



Agenti fisici e salute nei luoghi di lavoro

ACCERTAMENTI DI STRESS TERMICO MEDIANTE MONITORAGGIO DELLA FREQUENZA CARDIACA DEGLI ESPOSTI

**Alessandro Merlino, Gianluca Gambino, Daniele Meda, Gabriele
Quadrio**

CeSNIR, Villasanta (MB)

1 – INTRODUZIONE

Questo lavoro rappresenta il seguito di un altro presentato nell'ambito del convegno dBA 2018, con il quale veniva proposta una disamina dei metodi di valutazione dello stress termico da caldo per quei lavoratori che indossano abbigliamento protettivo. In quel primo contributo era fornita la descrizione di un metodo basato sulle letture della frequenza cardiaca dei soggetti esposti sviluppato da M. J. Buller, ricercatore statunitense, nell'ambito delle forze armate.

Con l'attuale contributo intendiamo restituire l'esito di alcuni accertamenti tecnici eseguiti nell'estate del 2019 secondo questa procedura.

Come già evidenziato con il primo lavoro, ricordiamo che un approccio tramite il monitoraggio di parametri fisiologici risulta l'unica soluzione praticabile per l'accertamento dello stress termico da caldo nei casi in cui non risultino utilizzabili i metodi noti con gli acronimi WGBT (UNI, 2017) e PHS (UNI, 2005) e nei casi in cui, pur risultando utilizzabili detti metodi, gli indici di esposizione superano i pertinenti limiti o li rispettano con un margine troppo piccolo per poter essere considerato di sicurezza.

2 – ENTITÀ DEL RISCHIO

Le persone esposte al caldo subiscono effetti che possono incidere sulle loro prestazioni, sul comfort e sulla loro salute con conseguenze di varia gravità fino ad arrivare addirittura alla morte. Quando il tempo meteorologico diventa eccezionalmente caldo il numero di decessi può crescere in modo considerevole, soprattutto tra i soggetti più vulnerabili. Si può dire che nel contesto occupazionale l'esposizione al calore sia meglio governata che in



quello del pubblico generico dove, nelle estati più calde, si possono contare centinaia di morti, con picchi di migliaia (nell'estate del 2003 nella sola città di Parigi morirono 14 000 persone per il caldo e in Italia i morti arrivarono complessivamente a circa 18 000).

Nel contesto occupazionale è condivisa l'opinione che ci siano 2 lavoratori su 1000 a rischio a causa di questo agente. Un fattore discriminante è l'abitudine al calore; è infatti stato spesso riscontrato come i maggiori problemi interessino coloro che non sono abituati né fisicamente, né psicologