwares* simulating the response of the thermophysiological behavior of the human body. One of the programs is specific for the determination of characterization indices of hot thermal environments using the PHS model of the international standard ISO 7933-2004. The other, designated by Huthereg, predicts the transient thermal response of an individual through a multi-node model of simulation of the thermophysiological behavior of the human body. In this way, it is possible to compare the predictions of two different tools, which both can be used in the analysis of the potential of thermal stress generation by exposure to hot thermal environments.

Firstly, the work stations were analyzed through the values predicted for the final temperature in the rectum and in the hypothalamus. Based on these predictions, it was possible to characterize each workstation applying a four-level thermal stress potential scale: favorable, acceptable, critical and very critical. It has been found that the two forecasting tools, the PHS model and the Huthereg program, are not perfectly consonant because they lead to different workstations classifications.

Secondly, four specific cases, where the working conditions were quite different from each other, were reviewed in more detail. These four cases differ in substantially different values of metabolism or clothing insulation or ambient air temperature or average radiant temperature or relative humidity. To cover both industries, it was decided to select two cases of the glass industry and two of the ceramic industry.

To evaluate the thermal stress level of the workers, we used the Huthereg software's predictions (the temporal evolution of the values of the evaporation rate and the hypothalamus, rectal and maximal skin temperatures) and the PHS model's predictions (of rectal temperature, evaporative heat flow, sweat rate, limit time of exposition). Whenever possible a paired comparison of the predictions of the two methods used was made using the statistical tools arithmetic mean of the relative differences, standard deviation of the relative differences, mean square deviation and Pearson's coefficient. Although the values predicted by the two methods always point in the same direction, there are differences that may be significant.

It was possible to conclude that in terms of thermal stress felt by workers, the glass industry is much more problematic than the ceramic industry. The first one is where very critical jobs are. If workers' exposure is prolonged or not exist adequate recovery periods, it can lead the human body to thermal levels with potential to cause severe damage.

Keywords: Hot Thermal Environments, Huthereg, Ceramic Industry, Glass Industry, PHS

Índice

Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Estado de Arte	2
1.3. Objetivos	3
2. CONDIÇÕES DE TRABALHO NAS INDÚSTRIAS CERÂMICA E VIDREIRA ...	4
2.1. Indústria Cerâmica.....	5
2.2. Indústria Vidreira.....	7
3. FERRAMENTAS DE PREVISÃO.....	10
3.1. Modelo PHS de Avaliação de Stress Térmico	10
3.1.1. Balanço térmico do corpo-humano.....	12
3.1.2. Evaporação, sudação e humedecimento da pele requeridos	14
3.1.3. Previsão da taxa de sudação e da temperatura retal.....	15
3.2. Simulação do Comportamento Termofisiológico do Corpo Humano.....	15
3.3. Comparação entre as Previsões dos Dois Modelos	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. Indústria Cerâmica.....	20
4.1.1. Situações com maior e menor potencial de stress térmico	22
4.1.2. Análise comparativa	28
4.2. Indústria Vidreira.....	31
4.2.1. Situações extremas em termos de temperatura e humidade.....	32
4.2.2. Análise comparativa	38
5. CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele no caso C11	23
Figura 4.2 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto C11 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.	24
Figura 4.3 Evolução da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas pelos dois métodos para o caso C11.	25
Figura 4.4 Evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele no caso C15	26
Figura 4.5 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto C15 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.	27
Figura 4.6 Evolução da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas pelos dois métodos para o caso C15.	28
Figura 4.7 Posto de trabalho V07 – evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele.	33
Figura 4.8 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto V07 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.	34
Figura 4.9 Posto de trabalho V07 – evolução temporal da previsão da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas por ambos os métodos.	35
Figura 4.10 Posto de trabalho V14 – evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele.	36
Figura 4.11 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto V14 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.	37
Figura 4.12 Posto de trabalho V14 – evolução temporal da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas por ambos os métodos.	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Condições térmicas e físicas dos postos de trabalho da indústria cerâmica. Fora dos limites do modelo PHS por: (d) diferença de entre a temperatura média radiante e a do ar ($T_{mr} - T_a$) insuficiente.	6
Tabela 2.2 Condições térmicas e físicas dos postos de trabalho da indústria vidreira. Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente excessiva.	8
Tabela 3.1 Gama de valores em que o modelo PHS é válido [ISO 7933, 2004].	11
Tabela 3.2 Valores máximos dos critérios de seleção para o cálculo do tempo de exposição admissível considerados pelo modelo PHS [ISO 7933, 2004].	12
Tabela 4.1 Postos de trabalho da indústria cerâmica - valores de RT_{re} e RT_{hip} dos trabalhadores após uma exposição de 4 horas seguidas. Fora da validade do modelo PHS por: (d) diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente insuficiente.	21
Tabela 4.2 Análise comparativa para os valores da temperatura rectal e taxa de evaporação prevista para os postos de trabalho da indústria cerâmica. Fora da validade do PHS por: (d) diferença insuficiente entre temperatura média radiante e a do ar ambiente	30
Tabela 4.3 Postos de trabalho da indústria vidreira - valores de RT_{re} e RT_{hip} dos trabalhadores após uma exposição de 4 horas seguidas. Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença excessiva entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar ambiente.	31
Tabela 4.4 Análise comparativa para os valores da temperatura rectal e taxa de evaporação prevista para os postos de trabalho da indústria vidreira Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença excessiva entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar ambiente.	39

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Símbolo	Significado	Unidades
A_{du}	Área da superfície corporal de Dubois	m^2
C	Troca de calor por convecção	W/m^2
c_e	Calor latente da evaporação da água	$J/kg.^{\circ}C$
c_p	Calor específico do ar a pressão constante	$J/kg.^{\circ}C$
C_{res}	Troca de calor por convecção na respiração	W/m^2
D_{max}	Limite máximo para a perda de água no organismo	W/m^2
dS_{req}	Variação do calor armazenado no corpo humano	W/m^2
DQM	Desvio quadrático médio	--
E	Troca de calor por evaporação	W/m^2
E_{max}	Débito evaporativo máximo	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 da área do vestuário	--
h_{cdyn}	Coefficiente global de transferência de calor por convecção entre o vestuário e o ar envolvente	$W/(m^2.^{\circ}C)$
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície exterior do vestuário e as superfícies envolventes	$W/(m^2.^{\circ}C)$
HR	Humidade relativa	%
I	Isolamento térmico global do vestuário $1clo=0,155m^2.^{\circ}C/W$	clo
K	Troca de calor por condução	W/m^2
M	Taxa metabólica de produção de calor $1met=58,15 W/m^2$	met
p_a	Pressão parcial de vapor de água	kPa

p_s	Pressão de saturação de vapor de água à temperatura ambiente	kPa
$p_{sk,s}$	Pressão de saturação parcial de vapor de água à temperatura da pele	kPa
R	Troca de calor por radiação	W/m ²
r	Coefficiente de Pearson	--
r_{req}	Eficiência do processo de evaporação requerida	--
R_{tdyn}	Resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e a pele	m ² .kPa/W
S	Calor armazenado no corpo	W/m ²
$S_{w,max}$	Taxa de sudação máxima	W/m ²
T_a	Temperatura do ar ambiente	°C
T_{ex}	Temperatura do ar expirado	°C
T_g	Temperatura do globo	°C
T_{mr}	Temperatura média radiante	°C
T_{sk}	Temperatura média da pele	°C
V	Caudal mássico do ar da respiração	L/min
W	Trabalho mecânico externo	W/m ²
W_a	Humidade absoluta do ar inspirado	kg _{água} /kg _{ar seco}
W_{ex}	Humidade absoluta do ar expirado	kg _{água} /kg _{ar seco}
W_{req}	Humedecimento cutâneo requerido	--
x_i	Valores previstos pelo PHS	--
x	Média aritmética dos valores previstos pelo PHS	--
y_i	Valores previstos pelo Huthereg	--
y	Média aritmética dos valores previstos pelo Huthereg	--
δ	Média das diferenças relativas entre valores previstos	--
φ	Humidade relativa	--
σ	Desvio padrão das diferenças relativas entre valores previstos	--

Siglas

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

NASA - National Aeronautics and Space Administrations

PHS – Índice de stress térmico

UC - Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O corpo humano apresenta três situações em relação ao ambiente térmico que o rodeia, sendo estas o conforto, o desconforto e o stress térmico. Na primeira situação ocorre um equilíbrio térmico entre o corpo de um indivíduo e o ambiente que o rodeia, não sendo necessários mecanismos para o alterar, ou seja, o sujeito não sente nem “frio nem calor”. No caso do desconforto térmico, tal como no nome indica, a pessoa tem uma sensação de incómodo em relação ao ambiente que a rodeia. Isto pode ser provocado, por exemplo, por correntes de ar, assimetria radiativa, diferença vertical da temperatura, etc. Na última situação, stress térmico, o corpo necessita de dissipar ou produzir calor para manter um estado de equilíbrio térmico.

O corpo humano tem uma capacidade de responder quer às solicitações do ambiente térmico exterior quer quando realiza atividade física, conservando a sua temperatura corporal e, conseqüentemente, mantendo as reações químicas orgânicas normalizadas no seu interior. Esta capacidade de responder às solicitações chama-se de termorregulação do corpo humano. Para esta termorregulação ocorrer e para o corpo poder ter um balanço nulo, ou seja, para a temperatura se manter constante, terá de ser capaz de dissipar energia calorífica e/ou criar energia. Quando se verifica um aumento da temperatura exterior, dá-se a vasodilatação e ocorre a transpiração, libertando, assim, calor do interior do corpo. Quando a temperatura exterior diminui, dá-se a vasoconstrição e as tremuras musculares aumentando, assim, a geração de calor. Os mecanismos de regulação do corpo humano dissipam calor através da pele e da respiração. Pela pele há duas perdas, a sensível por radiação e convecção e a latente por evaporação do suor e pela humidade da pele, chamada também de perspiração. Pela respiração existe também uma dissipação de energia calorífica sensível e latente, sendo estas, a convecção e a evaporação, respetivamente.

No caso do corpo humano, ocorre termorregulação normal quando se verifica a temperatura do hipotálamo a $34^{\circ}\text{C} < T_{hip} < 39^{\circ}\text{C}$. Por sua vez, quando esta temperatura está acima ou abaixo dos valores anteriores, existe probabilidade de ocorrerem fenómenos

adversos que podem por em risco a segurança e a saúde das pessoas. Quando a temperatura no hipotálamo é maior que 39°C e o corpo humano encontra-se em hipertermia moderada, existindo grande probabilidade de a pessoa entrar em introversão (caracterizada por desorientação, incapacidade para pensar corretamente e transpiração violenta). Quando T_{hip} apresenta um valor superior a 41°C o corpo humano encontra-se em hipertermia intensa, havendo uma grande probabilidade de ocorrer um “golpe de calor” ou “heat stroke” (a pessoa desmaia e deixa de transpirar, ficando o corpo humano sem capacidade para se autorregular). Quando T_{hip} é superior a 42°C podem ocorrer danos cerebrais permanentes e se ultrapassar os 44°C a morte está eminente [Raimundo e Figueiredo, 2009].

1.2. Estado de Arte

A ciência tem provado ao longo dos anos que exposições a condições térmicas extremas têm um impacto negativo na segurança e na saúde das pessoas [Oliveira *et al.*, 2015]. Uma longa exposição a ambientes térmicos quentes pode levar a sérias consequências fisiológicas no corpo humano, comprometendo o seu sistema de termorregulação. Em particular, o indivíduo pode experimentar situações de stress térmico responsáveis por patologias graves, incluindo a morte [Rodrigues *et al.*, 2016].

Na indústria vidreira, tal como na indústria cerâmica existem um conjunto de equipamentos que podem operar a elevadas temperaturas, cujas perdas de calor levam as temperaturas dos postos de trabalho para níveis muito elevados, criando assim condições muito desfavoráveis para os trabalhadores. É então possível a ocorrência de stress térmico, que pode levar a várias patologias como: exaustão por calor por desidratação; câibras; desmaios e insolações. A produtividade nestas indústrias pode ser também afetada devido a esta problemática [Rodrigues *et al.*, 2016].

Ao longo dos tempos têm sido feitos, globalmente, vários estudos sobre os climas quentes de vários tipos de indústrias e a exposição dos trabalhadores a níveis elevados de calor, concluindo que esta tem impacto não só na saúde, mas também, na eficiência e produtividade dos trabalhadores [Pourmahabadian *et al.*, 2008; Potdar *et al.*, 2016].

Vários estudos indicam que os trabalhadores sujeitos a exposições críticas de temperaturas deveriam realizar pausas entre o seu turno prolongado protegendo, assim, o seu

corpo do aumento elevado da sua temperatura corporal interior [Parikh *et al*, 1978; Abeyssekera, 1981].

Em Portugal, estas indústrias têm muita importância para a economia do país, sendo, por isso, muito relevante o estudo deste tipo de temática não só pela segurança, saúde e bem-estar dos trabalhadores, mas também pela saúde financeira das empresas que podem ser afetadas.

1.3. Objetivos

Os objetivos deste trabalho visam analisar o potencial de stress térmico para os trabalhadores das indústrias cerâmica e vidreira. Para o efeito serão analisados os postos de trabalho mais críticos destas indústrias, recorrendo para o efeito a dois métodos distintos, sendo um deles o modelo PHS da norma ISO 7933-2004 e o outro um programa de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano (designado Huthereg). Adicionalmente, recorrer-se-á a ferramentas estatísticas para comparar entre si os valores previstos por cada um destes métodos.

2. CONDIÇÕES DE TRABALHO NAS INDÚSTRIAS CERÂMICA E VIDREIRA

Muitos trabalhadores das indústrias cerâmica e vidreira estão frequentemente sujeitos a altas temperaturas, dependendo do seu posto de trabalho. Uma exposição prolongada a ambientes muito quentes pode levar ao aumento da temperatura profunda no corpo humano, dando origem assim a uma situação de stress térmico. Este, segundo a Organização Mundial de Saúde, define-se como a quantidade de calor que tem de ser dissipada para o corpo se manter em equilíbrio térmico [WHO, 1969]. Quando a temperatura profunda do corpo sobe a níveis superiores a 39°C pode levar a patologias graves e até mesmo à morte [Raimundo e Figueiredo, 2009].

O balanço do corpo humano depende de vários fatores relacionados com a sua capacidade de dissipar, de produzir e de armazenar calor. Quando o indivíduo se encontra aclimatado, isto é, adaptado ao clima, tem então uma maior capacidade de enfrentar as dificuldades encontradas com a envolvente exterior.

A informação sobre os postos de trabalhos analisados nesta dissertação foi retirada de artigos e dissertações anteriores, nomeadamente de Oliveira *et al.* [2015], Rodrigues [2015], Rodrigues *et al.* [2016] e de Torres [2016]. Por se considerar pouco realista uma exposição contínua de 8 horas, neste trabalho optou-se por considerar que o tempo máximo de exposição de cada trabalhador é de apenas 4 horas. Os postos de trabalho analisados foram todos para um típico trabalhador português com 1,70 m de altura e 70 kg de peso. Em todos os postos, o trabalhador encontra-se aclimatizado, a sua posição de trabalho é em pé e existe uma boa reposição de água, com o trabalhador a ingerir uma quantidade de água equivalente à que perde. Como a velocidade do ar não foi medida em todos os casos, optou-se por considerar 0,5 m.s⁻¹, que corresponde a um valor próximo do médio das situações em que foi medida (0,49 m.s⁻¹).

Os dados finalizados, para a introdução no modelo PHS e *software* Huthereg, serão expostos nas seguintes subsecções.

Nas avaliações efetuadas nos postos de trabalho das indústrias consideradas neste trabalho (cerâmica e vidreira), foram medidas várias variáveis, mas não foram medidas a temperatura média radiante (T_{mr}) e a humidade relativa (HR). Ora, necessitamos do valor destas duas variáveis para os introduzir como dados quando do uso do *software* Huthereg [Abreu, 2013; Pereira, 2014]. No entanto, foram medidas variáveis que podem ser utilizadas para determinar os valores das duas anteriores.

A temperatura média radiante pode ser determinada a partir do conhecimento da temperatura de globo (T_g) e da temperatura do ar ambiente (T_a). Estas variáveis são relacionadas através da fórmula número 9 da norma ISO 7726:1998:

$$T_{mr} = \left[(T_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times T_g^{0.6} (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.1)$$

Também a humidade relativa teve de ser calculada. Sabendo a pressão parcial de vapor de água e sabendo a pressão de vapor de água no estado de saturação a uma determinada temperatura ambiente calcula-se assim pela divisão entre ambas:

$$HR = \frac{p_a}{p_s} \quad (2.2)$$

2.1. Indústria Cerâmica

O caso de estudo sobre a indústria cerâmica tem um conjunto de parâmetros sobre 21 postos de trabalho. Na Tabela 2.1 apresentam-se as condições térmicas e físicas existentes em cada um dos postos de trabalho. Estes são o metabolismo do trabalhador (M), o isolamento do vestuário (I_{cl}), a temperatura do ar ambiente (T_a), a temperatura do globo (T_g), a pressão parcial de vapor (p_a) e a humidade relativa (HR).

Tabela 2.1 Condições térmicas e físicas dos postos de trabalho da indústria cerâmica. Fora dos limites do modelo PHS por: (d) diferença de entre a temperatura média radiante e a do ar ($T_{mr} - T_a$) insuficiente.

Posto de trabalho	<i>M</i> (W)	<i>I_{cl}</i> (clo)	<i>T_a</i> (°C)	<i>T_g</i> (°C)	<i>T_{mr}</i> (°C)	<i>p_a</i> kPa	<i>HR</i> (%)
C01	297	0,90	29,0	35,7	44,7	1,2 t	30,0
C02	297	0,90	34,9	35,8	37,1	2,0	35,3
C03	180	0,65	34,5	37,1	40,6	2,3	41,6
C04	180	0,65	36,2	52,3	70,1	1,4	23,7
C05	239	0,60	27,8	34,1	42,7	1,3	33,8
C06	297	0,65	39,3	63,0	86,2	1,2	16,8
C07	239	1,00	37,8	41,8	47,0	1,3	19,4
C08	180	0,90	29,9	44,8	62,4	1,1	25,9
C09	273	0,65	41,3	42,1	43,1	1,4	18,1
C10	224	0,65	37,3	39,5	42,4	2,1	32,5
C11	310	0,41	41,6	43,0	44,8	1,7	21,0
C12	235	0,41	30,6	30,9	31,3	1,8	40,7
C13	280	0,41	30,6	31,0	31,6	2,2	49,7
C14	310	0,60	27,6	28,3	29,3	2,2	59,5
C15	338	0,60	25,7	26,6	28,0	1,7	51,0
C16^d	407	0,61	34,2	33,7	33,0	2,7	49,5
C17	407	0,60	33,1	36,4	40,9	2,1	41,2
C18	355	0,60	32,0	34,7	38,5	2,1	44,3
C19	400	0,60	32,3	33,1	34,2	2,1	43,5
C20	254	0,60	31,6	38,3	47,1	1,4	29,8
C21	254	0,60	37,1	45,2	55,1	1,4	22,0

Pela análise da Tabela 2.1, observa-se que em vários postos de trabalho os indivíduos estão sujeitos a atividades físicas muito elevadas (C16^d, C17, C19), elevadas (C01, C02, C06, C11, C14, C15, C18), moderadas (C05, C07, C09, C10, C12, C13, C20, C21) e baixas (C03, C04, C08). Verifica-se também que a temperatura ambiente é, normalmente, bastante alta, provocando um desgaste mais rápido ao trabalhador. O

isolamento do vestuário, excetuando quatro dos casos, é, normalmente, cerca de 0.6 clo ou menos, o que indica que o trabalhador se encontra frequentemente de calças, botas e camisola. A humidade relativa é também um parâmetro importante na regulação do conforto do corpo humano. Elevada humidade relativa dificulta a evaporação do suor, sendo, portanto, menor a perda de calor por evaporação. Contudo, pela verificação da humidade relativa de cada um dos postos de trabalho, esta não é muito elevada.

O caso C16^d encontra-se fora dos limites de validade do PHS com uma diferença entre temperatura média radiante e a do ar interior negativa, ou seja, inferior a 0°C.

O posto C06 apresenta a maior diferença entre a temperatura média radiante e de ar ambiente estando perto do limite máximo permitido pelo PHS, que é de 60°C.

Os postos de trabalho C16, C17 e C19 indicam um nível de atividade (M) muito elevado, encontrando-se também próximos do limite máximo permitido pelo PHS para este parâmetro, que é de 450 W.

Por tudo isto será interessante, também, uma análise à evolução temporal da temperatura do hipotálamo, retal e da pele, percebendo, assim, quais os riscos que os trabalhadores estão sujeitos em diferentes condições.

2.2. Indústria Vidreira

Na Tabela 2.2. estão indicados os parâmetros ambientais e individuais encontrados em 19 postos de trabalho da indústria vidreira. Os parâmetros individuais (do trabalhador) apresentados são o metabolismo (M), o isolamento do vestuário (I_{cl}). Os parâmetros ambientais são: a temperatura do ar ambiente (T_a); a temperatura de globo (T_g); a pressão parcial de vapor de água (p_a) e a humidade relativa do ar (HR).

Vários postos de trabalho encontram parâmetros fora dos limites do modelo PHS por excesso, entre os quais: a temperatura do ar ambiente (a) a pressão parcial de vapor (b) e a diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente (c).

Tabela 2.2 Condições térmicas e físicas dos postos de trabalho da indústria vidreira. Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente excessiva.

Posto de trabalho	<i>M</i> (W)	<i>I_{cl}</i> (clo)	<i>T_a</i> (°C)	<i>T_g</i> (°C)	<i>T_{mr}</i> (°C)	<i>p_a</i> (kPa)	<i>HR</i> (%)
V01^c	297	0,6	29,1	64,7	97,7	0,441	10,9
V02	239	0,6	32,1	51,0	71,8	0,796	16,6
V03^a	239	0,6	60,2	63,0	66,0	0,734	3,6
V04^a	239	0,6	61,1	83,3	102,0	1,170	5,6
V05	297	0,6	37,5	59,4	81,7	1,127	17,5
V06	268	0,6	24,4	26,8	30,4	1,368	44,7
V07	268	0,6	39,1	51,6	65,7	1,367	19,4
V08	414	0,6	25,0	30,4	38,1	1,474	46,5
V09	220	0,7	33,9	62,5	90,1	0,436	8,2
V10	220	0,7	31,8	40,4	51,3	1,276	27,1
V11^b	226	0,7	41,0	51,2	62,9	5,661	72,7
V12	165	0,5	32,7	38,7	46,6	2,357	47,6
V13	100	0,5	31,0	40,3	52,1	2,464	54,8
V14	165	0,6	28,2	32,0	37,4	3,158	82,5
V15^b	230	0,6	34,8	38,2	42,8	5,12	92,0
V16	165	0,6	29,6	37,3	47,4	2,365	57,0
V17	165	0,5	28,7	33,3	39,7	2,611	66,3
V18^b	100	0,5	37,2	39,9	43,5	5,902	92,9
V19	100	0,6	33,7	37,4	42,4	3,819	72,9

Pela observação da Tabela 2.2, verifica-se que nos postos de trabalho, V03^a e V04^a, a temperatura do ar ambiente é muito mais elevada que nos outros ($T_a > 60^\circ\text{C}$). Ora isto acarreta um esforço enorme no trabalhador que poderá vir a ter problemas graves de saúde se o seu tempo de trabalho for mais longo que o recomendado para estas condições. Verifica-se também que a humidade relativa, nestes dois postos de trabalho, é bastante baixa,

o que por sua vez é favorável para o trabalhador desde que ingira água suficiente para se manter convenientemente hidratado. Nestes dois casos (V03^a, V04^a), pela norma PHS, os valores da temperatura não se encontram entre a gama de validade deste modelo ($0 < T_a < 50^\circ\text{C}$). Outro caso (V01^c) apresenta uma diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente excessiva ($0 < T_{mr} - T_a < 50^\circ\text{C}$) estando fora da validade do PHS. O caso V09 apresenta também uma diferença perto deste limite. Para além destes casos e pela leitura dos valores da humidade relativa percebe-se que, em algumas situações, é muito elevado, sendo em alguns acima dos 90%. Como é conhecido, humidade muito alta afeta a capacidade da evaporação do suor na pessoa o que poderá ser um problema para a dissipação de calor. Devido à pressão parcial de vapor de água, alguns postos de trabalho (V11^b, V15^b, V18^b), também, se encontram fora da gama dos valores validados do PHS ($0 < p_a < 4.5 \text{ kPa}$). Para além destes aspetos, realça-se, também, o isolamento do vestuário, que é normalmente de 0,6 clo, tal como na indústria cerâmica. Pelo estudo dos valores do metabolismo, nota-se que o trabalhador está normalmente a efetuar trabalho moderado ($2 < M < 2.8 \text{ met}$). Em dois casos, o metabolismo é de $55,3 \text{ W/m}^2$, o que indica uma atividade física baixa ou de descanso.

3. FERRAMENTAS DE PREVISÃO

Para realização do presente estudo recorreu-se a dois métodos distintos: o modelo PHS da norma ISO 7933-2004 e o programa Huthereg de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano.

3.1. Modelo PHS de Avaliação de Stress Térmico

Existem vários modelos de avaliação de stress térmico que podem ser usados, sendo o PHS da norma ISO 7933:2004 um dos mais usados e detalhados.

Esta norma internacional especifica um método para analisar e interpretar a evolução do stress térmico que afeta as pessoas expostas a ambientes quentes.

A informação que é necessário fornecer ao modelo PHS para que ele possa realizar previsões pode ser dividida em duas classes: os parâmetros individuais e os ambientais. Os individuais dizem respeito à pessoa e incluem a sua altura, o seu peso, o seu nível de atividade física e as características do seu vestuário. Os parâmetros ambientais são a temperatura do ar, a pressão parcial de vapor de água, a velocidade do ar e a temperatura de globo ou a temperatura média radiante.

O calor produzido no corpo é determinado pelo nível de atividade da pessoa, sendo, também, variável com a idade, o género, o índice de massa corporal e o nível de preparação física. Para além da geração deste calor metabólico, pode existir produção de calor por tremuras musculares. Existem ainda trocas de calor entre o indivíduo e o exterior, as quais podem ocorrer por condução, por convecção, por radiação e por evaporação. A condução não assume geralmente grande relevância. A convecção depende da temperatura e da velocidade do ar. A radiação depende da temperatura média radiante da envolvente e a evaporação depende da humidade do ar e da sua velocidade [Águas, 2001].

Para ser válido, os dados de entrada do modelo PHS têm de se encontrar dentro de valores limites, os quais se encontram presentes na Tabela 3.1. A Tabela 3.1 apresenta os valores máximos e mínimos para a temperatura do ar ambiente (T_a), para a pressão parcial de vapor de água (p_a), para a diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente

$(T_{mr} - T_a)$, para a velocidade do ar (v_a), para o metabolismo do indivíduo (M) e para o isolamento do seu vestuário (I_{cl}).

Tabela 3.1 Gama de valores em que o modelo PHS é válido [ISO 7933, 2004].

Parâmetros	Unidades	Mínimo	Máximo
T_a	°C	15	50
p_a	kPa	0	4.5
$T_{mr} - T_a$	°C	0	60
v_a	m/s	0	3
M	W	100	450
I	clo	0,1	1,0

Os dados de saída apresentados por esta norma são vários, entre os quais: a temperatura retal; a taxa de sudção e de evaporação e o humedecimento cutâneo previsto, requerido e máximo; a perda total de água acumulada por sudção e respiração; o tempo máximo admissível de exposição para que a temperatura retal não ultrapasse 38°C; o tempo máximo admissível para perda de água de modo a que sejam protegidos 50% dos trabalhadores e o tempo máximo admissível para perda de água de modo a que seja protegida 95% da população trabalhadora [Malchaire, 2006].

A interpretação destes valores calculados é baseada em quatro critérios, dois de stress e dois de tensão [Malchaire, 2017]. Os critérios de stress dependem do humedecimento cutâneo da pele máximo e requerido. Este último não pode exceder o primeiro. Outro critério indica que a taxa de sudção requerida não pode exceder a máxima. Os critérios de tensão são baseados na temperatura retal máxima, em que o aumento do valor da temperatura retal deve ser limitado, para no caso de existir um desequilíbrio do balanço térmico, diminuam a probabilidade de ocorrer efeitos patológicos nocivos. O outro baseia-se na perda máxima de água, em que esta é restringida a um valor máximo, compatível com a manutenção do equilíbrio hidromineral do corpo, independentemente de se verificar ou não a existência de equilíbrio térmico. A Tabela 3.2, resume os valores limites indicados, para o humedecimento cutâneo máximo, taxa de sudção, desidratação e perda de água e temperatura retal considerados pelo modelo PHS [ISO 7933, 2004].

Tabela 3.2 Valores máximos dos critérios de seleção para o cálculo do tempo de exposição admissível considerados pelo modelo PHS [ISO 7933, 2004].

	Indivíduo aclimatado	Indivíduo não aclimatado
Humedecimento cutâneo máximo w_{max} (adm)	0,85	1,0
Taxa de sudação máxima Sw_{max} (W/m ²)	$(M - 32) \times A_{du}$	$1,25 (M - 32) \times A_{du}$
Desidratação máxima e Perda de água D_{max50} (% de massa corporal) D_{max95} (% de massa corporal)	$7,5 \times$ massa corporal $5 \times$ massa corporal	$7,5 \times$ massa corporal $5 \times$ massa corporal
Limite máximo de temperatura retal $T_{re,max}$ (°C)	38	38

3.1.1. Balanço térmico do corpo-humano

A equação do balanço térmico do corpo-humano é dada por:

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad (3.1)$$

O significado desta equação é que a diferença entre a taxa metabólica (M) e o trabalho externo (W) é igual à soma das restantes trocas de calor, tal como a respiração por convecção (C_{res}) e evaporação (E_{res}), as trocas de calor na pele por condução (K), convecção (C), radiação (R) e evaporação (E) e o calor acumulado no corpo humano (S).

A taxa metabólica é dependente do nível de atividade física exercida e o trabalho mecânico exterior, em maior parte das situações industriais é mínimo e, por isso, é normalmente desprezável.

A troca de calor na respiração por calor sensível pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$C_{res} = 0,072 \times c_p \times V \times \frac{T_{ex} - T_a}{A_{du}} \quad (3.2)$$

Em que (c_p) representa o calor específico do ar seco a pressão constante, (V) o caudal volúmico da respiração, (T_{ex}) a temperatura do ar expirado e (T_a) a temperatura ambiente e (A_{du}) a área superficial do corpo humano.

A equação para calcular a troca de calor latente na respiração será:

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

Em que (c_e) representa o calor latente da água a pressão constante, (W_{ex}) é a humidade absoluta do ar expirado e (W_a) é a humidade absoluta do ar ambiente (inspirado).

A troca de calor por condução pode ser similar à perda por convecção e radiação que aconteceria se estas não estivessem em contacto com nenhuma superfície sólida, por isso este valor da troca de calor por condução é substituída por uma troca de calor por convecção e radiação combinadas.

Na superfície da pele, a troca de calor por convecção pode ser expressa em:

$$C = h_{cdyn} \times f_{cl} \times (T_{sk} - T_a) \quad (3.4)$$

Onde (h_{cdyn}) é o coeficiente de transferência de calor entre o vestuário e a envolvente, (f_{cl}) é o fator de área do vestuário e (T_{sk}) é a temperatura média da pele.

A troca de calor entre o vestuário e o ambiente envolvido é chamado por troca de calor por radiação e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$R = h_r \times f_{cl} \times (T_{sk} - T_{mr}) \quad (3.5)$$

Onde (h_r) representa o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vestuário e a envolvente e (T_{mr}) é a temperatura média radiante.

Se a superfície da pele estiver completamente humedecida, a troca de calor por evaporação máxima (E_{max}) traduz-se na divisão da diferença entre a pressão de saturação de vapor de água na superfície da pele ($p_{sk,s}$) e a pressão parcial de vapor de água (p_a) pela resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e o vestuário (R_{ldyn}).

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - pa}{R_{tdyn}} \quad (3.6)$$

Se a superfície da pele se encontrar apenas parcialmente humedecida, a troca de calor por evaporação é calculada pelo produto de humedecimento cutâneo (w), isto é a fração equivalente da pele humedecida e a transferência de calor máxima por evaporação.

O armazenamento de calor é calculado pela soma dos valores anteriormente apresentados.

3.1.2. Evaporação, sudação e humedecimento da pele requeridos

A equação do balanço térmico pode ser reescrita para:

$$E + S = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R \quad (3.7)$$

Quando a calor armazenado (S) for nulo, sabe-se que o corpo humano se encontra em equilíbrio térmico e, portanto, a partir daqui calcula-se a taxa de evaporação requerida (E_{req}) para manter o corpo em equilíbrio térmico

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - dS_{req} \quad (3.8)$$

Onde (dS_{req}) representa o armazenamento de calor acumulado. A partir deste valor de evaporação requerida é possível calcular os outros valores, quer do humedecimento de pele requerido (w_{req}), quer da taxa de suor requerida (S_{req}):

$$w_{req} = \frac{E_{req}}{E_{max}} \quad (3.9)$$

$$S_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}} \quad (3.10)$$

Em que (r_{req}) representa a eficiência da evaporação requerida.

3.1.3. Previsão da taxa de sudação e da temperatura retal

O cálculo das trocas de calor no tempo, t_i , são calculadas consoante as condições existentes no corpo no instante anterior t_{i-1} e em função das condições do ambiente exterior e das condições metabólicas verificadas durante o intervalo que separa estes dois instantes.

Primeiro são calculadas as taxas requeridas da sudação, evaporação e do humedecimento da pele. Depois as taxas previstas, com base nas limitações máximas do humedecimento da pele e da taxa de sudação e também da resposta exponencial do sistema de sudação. Depois a taxa de calor armazenado é calculada pela diferença entre a evaporação requerida e prevista, o que leva a um aumento da temperatura corporal. Segue-se o cálculo da temperatura retal e, por fim, o dos tempos máximos de exposição.

3.2. Simulação do Comportamento Termofisiológico do Corpo Humano

A simulação do comportamento termofisiológico do corpo-humano é efetuada recorrendo ao *software* Huthereg [Raimundo, 2016]. Este programa efetua a simulação da resposta térmica transiente de um indivíduo com recurso a um modelo de termorregulação do corpo humano baseado no proposto por Stolwijk para a NASA [Stolwijk, 1971], que se destinava a prever o comportamento termofisiológico dos astronautas [Raimundo e Figueiredo, 2009].

O algoritmo global assenta num cálculo iterativo no interior de cada intervalo de tempo simulado e que, de modo a garantir estabilidade de cálculo, tem de ser suficientemente pequeno. A simulação para cada instante assenta no estado termofisiológico do corpo humano no instante anterior e na modelação de: (i) resposta termofisiológica do corpo humano; (ii) funções respiratória e cardiovascular; (iii) transporte de calor e de vapor de água através do vestuário; (iv) trocas de calor por condução, convecção e radiação e de vapor de água entre a superfície exterior do vestuário (ou da pele) com ambiente e com as superfícies e os elementos da envolvente; (v) quantificação e análise do conforto térmico sentido pela pessoa (vi) modelação de eventual aparecimento de dor e da evolução de lesões na pele (por queimadura térmica); e (vii) detenção de situações de risco (introversão, colapso

térmico ou “heat stroke”, danos cerebrais permanentes e morte) [Abreu, 2013; Pereira, 2014].

Para simular o comportamento termofisiológico de um indivíduo (para já, só do género masculino), o modelo de termorregulação usado pelo programa Huthereg supostamente divide o corpo humano em 22 segmentos: face, escalpe, pescoço, peito, abdómen, parte superior das costas, parte inferior das costas, pélvis, ombro direito, ombro esquerdo, braço direito, braço esquerdo, antebraço direito, antebraço esquerdo, mão direita, mão esquerda, coxa direita, coxa esquerda, perna direita, perna esquerda, pé direito e pé esquerdo. O modelo assume que cada um dos segmentos do corpo é composto por quatro camadas: núcleo (cérebro, vísceras e ossos), músculos, gordura e pele. Existe ainda a circulação sanguínea, formada por um compartimento central, pelas artérias e pelas veias [Raimundo e Figueiredo, 2009; Raimundo *et al.*, 2015].

O modelo proposto por Stolwijk em 1971 tinha 25 nodos (6 segmentos \times 4 camadas + a circulação sanguínea), enquanto que algoritmo base do programa Huthereg tem 89 nodos. Para além disto, implementa um conjunto alargado de melhorias, resultantes de conhecimentos sobre o funcionamento termofisiológico do corpo humano que, entretanto, forem sendo descobertos [Raimundo *et al.*, 2015].

O Programa simula o comportamento termofisiológico do corpo humano por fases. Cada fase é caracterizada por um determinado ambiente térmico, um determinado nível de atividade da pessoa e o uso de determinado vestuário. Para cada fase é necessário preencher o respetivo ficheiro de dados, que se distingue pela sua extensão (p01, p02, etc.). Existe ainda um ficheiro geral (p00) com as características da pessoa (idade, altura, peso, nível de preparação física, batimento cardíaco basal, etc.) e com os dados de controlo da simulação (número de fases, controlo da simulação, controlo de outputs, etc.).

Para cada fase é necessário especificar informação geral sobre como devem ser realizados determinados cálculos térmicos e sobre as características de eventual radiação incidente extra (para além das trocas de calor por radiação infravermelha normais, p. ex. radiação solar, infravermelha dirigida, etc.). Tem de introduzir-se a posição, orientação e nível de atividade da pessoa, e as características dos elementos ingeridos (que o programa assume que ocorre logo no início da fase). Em cada fase é necessário especificar para cada segmento do corpo humano: as características do vestuário (pele nua ou vestida, resistências à passagem de calor e à passagem de vapor de água, emissividade radiativa e peso), as

características do fluido envolvente (ar ou água, temperatura e velocidade relativa face à pessoa) e as características das superfícies da envolvente (representadas apenas pela temperatura média radiante).

Os resultados, mediante estes dados de entrada, aparecem em quatro ficheiros diferentes (com extensões “res”, “tsk”, “grl” e “flx”), cada um com informação diferente e em intervalos de tempo pré-estabelecidos (normalmente de 1 minuto). O ficheiro de extensão “res” apresenta informação geral sobre a evolução do cálculo e sobre o que vai acontecendo ao corpo humano como um todo, e pode ser aberto com um editor de texto normal. Os outros ficheiros são para serem abertos pelo MS Excel para análise detalhada e representação gráfica, o de extensão “tsk” contém as temperaturas na pele (por segmento, e máxima, média e mínima em todo o corpo), o de extensão “grl” contém as temperaturas em camadas interiores de segmentos específicos e apresenta temperaturas globais para o corpo humano e o de extensão “flx” contém os valores globais para todo o corpo dos fluxos de calor sensíveis e latentes (gerados pelo metabolismo basal, gerados por tremuras musculares, perdidos, ganhos, acumulados, etc.).

3.3. Comparação entre as Previsões dos Dois Modelos

Para a comparação, entre si, dos resultados previstos pelos dois programas, utilizam-se ferramentas estatísticas, nomeadamente, a média aritmética das diferenças relativas (δ), o seu desvio padrão (σ), o desvio quadrático médio (DQM) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

Para um conjunto de (n) resultados de simulações e assumindo x_i e y_i os valores dos resultados da simulação do PHS e do programa Huthereg, respetivamente, sendo estes para as mesmas condições. O que significa que são para o mesmo posto de trabalho e para o mesmo tempo de exposição ao calor.

A média aritmética das diferenças relativas é calculada por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (3.11)$$

E que para o caso de o resultado ser positivo, este indica que na globalidade os valores dos resultados da simulação no PHS têm um valor superior aos previstos pelo programa Huthereg e o contrário se estes tiverem um valor negativo.

O desvio padrão (σ) das diferenças relativas (δ) avalia qual a dispersão para as diferenças relativas. A sua fórmula é a seguinte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - y_i) - \delta]^2}{n - 1}} \quad (3.12)$$

Um valor nulo de σ indica que não existe dispersão, ou seja, todas as diferenças têm o mesmo valor. Quando os valores se encontram muito altos, estes indicam uma elevada dispersão.

O desvio quadrático médio é dado por:

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.13)$$

Quanto menor for o desvio quadrático médio, mais próximos se encontram os valores simulados pelos dois programas.

O coeficiente de relação de Pearson varia no intervalo de [-1; 1] e mede qual o grau da correlação entre a evolução de duas variáveis. Valores positivos indicam uma evolução no mesmo sentido e valores negativos uma evolução em sentidos opostos. Se o coeficiente for igual a 1, este indica uma correlação perfeita no sentido positivo entre as duas variáveis (ou seja, aumentam no mesmo sentido e aumentam o mesmo valor). Se o valor for “zero” não existe qualquer correlação entre a evolução das duas variáveis. Se for igual a -1 significa uma correlação negativa perfeita, isto é quando um aumenta, o outro diminui do mesmo valor. O seu valor é calculado pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2] \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.14)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No caso do *software* Huthereg o corpo humano encontra-se dividido em diferentes segmentos. Por isso alguns cálculos têm de ser feitos, pois é necessário conhecer os valores locais, em cada segmento do corpo, do isolamento do vestuário, da eficiência da permeabilidade ao vapor da roupa, da emissividade superficial da roupa ou da superfície da pele, do peso do vestuário e respetivo calor específico. O escalpe, cabeça, pescoço, braços e mãos consideram-se nus, ou seja, não se encontram cobertos com roupa. Por isso mesmo o isolamento do vestuário, o peso e o calor específico, considerado para as partes do corpo nuas, em todas as simulações, foi nulo. Considerou-se que a emissividade da superfície da pele é igual a 0.93, enquanto a coberta de roupa é igual a 0.90 [Raimundo e Figueiredo]. Quanto à eficiência da permeabilidade ao vapor considerou-se máxima para a pele nua, sendo por isso igual a 1. O valor da eficiência da permeabilidade ao vapor dos segmentos vestidos foi de 0.38, a mesma usada no modelo PHS. Esta aproximação do vestuário na simulação pode não estar totalmente real, por exemplo, na utilização de luvas por parte do trabalhador que não foi contabilizada.

Em ambos os programas o início da simulação foi efetuado instantaneamente com uma exposição ao ambiente térmico quente. Ora isto não acontece, pois, o trabalhador, antes do início da exposição, dirige-se para o posto existindo um aumento gradual da taxa metabólica e da temperatura corporal. O *software* Huthereg permite simular esta pré-fase de trabalho, mas o modelo PHS não permite. Logo, como se pretende também comparar entre si as previsões dos dois programas, esta pré-fase de trabalho foi também ignorada nas simulações com o Huthereg.

Para considerar a ingestão regular de água, foi necessário considerar nas simulações com o Huthereg 4 fases iguais, com a duração de 1 hora cada uma de modo a perfazer as 4 horas de duração normal de um período de trabalho.

As simulações no PHS foram feitas de quinze em quinze minutos até ao final do tempo proposto da simulação, que era de quatro horas.

Devido a limitações dos resultados apresentados pelo *output* do PHS, a comparação global foi feita tendo em atenção apenas os valores da temperatura retal e da taxa de evaporação prevista (para os mesmos instantes pelos dois programas).

Todos os postos de trabalho foram avaliados quanto ao seu potencial de stress térmico. Para esse efeito houve necessidade de normalizar os valores da temperatura retal (T_{re}) e da temperatura do hipotálamo (T_{hip}), por recurso às fórmulas.

$$RT_{re} = \frac{T_{re} - T_{re,n}}{T_{re,max} - T_{re,n}} \quad (4.1)$$

$$RT_{hip} = \frac{T_{hip} - T_{hip,n}}{T_{hip,max} - T_{hip,n}} \quad (4.2)$$

onde RT_{re} e RT_{hip} representam o estado térmico do indivíduo, permitindo assim avaliar o risco potencial de cada posto de trabalho.

Optou-se por considerar, para avaliar cada posto de trabalho, que a temperatura retal (T_{re}) será a prevista pelo modelo PHS para o instante final do período de exposição (de 4 horas) e que a temperatura do hipotálamo (T_{hip}) será a determinada pelo programa Huthereg para esse mesmo momento. Na equação (4.1), $T_{re,n}$ representa a temperatura retal em situação de repouso em ambiente térmico neutro ($T_{re,n} = 36,8^{\circ}\text{C}$) e $T_{re,max}$ representa a temperatura rectal acima da qual o modelo PHS considera que existe uma situação de stress térmico ($T_{re,max} = 38,0^{\circ}\text{C}$) [ISO 7933, 2004]. Na equação (4.2), $T_{hip,n}$ representa a temperatura do hipotálamo em situação de repouso em ambiente térmico neutro ($T_{hip,n} = 36,9^{\circ}\text{C}$) e $T_{hip,max}$ representa a temperatura rectal acima da qual se deve considerar que existe uma situação de stress térmico ($T_{hip,max} = 39,0^{\circ}\text{C}$) [Raimundo e Figueiredo, 2009].

Para classificar o nível de stress térmico indicado pelos valores de RT_{re} e de RT_{hip} , optou-se por recorrer à escala utilizada por Oliveira *et al.* [2017], ou seja, o trabalhador encontra-se num estado térmico: ($0 < RT \leq 0,5$) → favorável; ($0,5 < RT \leq 1$) → aceitável; ($1 < RT \leq 2$) → crítico e ($RT > 2$) → muito crítico.

4.1. Indústria Cerâmica

Apresentam-se na Tabela 4.1 os valores normalizados das temperaturas retal e do hipotálamo no momento em que o trabalhador atinge 4 horas de exposição, para os vários postos de trabalho analisados da indústria cerâmica. De relembrar que RT_{re} foi determinado a partir dos valores previstos pelo modelo PHS e que RT_{hip} foi obtido recorrendo às previsões do *software* Huthereg.

Tabela 4.1 Postos de trabalho da indústria cerâmica - valores de RT_{re} e RT_{hip} dos trabalhadores após uma exposição de 4 horas seguidas. Fora da validade do modelo PHS por: (d) diferença entre a temperatura média radiante e a do ar ambiente insuficiente.

Posto de trabalho	RT_{re}	RT_{hip}
C01	0,70	1,12
C02	0,68	1,08
C03	0,42	0,5
C04	0,48	0,96
C05	0,56	0,53
C06	7,38	1,95
C07	0,59	0,89
C08	0,45	0,78
C09	0,72	1,01
C10	0,55	0,77
C11	0,83	1,17
C12	0,52	0,38
C13	0,62	0,58
C14	0,66	0,8
C15	0,71	0,74
C16^d	0,88	1,73
C17	0,94	1,78
C18	0,82	1,35
C19	0,90	1,51
C20	0,64	0,78
C21	0,69	1,04

Dos 21 postos de trabalho da indústria cerâmica analisados, a temperatura retal normalizada (RT_{re}), determinada com base nas previsões do modelo PHS, identifica como muito crítico apenas um posto de trabalho (o C06) e não identifica nenhum como crítico. Classifica como aceitáveis dezassete (C01, C02, C03, C05, C07, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20 e C21) e como favoráveis apenas três casos (C03, C04 e C08).

Dos 21 postos de trabalho da indústria cerâmica analisados, a temperatura do hipotálamo normalizada (RT_{hip}), calculada a partir dos resultados fornecidos pelo programa Huthereg, não identifica nenhum caso como muito crítico, mas apresenta dez casos como críticos (C01, C02, C06, C09, C11, C16^d, C17, C18, C19 e C21), sendo o mais crítico o C06 concordando, em parte, com a previsão do PHS. O valor de RT_{hip} identifica ainda como aceitáveis nove postos de trabalho (C04, C05, C07, C08, C10, C13, C14, C15 e C20) e como favoráveis apenas dois (C03 e C12).

Face ao exposto, é óbvio que, embora não sendo discordantes, os dois métodos nem sempre são concordantes quanto ao grau de criticidade de cada um dos postos de trabalho analisados da indústria cerâmica.

4.1.1. Situações com maior e menor potencial de stress térmico

Recorrendo ao programa Huthereg e ao modelo PHS, foram analisados, pormenorizadamente, dois casos da indústria cerâmica. Verificou-se se concordavam ou não relativamente ao perigo de stress térmico durante a exposição prolongada dos trabalhadores e comparou-se os seus resultados para as previsões da taxa de evaporação e da temperatura retal ao longo do período de exposição. Os postos de trabalho a analisar em pormenor são o C11 e o C15.

4.1.1.1. Posto de trabalho C11 – temperaturas ambientais elevadas

No posto de trabalho C11 a temperatura do ar ambiente e a temperatura média radiante são elevadas, como se pode observar pela Tabela 2.1. Este posto de trabalho é classificado como aceitável recorrendo aos resultados do modelo PHS e como crítico utilizando as previsões do *software* Huthereg. Devido aos resultados discordantes entre os dois programas será, portanto, interessante analisar este caso e verificar se existem problemas termorregulatórios relacionados com a exposição térmica ao longo de 240 minutos.

Na Figura 4.1 está representada a evolução temporal das temperaturas do hipotálamo, retal e máxima da pele. Encontra-se também presente os limites do corpo humano para que ocorram os fenómenos adversos introversão, golpe de calor, morte e dor na pele.

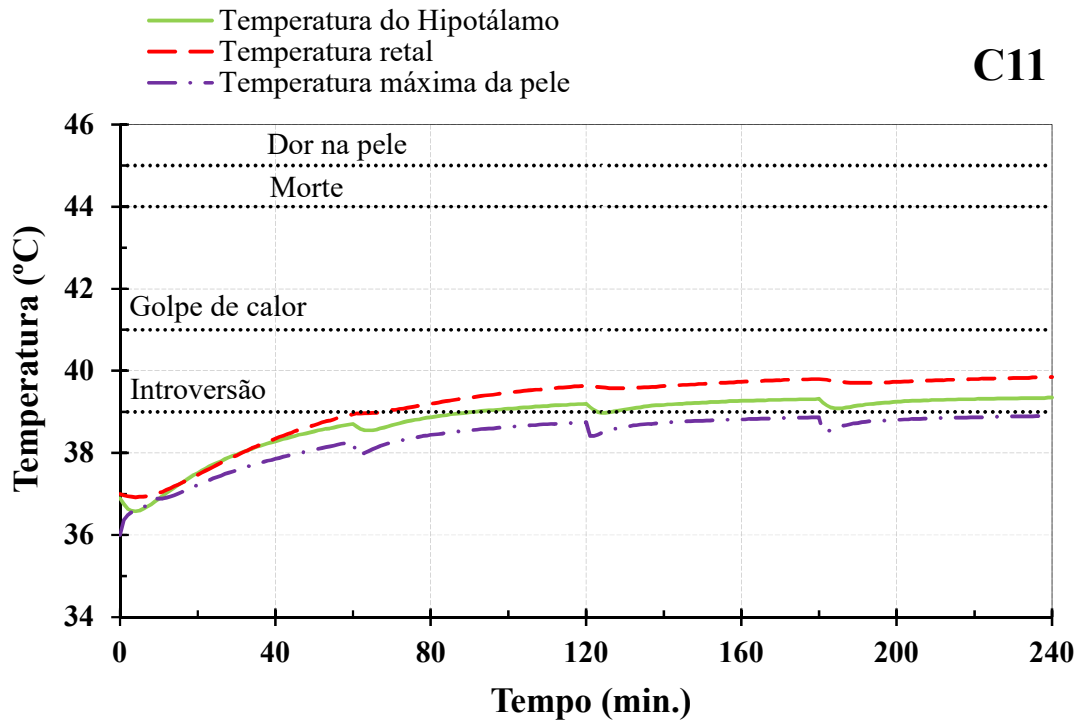


Figura 4.1 Evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas retal, do hipotálamo e máxima da pele no caso C11

Pela análise da Figura 4.1 verifica-se que a temperatura do hipotálamo atinge o valor crítico de 39°C, sugerindo entrada do trabalhador em introversão, perto dos 90 minutos de exposição. Ora atingindo este estado o trabalhador poderá ter consequências psicológicas que afetam a sua eficiência no trabalho. Ora com uma taxa metabólica a rondar 3,2 met o que se significa que o indivíduo está com uma atividade física elevada, e exposto a uma temperatura ambiente maior que 40°C. Seria, assim, esperado que este fosse um posto de risco, mas esta conclusão não se encontra em concordância com os resultados que o modelo PHS fornece. Este indica que a taxa de evaporação e sudação final prevista é igual à requerida, conseguindo, assim, dissipar energia calorífica suficiente para que a temperatura corporal não aumente e não sendo por isso um posto crítico. Isto é demonstrado pela Figura 4.2, onde se encontra presente a taxa de sudação e de evaporação total prevista, requerida e máxima para este posto de trabalho no instante final dos 240 minutos.

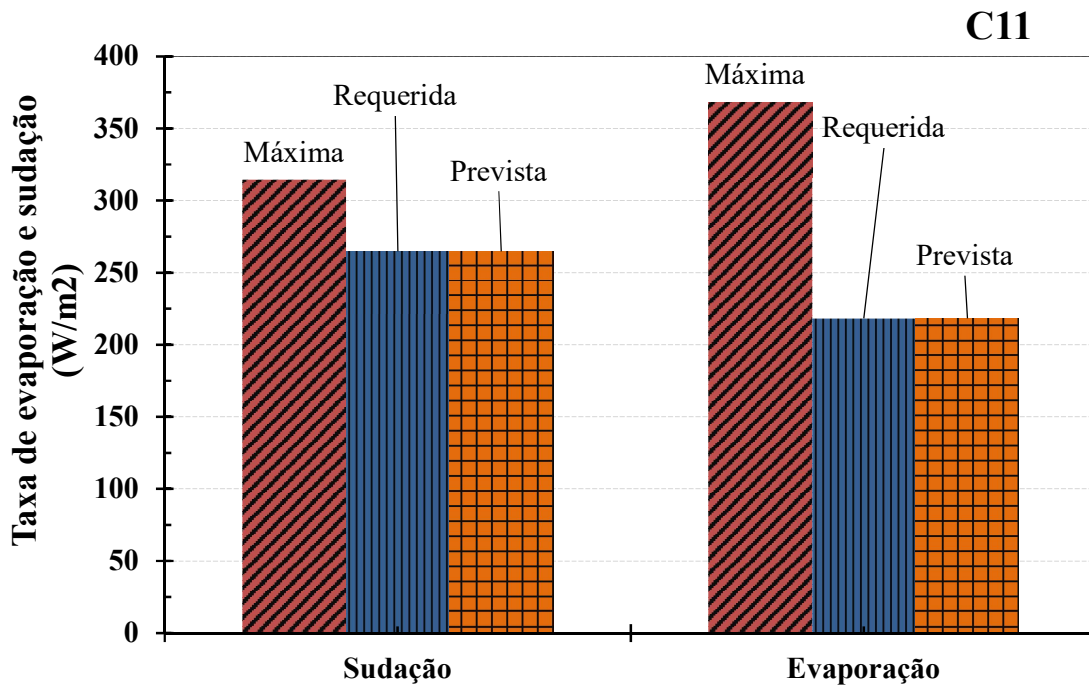


Figura 4.2 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto C11 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.

O modelo PHS previu que, após uma exposição de 240 min, a temperatura retal do trabalhador do posto C11 atinge 37,79 °C. Ora este valor é ligeiramente inferior ao que este modelo indica como limite para o aparecimento de stress térmico (38 °C). Ora isto indica que para o modelo PHS este posto de trabalho é seguro numa exposição total de 240 minutos.

Para este posto de trabalho, apenas um dos modelos concluiu que seria um ambiente crítico com consequências para o trabalhador.

Neste posto de trabalho foi também comparada a evolução da taxa de evaporação e da temperatura rectal previstas por ambos os métodos, a qual se representa graficamente na Figura 4.3.

Pela observação da Figura 4.3 verifica-se que os métodos preveem valores substancialmente diferentes para a temperatura retal, chegando a diferença entre previsões a atingir de cerca de 2°C no instante final da exposição. Ora esta diferença é bastante alta. No modelo PHS a temperatura retal estabiliza num valor entre os 60-70 minutos, enquanto que no Huthereg continua em evolução. Ora uma estabilização da temperatura retal logo por

volta destes minutos não parece correta, pois indica que o corpo não continua a aumentar, significativamente, a sua temperatura interior corporal embora esteja sujeita, neste caso, a um metabolismo elevado e esteja presente a um ambiente térmico bastante quente.

Quanto à taxa de evaporação final prevista, a diferença entre ambas as previsões é mínima, embora a evolução inicial no PHS seja maior que no Huthereg.

Pela análise da Figura 4.3 percebe-se que a taxa de evaporação e a temperatura rectal estão interligadas entre si. Quando a taxa de evaporação aumenta a temperatura rectal também aumenta. Quando a taxa de evaporação estagna, a temperatura rectal mantém-se também.

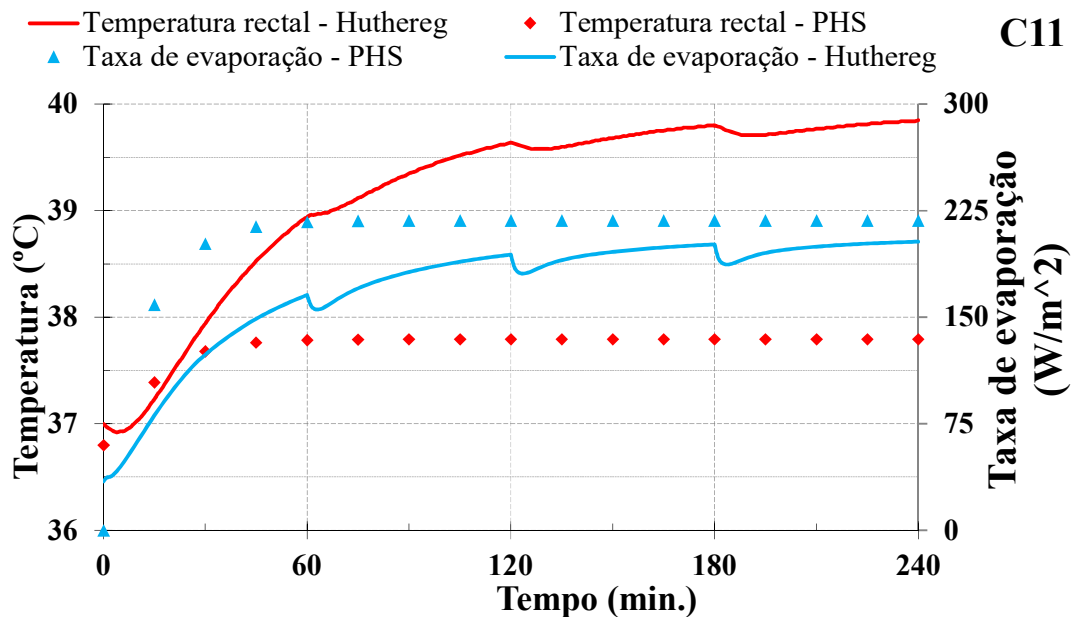


Figura 4.3 Evolução da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas pelos dois métodos para o caso C11.

4.1.1.2. Posto de trabalho C15 – temperaturas ambientais moderadas

No posto de trabalho C15, a temperatura do ar ambiente é a mais baixa das presentes na Tabela 2.1. Este posto de trabalho é classificado como aceitável, quer recorrendo aos resultados do modelo PHS, quer utilizando as previsões do *software* Huthereg. É, portanto, interessante analisar também este caso ao longo de 240 minutos. Na Figura 4.4 apresenta-se a evolução temporal das temperaturas do hipotálamo, retal e máxima da pele previstas recorrendo ao *software* de simulação Huthereg.

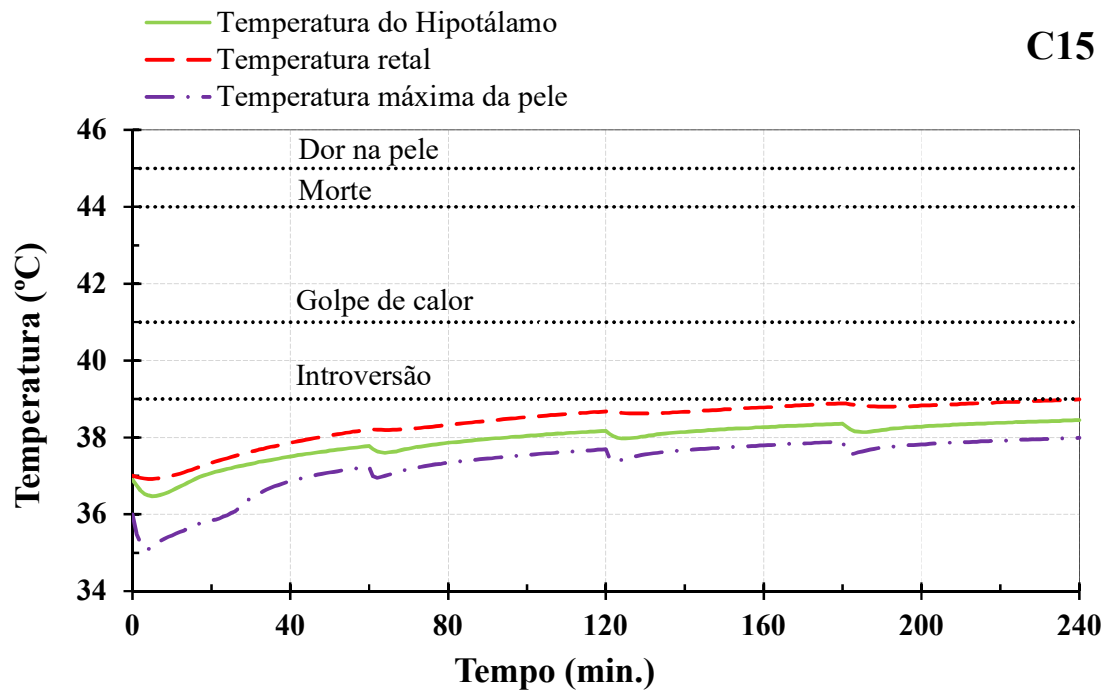


Figura 4.4 Evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas retal, do hipotálamo e máxima da pele no caso C15

Pela análise da Figura 4.4, correspondente ao posto de trabalho C15, verifica-se que a temperatura do hipotálamo ao longo dos 240 minutos não ultrapassa o valor crítico de 39°C, onde ocorre introversão por excesso de calor. Com base nestes resultados, conclui-se que seria possível trabalhar nas condições deste posto de trabalho durante os 240 minutos. Era esperado um resultado deste tipo, pois os valores quer da temperatura ambiente 25.7°C quer da temperatura média radiante 27.4°C não são muito elevados, não pondo em perigo a termorregulação do corpo humano. Esta conclusão encontra-se em concordância com o previsto pelo modelo PHS. Na Figura 4.5 apresenta-se a taxa de sudção e evaporação máxima, requerida e prevista final simulados pelo índice de stress térmico PHS. Nesta Figura 4.5 verifica-se que quer a taxa de sudção quer a de evaporação previstas igualam a taxa requeridas. O PHS indica como valor limite, para o aparecimento de stress térmico, uma temperatura retal de 38°C. Neste posto de trabalho, a temperatura no instante final dos 240 minutos não ultrapassa os 37,79°C. Ora isto comprova que é segura a exposição a este ambiente térmico sem que haja um aumento crítico da temperatura corporal interior. Apesar de não haver uma concordância entre os valores previstos pelos dois métodos, quer para a

temperatura retal quer para a taxa de sudação (ver Figura 4.6), pode concluir-se, que para esta zona de trabalho é possível o trabalhador estar exposto durante 4 horas sem problemas de origem térmica para a sua saúde.

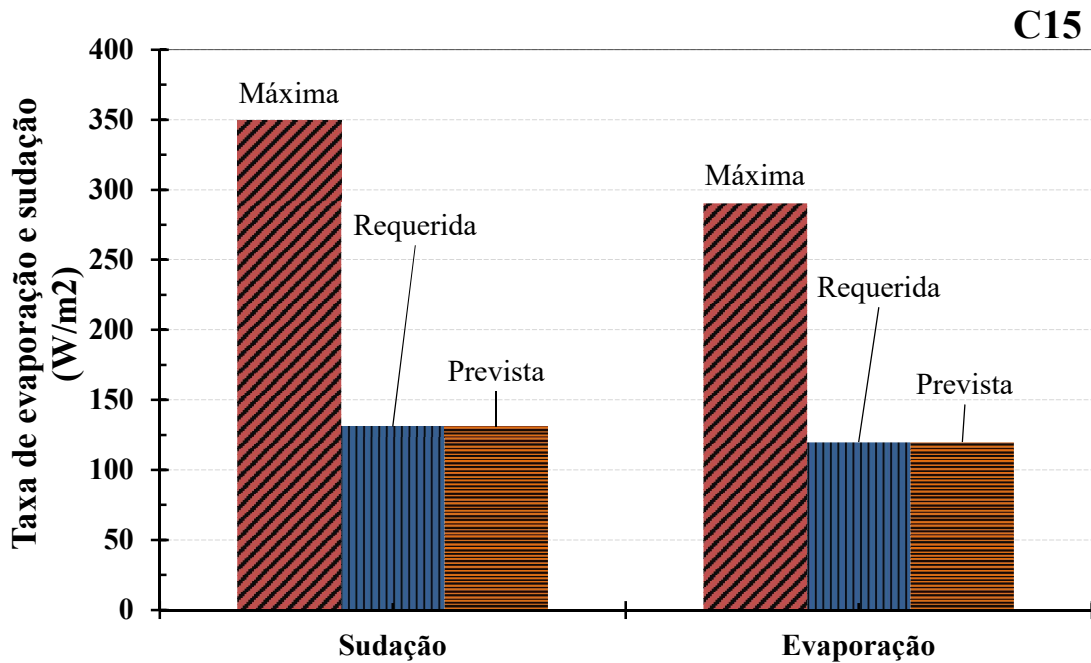


Figura 4.5 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto C15 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.

Na Figura 4.6 está presente a evolução temporal da temperatura retal e taxa de evaporação do modelo PHS e do programa de termorregulação humana Huthereg.

Pela Figura 4.6 verifica-se que a temperatura retal apresenta uma evolução semelhante em ambos os métodos de previsão, apesar dos valores serem substancialmente diferentes. O valor previsto pelo modelo PHS estabiliza num valor final por volta dos 60-70 minutos, enquanto que o determinado pelo programa Huthereg continua em constante evolução. Tal como no caso anterior, a estabilização da temperatura retal prevista pelo PHS nestes instantes não parece correta, pois indica que apesar do metabolismo ser elevado durante todo o intervalo simulado, este não altera a sua temperatura interior.

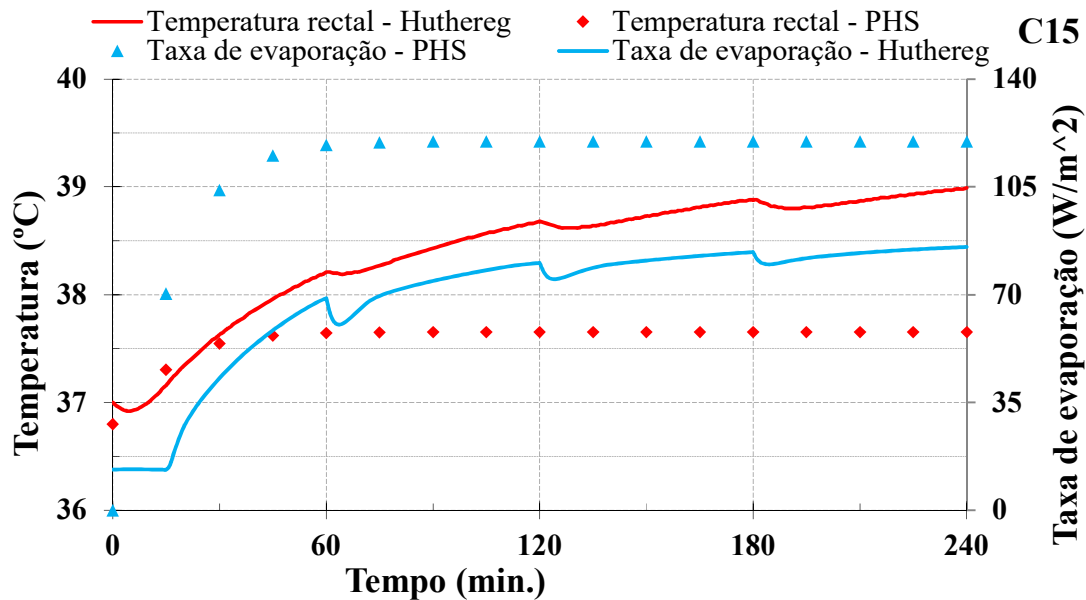


Figura 4.6 Evolução da temperatura rectal e da taxa de evaporação previstas pelos dois métodos para o caso C15.

Quanto à taxa de evaporação, repara-se que o PHS prevê um valor para esta taxa que é sempre superior ao determinado pelo Huthereg. As curvas de evolução são parecidas, embora a previsão do PHS atinja mais cedo um valor estabilizado da taxa de evaporação, ou seja, quando a taxa de evaporação prevista atinge a requerida. Quando a taxa de evaporação requerida e prevista se igualam, a temperatura interior corporal, prevista pelo PHS não aumenta, como se pode observar na Figura 4.6, tendo a temperatura rectal uma evolução igual à da taxa de evaporação

4.1.2. Análise comparativa

Apresenta-se na Tabela 4.2 uma comparação entre as previsões obtidas com o modelo PHS e com o *software* de simulação Huthereg quer para a temperatura rectal, quer para a taxa de evaporação em todos os postos de trabalho considerados no caso da indústria cerâmica. Para o efeito, recorre-se às ferramentas estatísticas expressas nas equações (3.11), (3.12), (3.13) e (3.14), em que os valores (x_i) correspondem aos valores previstos pelo PHS e (y_i) os previstos pelo Huthereg. Os parâmetros apresentados são: a média aritmética das

diferenças (δ), o desvio padrão (σ) destas médias, o desvio quadrático médio (DQM) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

Analisando os valores apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que as previsões do PHS, para o caso da temperatura retal, tem sempre um valor inferior ao do previsto pelo Huthereg, exceto no caso C06. Ora este caso é o único em que o modelo PHS prevê que a temperatura retal atinja um valor bastante superior aos 38°C no fim dos 240 minutos de exposição, sendo, portanto, um caso muito crítico segundo a norma ISO 7933-2004. Apesar disso é o posto em que o coeficiente de Pearson é o mais elevado para a temperatura retal, o que traduz uma concordância bastante alta entre as previsões dos dois métodos. Quanto à diferença entre os valores previstos constata-se, pela observação quer do desvio quadrático médio quer do desvio padrão, que esta é significativa. Isto acontece pela rapidez com que a temperatura retal atinge o seu valor de estabilização, quando determinada pelo modelo PHS, o que não parece que seja realista.

Em relação à taxa de evaporação prevista nos mesmos instantes é notória uma boa relação entre as previsões dos dois métodos, conforme o sugerido pelo valor do coeficiente de Pearson ($0.8 < r < 0.9$). Verifica-se também que a taxa de evaporação prevista pelo modelo PHS é sempre maior do que a determinada pelo *software* Huthereg. No que se refere à aproximação dos valores entre as simulações constata-se que esta é bastante baixa, com desvios bastantes elevados, embora estes desvios sejam mais acentuados na fase inicial dos períodos de trabalho, atenuando-se com o passar do tempo.

É importante realçar que o modelo PHS apresentou apenas um caso da indústria cerâmica como crítico (o C06), enquanto que o Huthereg apresentou 10 dos 21 casos (os C01, C02, C06, C09, C11, C16^d, C17, C18, C19 e C21).

Tabela 4.2 Análise comparativa para os valores da temperatura rectal e taxa de evaporação prevista para os postos de trabalho da indústria cerâmica. Fora da validade do PHS por: (d) diferença insuficiente entre temperatura média radiante e a do ar ambiente

Posto de trabalho	Temperatura rectal				Taxa de evaporação			
	δ (°C)	σ (°C)	<i>DQM</i> (°C)	<i>r</i> (--)	δ (W/m ²)	σ (W/m ²)	<i>DQM</i> (W/m ²)	<i>r</i> (--)
C01	-1,24	0,73	1,43	0,74	49,47	20,37	53,27	0,86
C02	-1,28	0,70	1,45	0,77	36,43	20,46	41,48	0,85
C03	-0,66	0,40	0,76	0,70	28,01	16,19	32,11	0,80
C04	-1,28	0,69	1,44	0,73	60,59	28,92	66,77	0,81
C05	-0,65	0,39	0,75	0,76	39,01	17,83	42,68	0,81
C06	1,63	1,49	2,18	0,94	13,95	30,88	33,05	0,88
C07	-1,15	0,63	1,30	0,76	28,47	22,39	35,81	0,82
C08	-0,92	0,56	1,07	0,69	52,64	21,43	56,60	0,81
C09	-1,25	0,67	1,41	0,79	26,91	24,49	35,90	0,85
C10	-0,99	0,55	1,13	0,75	29,17	20,46	35,28	0,82
C11	-1,43	0,73	1,59	0,82	31,47	27,10	41,01	0,86
C12	-0,48	0,30	0,56	0,76	27,43	14,33	30,75	0,8
C13	-0,71	0,40	0,81	0,79	32,00	16,61	35,83	0,83
C14	-0,89	0,52	1,02	0,77	41,86	15,99	44,64	0,85
C15	-0,81	0,46	0,93	0,80	40,29	16,15	43,23	0,85
C16^d	-1,99	1,07	2,25	0,77	54,08	23,76	58,79	0,88
C17	-2,02	1,09	2,28	0,77	58,17	25,42	63,18	0,89
C18	-1,52	0,84	1,73	0,78	49,04	21,67	53,36	0,88
C19	-1,69	0,91	1,90	0,78	50,52	22,33	54,97	0,89
C20	-0,94	0,54	1,08	0,77	41,10	21,36	46,02	0,83
C21	-1,31	0,70	1,47	0,78	43,97	26,77	51,07	0,84
Máximo	1,63	1,49	2,28	0,94	60,59	30,88	66,77	0,89
Médio	-1,03	0,68	1,36	0,77	39,74	21,66	45,51	0,84
Mínimo	-2,02	0,30	0,56	0,69	13,95	14,33	30,75	0,80

4.2. Indústria Vidreira

Na indústria vidreira os trabalhadores estão muitas vezes expostos a ambientes térmicos críticos. Apresentam-se na Tabela 4.3 os valores normalizados das temperaturas retal e do hipotálamo no momento em que o trabalhador atinge 4 horas de exposição, para os vários postos de trabalho analisados da indústria vidreira. De relembrar que RT_{re} foi determinado a partir dos valores previstos pelo modelo PHS e que RT_{hip} foi obtido recorrendo às previsões do *software* Huthereg.

Tabela 4.3 Postos de trabalho da indústria vidreira - valores de RT_{re} e RT_{hip} dos trabalhadores após uma exposição de 4 horas seguidas. Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença excessiva entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar ambiente.

Posto de trabalho	RT_{re}	RT_{hip}
V01 ^c	8,00	6,06
V02	0,70	1,07
V03 ^a	5,34	1,41
V04 ^a	15,37	12,64
V05	5,86	1,78
V06	0,55	0,35
V07	1,92	1,28
V08	0,92	1,61
V09	4,22	1,60
V10	0,56	0,72
V11 ^b	9,39	3,89
V12	0,39	0,49
V13	0,22	0,27
V14	0,32	0,41
V15 ^b	5,20	2,34
V16	0,38	0,45
V17	0,34	0,28
V18 ^b	4,81	1,37
V19	0,13	0,26

Avaliando o potencial de stress térmico com base na temperatura retal final prevista pelo modelo PHS verifica-se que, da amostra de 19 postos de trabalho, seis podem ser classificados como favoráveis (V12, V13, V14, V16, V17, V19), quatro como aceitáveis (V02, V06, V08, V10), um como crítico (V07) e oito como muito críticos (V01, V03^a, V04^a, V05, V09, V11^b, V15^b, V18^b). Com base na temperatura do hipotálamo prevista pelo programa Huthereg, os postos de trabalho podem ser classificados sete como favoráveis (V06, V12, V13, V14, V16, V17, V19), um como aceitável (V10), sete como críticos (V02, V03^a, V05, V07, V08, V09, V18^b) e quatro como muito críticos (V01, V04^a, V11^b, V15^b).

4.2.1. Situações extremas em termos de temperatura e humidade

Neste capítulo, tal como para a indústria cerâmica, foram revistos mais em pormenor dois postos de trabalho. Um com temperaturas elevadas e outro com a pressão parcial de vapor de água alta, logo humidade relativa elevada. Esta humidade muito alta faz com que a taxa de evaporação na superfície da pele diminua consideravelmente. Os postos de trabalho a analisar em pormenor são o V07 e o V14.

4.2.1.1. Posto de trabalho V07– temperaturas ambientais elevadas

Este caso apresenta uma temperatura ambiente de 39,1°C e uma temperatura média radiante de 51,6°C. Apresenta uma humidade relativa de 19,4%. Quanto aos parâmetros individuais apresenta um metabolismo de 148,1 W/m² e um isolamento do vestuário global de 0,7 clo. É um caso extremo, sendo por isso expectável que o tempo em que os trabalhadores possam permanecer aqui em segurança seja reduzido. Este posto de trabalho é classificado como crítico recorrendo quer aos resultados do modelo PHS quer às previsões do *software* Huthereg.

Apresenta-se na Figura 4.7, para o posto de trabalho V07, a evolução temporal prevista pelo programa Huthereg para as temperaturas do hipotálamo, retal e máxima da pele, evidenciando, também, as temperaturas acima das quais é provável que ocorra introversão, golpe de calor, morte e dor na pele.

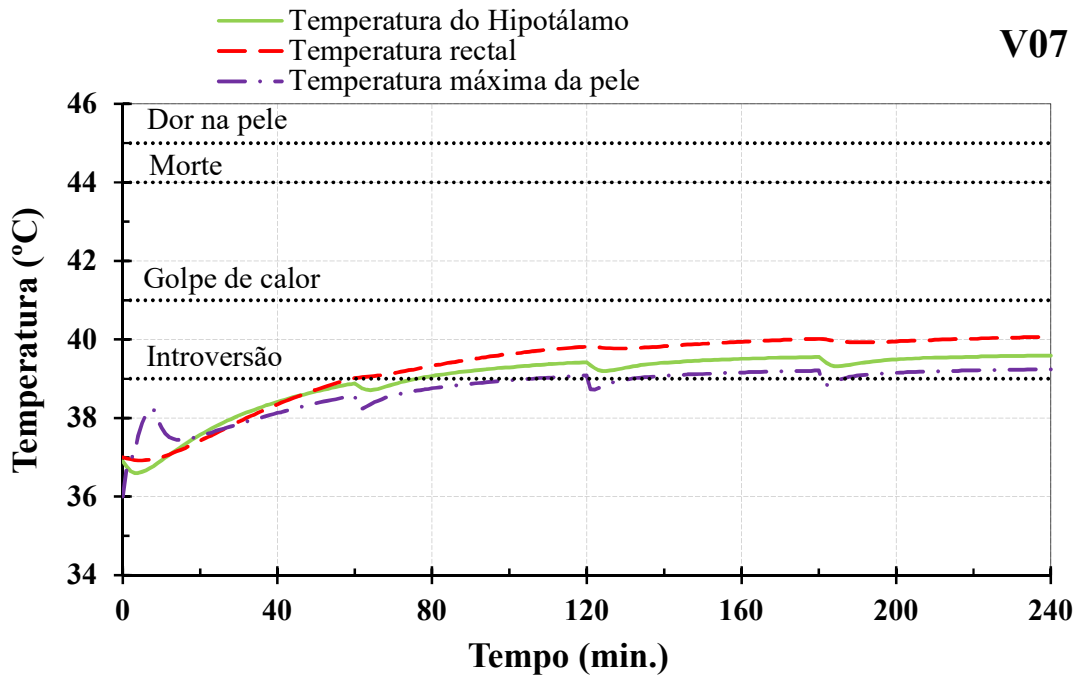


Figura 4.7 Posto de trabalho V07 – evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele.

Como se pode ver na Figura 4.7, o tempo a que o trabalhador possa estar exposto antes de entrar em introversão é de cerca de 80 minutos, que é quando a temperatura do hipotálamo atinge os 39°C. Apesar do início de a introversão ocorrer no primeiro terço da simulação, a evolução prevista para a temperatura do hipotálamo segundo o programa Huthereg não atinge os 41 °C que indicaria a ocorrência de golpe de calor.

Apresentam-se na Figura 4.8 os valores máximos, requeridos e previstos para as taxas de sudação e de evaporação, determinadas recorrendo ao modelo PHS, para o trabalhador do posto V07 após um período de 240 min de exposição. Pela Figura 4.8 é possível observar que no final dos 240 minutos a taxa de evaporação prevista não iguala a requerida. Quanto à taxa de sudação, verifica-se que quer a requerida quer a prevista igualam a máxima, indicando que o organismo pode não responder eficientemente ao ambiente térmico. Isto leva a um aumento contínuo da temperatura corporal, pois a taxa de dissipação de calor é menor do que a sua produção. Este facto é coerente com os valores da temperatura rectal previstos pelo modelo PHS, os quais, conforme está representado na Figura 4.9, sugerem um tempo de 65 minutos como limite de exposição para que não se inicie uma condição de stress térmico para o trabalhador ($T_{re} = 38^{\circ}\text{C}$).

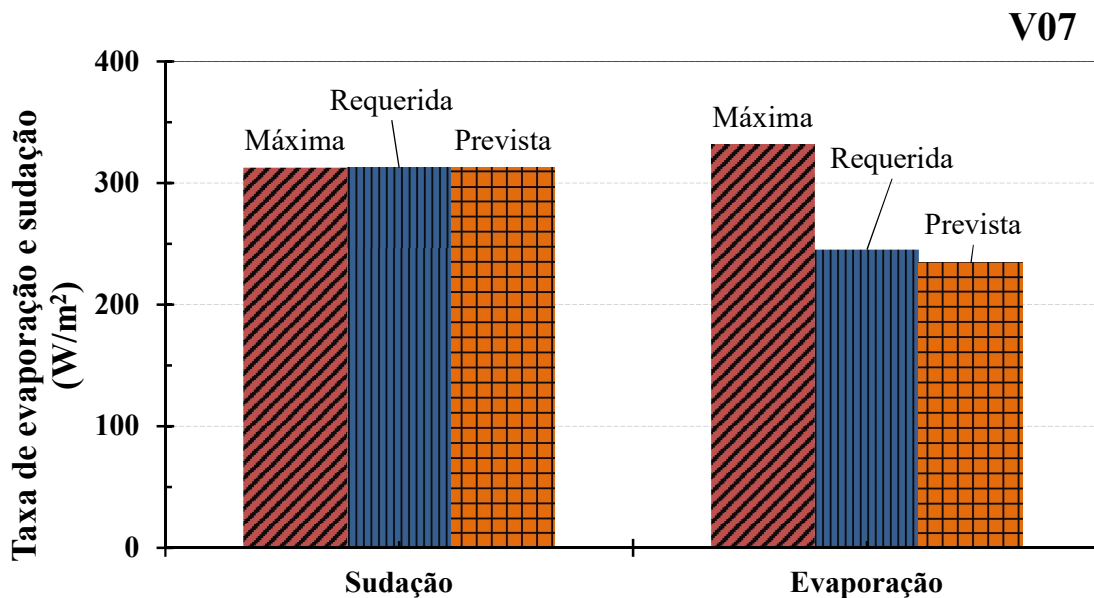


Figura 4.8 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto V07 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.

Na Figura 4.9 apresenta-se taxa de evaporação e a temperatura retal previstas pelos dois métodos.

Pela análise dos resultados mostrados na Figura 4.9 nota-se que a evolução da temperatura retal previstas pelo PHS e pelo Huthereg são diferentes entre si, não apresentando a mesma curva de evolução, enquanto que as previsões da taxa de evaporação apresentam o mesmo tipo de curva. As taxas de evaporação previstas apresentam uma maior aproximação à medida que o tempo de simulação aumenta.

4.2.1.1. Posto de trabalho V14 – humidade do ar elevada

No caso V14 a humidade relativa é de 82,5%, sendo a mais elevada dos postos de trabalho para a indústria vidreira onde o programa PHS é válido. A temperatura do ar ambiente é de 28,2°C e a média radiante é de 37,4°C. O indivíduo apresenta um metabolismo de 1,57 met e um isolamento do vestuário de 0,6 clo. Este posto de trabalho é classificado como favorável recorrendo quer aos resultados do modelo PHS quer às previsões do *software* Huthereg. Será analisado então o posto de trabalho pelos dois métodos, como comprovado na Figura 4.10 e Figura 4.11.

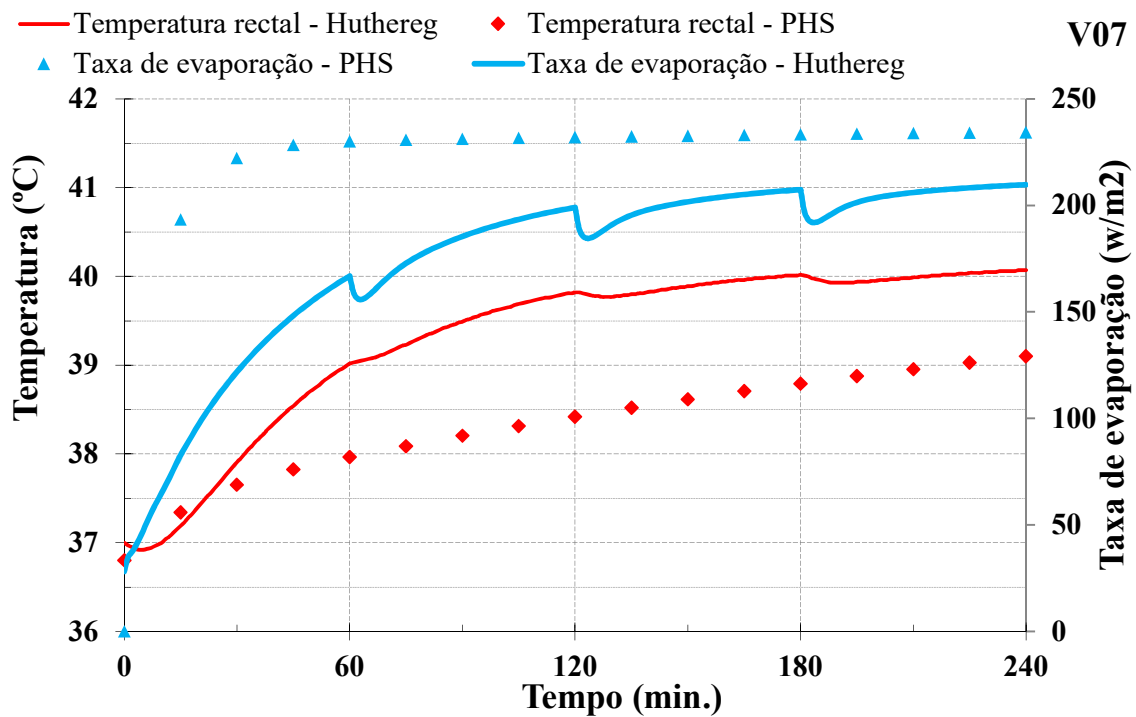


Figura 4.9 Posto de trabalho V07 – evolução temporal da previsão da temperatura retal e da taxa de evaporação previstas por ambos os métodos.

Na Figura 4.10 encontra-se a previsão do programa Huthereg, para o posto de trabalho V14, das temperaturas do hipotálamo, retal e máxima da pele.

Neste caso, recorrendo à ferramenta de cálculo Huthereg confirma-se que este posto de trabalho é seguro, não havendo o risco da temperatura do hipotálamo atingir o valor crítico de 39°C, podendo por isso um trabalhador estar exposto a estas condições térmicas durante 240 minutos.

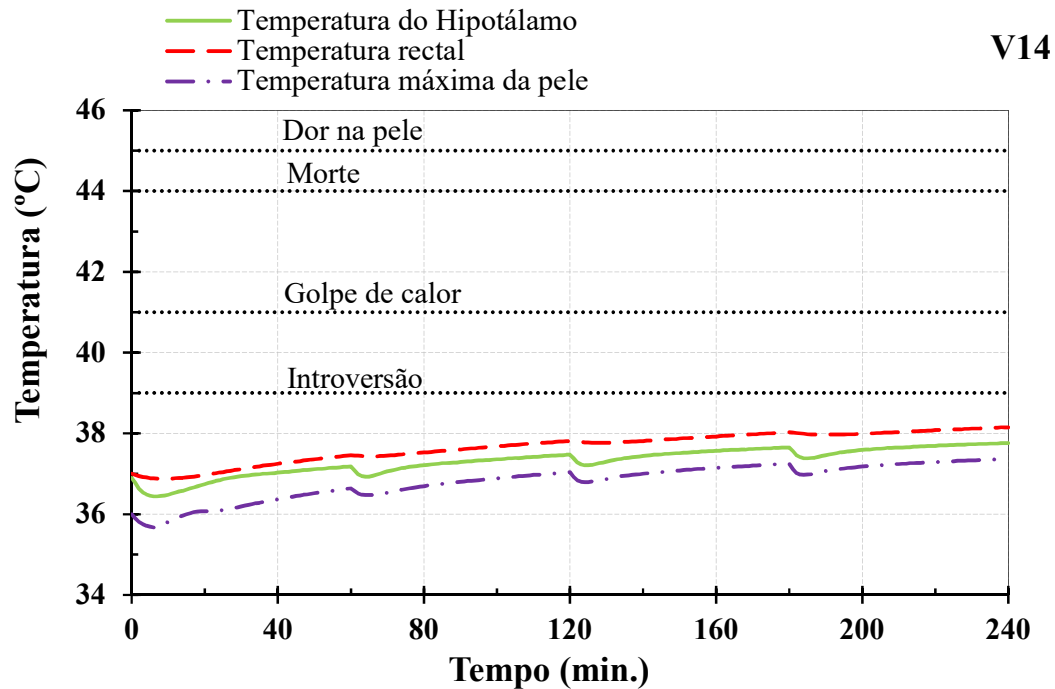


Figura 4.10 Posto de trabalho V14 – evolução dos valores previstos pelo programa Huthereg para as temperaturas rectal, do hipotálamo e máxima da pele.

Apresentam-se na Figura 4.11 os valores máximos, requeridos e previstos para as taxas de sudação e de evaporação, determinadas recorrendo ao modelo PHS, para o trabalhador do posto V14 após um período de 240 min de exposição.

Da análise dos resultados mostrados na Figura 4.11 constata-se que, termos de nível de stress térmico, as previsões do modelo PHS corroboram as do *software* Huthereg. Os valores das taxas de sudação e de evaporação, do trabalhador do posto V14, requeridas e previstas são substancialmente inferiores ao respetivo valor máximo e o valor previsto é igual ao requerido. Estes factos indicam claramente uma situação favorável para controlo da temperatura corporal. Verifica-se também que a taxa de evaporação máxima é baixa, o que é explicado pela humidade alta existente neste posto de trabalho. Ora isto pode levar a uma não eficiente evaporação de suor, não dissipando o calor necessário para manter a temperatura interior controlada. Apesar destas condicionantes, isto, não acontece neste posto de trabalho mantendo-se a taxa de evaporação prevista igual à requerida, sendo ambas menores que a máxima.

V14

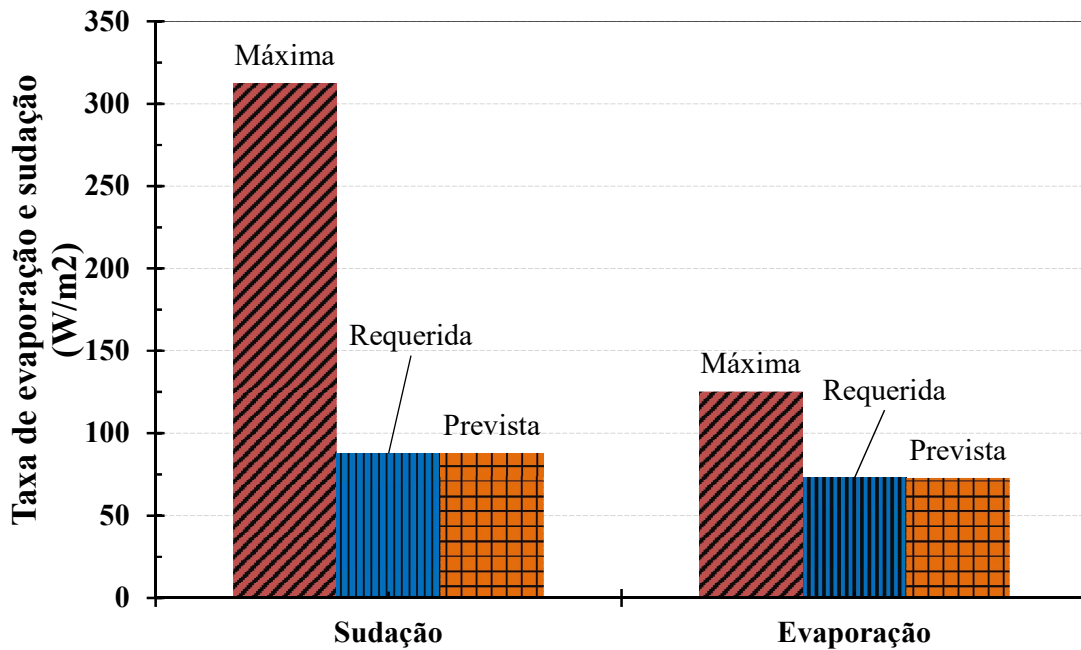


Figura 4.11 Valores calculados pelo modelo PHS para o trabalhador do posto V14 no instante $t = 240$ min – taxas de sudação e de evaporação: máximas, requeridas e previstas.

Apresentam-se na Figura 4.12 os valores previstos, pelo modelo PHS e pelo *software* Huthereg, para a evolução temporal da temperatura retal e da taxa de evaporação do trabalhador do posto V14.

A taxa de evaporação prevista pelo PHS apresenta uma grande diferença em relação à determinada pelo Huthereg. Até aos 15 minutos a taxa de evaporação prevista pelo Huthereg é constante. Isto sugere que o indivíduo não transpira nestes minutos, ocorrendo apenas a evaporação por perspiração. No PHS esta taxa de evaporação apresenta um aumento brusco nos primeiros minutos, estabilizando a partir de cerca de 60 min de exposição. Por outro lado, o valor previsto pelo Huthereg para a taxa de evaporação nunca estabiliza, apresentando um aumento continuado.

Quanto à temperatura retal, segundo a previsão do PHS, esta estabiliza muito cedo e nunca ultrapassa os 37°C. Por sua vez, o programa Huthereg prevê para esta temperatura um aumento contínuo, sem sinais de estabilização e com um valor superior a 38°C se o período de trabalho durar mais que 180 min. A diferença final entre as previsões dos dois métodos chega a ser superior a 1°C.

Embora as previsões dos dois métodos sejam concordantes quanto a que o posto de trabalho V14 é favorável em termos de stress térmico, os valores presentes na Figura 4.12 claramente demonstram que pode haver diferenças importantes entre os valores que cada um dos métodos prevê.

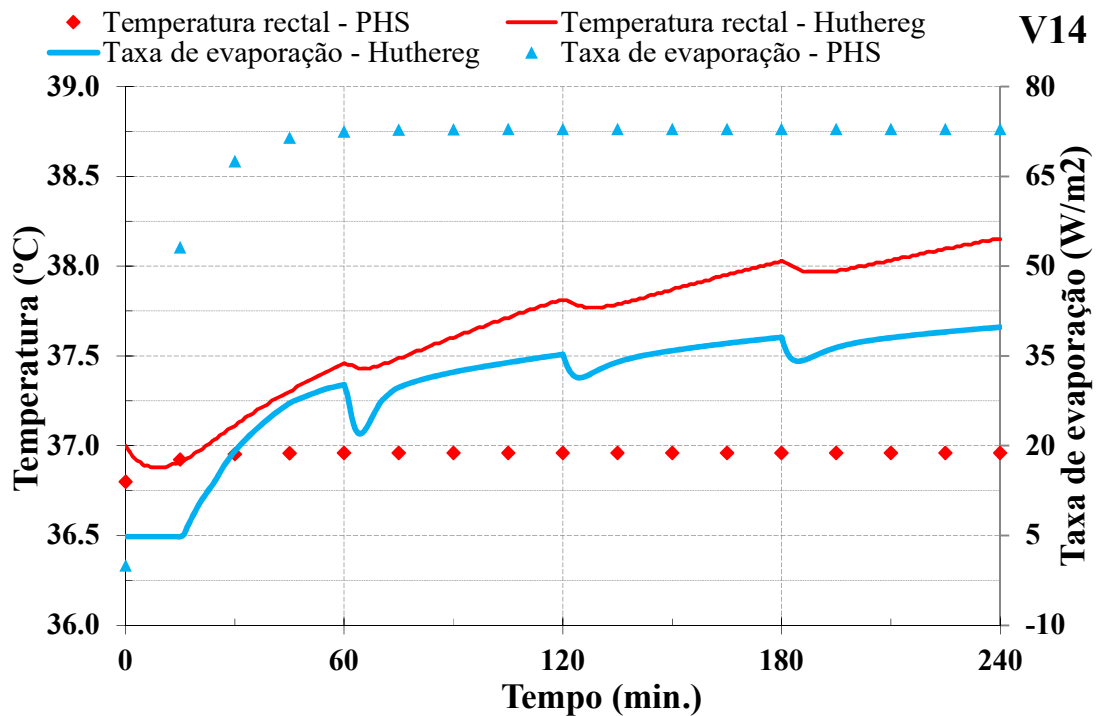


Figura 4.12 Posto de trabalho V14 – evolução temporal da temperatura retal e da taxa de evaporação previstas por ambos os métodos.

4.2.2. Análise comparativa

Apresenta-se na Tabela 4.4 uma comparação entre as previsões obtidas com o modelo PHS e com o *software* de simulação Huthereg, quer para a temperatura retal quer para a taxa de evaporação, em todos os postos de trabalho considerados no caso da indústria vidreira. Para o efeito, recorre-se às ferramentas estatísticas média aritmética das diferenças (\bar{d}), desvio padrão (σ) destas médias, desvio quadrático médio (DQM) e coeficiente de correlação de Pearson (r).

Tabela 4.4 Análise comparativa para os valores da temperatura retal e taxa de evaporação prevista para os postos de trabalho da indústria vidreira Fora dos limites do modelo PHS por: (a) temperatura do ar ambiente excessiva; (b) pressão parcial de vapor excessiva; (c) diferença excessiva entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar ambiente.

Posto de trabalho	Temperatura retal				Taxa de evaporação			
	δ (°C)	σ (°C)	<i>DQM</i> (°C)	<i>r</i> (--)	δ (W/m ²)	σ (W/m ²)	<i>DQM</i> (W/m ²)	<i>r</i> (--)
V01	1,24	1,02	1,59	0,98	168,91	97,59	193,64	0,10
V02	-1,28	0,70	1,45	0,77	72,55	31,09	78,57	0,84
V03 ^a	1,01	1,06	1,45	0,91	-41,64	31,11	51,43	0,87
V04 ^a	5,76	3,78	6,83	0,98	58,36	147,43	154,48	0,05
V05	0,89	1,02	1,33	0,94	29,52	31,35	42,38	0,87
V06	-0,45	0,27	0,53	0,80	33,10	13,95	35,76	0,79
V07	-0,97	0,45	1,06	0,95	43,11	32,33	53,31	0,82
V08	-1,71	1,00	1,97	0,75	66,07	23,44	69,87	0,88
V09	0,26	0,51	0,56	0,96	52,45	29,68	59,83	0,86
V10	-0,89	0,52	1,03	0,74	41,46	21,04	46,21	0,82
V11 ^b	3,03	1,58	3,40	1,00	31,32	83,22	86,60	-0,35
V12	-0,64	0,39	0,74	0,69	34,82	16,68	38,39	0,80
V13	-0,32	0,21	0,38	0,56	36,31	13,51	38,60	0,83
V14	-0,72	0,37	0,80	0,56	36,70	11,68	38,41	0,78
V15 ^b	0,54	0,41	0,67	0,99	56,83	36,05	66,73	-0,41
V16	-0,58	0,36	0,67	0,68	38,69	15,80	41,62	0,79
V17	-0,41	0,26	0,48	0,68	31,62	12,94	34,02	0,75
V18 ^b	1,87	1,00	2,11	0,99	-8,33	13,68	15,67	0,50
V19	-0,41	0,22	0,46	0,52	25,15	10,81	27,25	0,79
Máximo	5,76	3,78	6,83	1,00	168,91	147,43	193,64	0,88
Médio	0,33	0,80	1,45	0,81	42,47	35,44	61,72	0,60
Mínimo	-1,71	0,21	0,38	0,52	-41,64	10,81	15,67	-0,41

Analisando os valores que constam na Tabela 4.4 verifica-se que, ao contrário do caso da indústria cerâmica, na indústria vidreira existem vários casos em que a média das diferenças relativas para a temperatura retal é positiva, indicando que, em alguns casos os

valores previstos pelo modelo PHS para esta temperatura são maiores que os determinados pelo *software* Huthereg. Estas maiores temperaturas acontecem sempre que o posto de trabalho é muito crítico segundo o modelo PHS (V01^c, V03^a, V04^a, V05, V09, V11^b, V15^b, V18^b). Apesar da sua criticidade, para estes postos de trabalho e para o posto de trabalho V07, que é considerado crítico a concordância entre as previsões dos dois métodos para a temperatura retal é perfeita ou quase perfeita (pois $r > 0.9$).

Conforme o indicado pelos valores da média aritmética das diferenças (δ), do desvio padrão (σ) destas médias e do desvio quadrático médio (DQM), não existe uma relação unívoca entre a previsão do PHS e a do Huthereg para a taxa de evaporação. A dispersão dos valores apresentados pelas variáveis estatísticas anteriores é considerável. Para além disto, o modelo PHS prevê maiores taxas evaporação, exceto no caso dos postos de trabalho V03^a e V18^b.

Quanto à comparação das previsões, de ambos os métodos, da taxa de evaporação, recorrendo ao coeficiente de correlação de Pearson (r), verifica-se que vários dos casos que estão fora dos limites do PHS, apresentam uma correlação fraca ou até divergente ($-0,4 < r < 0,4$), entre os quais estão incluídos os postos de trabalho V01^c, V04^a, V11^b e V15^b. Esta fraca concordância (ou mesmo discordância) entre ambas as previsões, que existe nestes casos, deve-se ao aumento da temperatura do hipotálamo para valores superiores a 41°C, quando o indivíduo deixa de transpirar, não existindo, assim, evaporação de suor. O que justifica esta divergência é que o programa Huthereg leva em consideração a patologia anterior enquanto que o modelo PHS não considera a existência de tal ocorrência. No caso dos outros postos de trabalho, as previsões de ambos os métodos para a taxa de evaporação apresentam uma concordância que vai de razoável a muito boa.

5. CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho pretendia-se atingir dois objetivos. O primeiro era avaliar, em termos de potencial de stress térmico, vários postos de trabalho das indústrias cerâmica e vidreira, para os quais existia informação recolhida em situações reais. Estava definido à partida que esta avaliação seria efetuada recorrendo a dois métodos distintos, o modelo de avaliação de stress térmico PHS e um *software* de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano (tendo-se optado pelo programa Huthereg). O segundo objetivo era aproveitar as previsões, produzidas por estes dois métodos, da evolução das variáveis relacionadas com o stress térmico sentido pelos trabalhadores, para efetuar uma comparação entre elas.

Em termos de stress térmico, as condições de trabalho na indústria vidreira são potencialmente muito mais agressivas para a segurança dos trabalhadores do que as da indústria cerâmica. No entanto, quer num caso quer no outro, existe uma grande diversidade de condições de trabalho, tendo sido possível em ambas as atividades classificar postos de trabalho como favoráveis, aceitáveis, críticos e muito críticos. É, assim, evidente que não é viável analisar de um modo global as condições de trabalho de qualquer uma destas indústrias, sendo necessário estudar cada posto de trabalho individualmente.

Em termos de comparação entre as duas ferramentas de simulação utilizadas, constata-se que o modelo PHS prevê apenas um conjunto restrito de variáveis, as quais são muito dirigidas para o stress térmico sofrido por pessoas expostas a ambientes quentes. Por outro lado, o *software* Huthereg prevê um conjunto muito alargado e detalhado de variáveis e pode ser utilizado para exposições de pessoas a ambientes quentes, neutros e frios. No entanto, para utilizar o Huthereg é necessário fornecer-lhe muito mais informação, a qual deve estar muito mais detalhada, do que para utilizar o *software* de suporte do modelo PHS.

Em termos de correlação entre as previsões dos dois métodos, verifica-se que globalmente ela é inferior ao que se estava à espera. No entanto, para alguns postos de trabalho as previsões dos dois métodos apresentaram muito boa concordância, mas também houve postos de trabalho em que a correlação de resultados foi muito fraca, chegando, embora em muito poucos casos, a ser ligeiramente divergente. Por norma, os resultados previstos pelo *software* Huthereg indicam níveis de stress térmico mais elevados do que os

fornecidos pelo modelo PHS. Inclusive, houve postos de trabalho em que com base nos resultados do Huthereg foram classificados como críticos e que com base nas previsões do PHS foram classificados como aceitáveis. É evidente que o *software* Huthereg produz resultados que, a serem levados em consideração, são mais protetores da segurança dos trabalhadores expostos a um determinado ambiente quente do que se esse posto de trabalho for analisado recorrendo ao modelo PHS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abeyssekera J. D. A (1981). Thermal environment and subjective discomfort of glass-factory workers in Sri Lanka. *Journal of Human Ergology*, 185–192.
- Águas M. (2001). Conforto térmico. IST
- Abreu R. M. S. (2013). Análise e simulação termofisiológica de técnicas de arrefecimento corporal aplicadas a um bombeiro no combate a incêndios florestais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- 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 Organization, Final Draft, Genève.
- ISO 7726:1998 (1998). Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring quantities. International Standard Organization, Genève.
- Malchaire J. B. M. (2006). Occupational heat stress assessment by the predicted heat strain model. *Industrial Health*, Vol. 44(3), 380–387. Doi: 10.2486/indhealth.44.380
- Malchaire J. B. M. (2017). Site da "Unité Hygiène et Physiologie du travail Prof. J. Malchaire". <http://www.deparisnet.be/chaleur/Chaleur.htm>
- Oliveira A. V. M., Gaspar A. R., Raimundo A. M. & Quintela D. A. (2015). Assessment of thermal environments: working conditions in the Portuguese ceramic industry in 1994 and 2012. *Work*, Vol. 51(3), 457–470. Doi: 10.3233/WOR-141938
- Oliveira A. V. M., Gaspar A. R., Raimundo A. M. & Quintela D. A. (2017). Assessment of thermal environments: working conditions in the Portuguese glass industry. Manuscript ID: IH-2017-0048-FR, aceite para publicação na revista *Industrial Health*. http://www.jniosh.go.jp/en/indu_hel/
- Parikh, D. J., Ghodasara, N. B., & Ramanathan, N. Lo. (1978). A Special Thermal Stress Problem in Ceramic Industry. *European Journal of Applied Physiology*, 40, 63–72.
- Pereira C. M. D. (2014). Teste e validação de um programa de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

- Potdar, P. A., Potdar, A. B., Thillana, P., & Deivamani. (2016). Study of Occupational Health Problems among Workers in a Glass Manufacturing Plant at Puducherry. *Medico-Legal Update*, 16(1), 34–38.
- Pourmahabadian, M., Adelhah, M., & Azam, K. (2008). Heat Exposure Assessment in the Working Environment of a Glass Manufacturing Unit. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 5(2), 141–147.
- Raimundo AM, Figueiredo AR (2009). Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 514-521. Doi: 10.1016/j.firesaf.2008.10.007
- Raimundo A. M., Oliveira A. V. M., Gaspar A. R., Quintela D. A. (2015). Thermal conditions in freezing chambers and prediction of the thermophysiological responses of workers, *International Journal of Biometeorol*, Vol. 59, pp.1623–1632. Doi: 10.1007/s00484-015-0969-y
- Raimundo AM (2016). Huthereg - *software* de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Rodrigues J.M.P. (2015). Condições de trabalho na indústria cerâmica : avaliação da exposição ao calor. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Rodrigues J. M. P., Oliveira A. V. M., Gaspar A. R., Raimundo A. M. & Quintela D. A. (2016). Working conditions in the ceramic industry: assessment of the heat exposure with the predicted heat strain (PHS) index. *Occupational Safety and Hygiene IV - Selected, Extended and Revised Contributions from the International Symposium Occupational Safety and Hygiene*
- Stolwijk J. A. J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA contractor report CR-1855. NASA, Washington DC.
- Torres D. C. (2016). Análise de condições de trabalho: stress térmico na indústria vidreira. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- WHO (1969). "Health factors involved in working under conditions of heat stress", World Health Organisation, Technical Report Series, N° 412. Geneve.
-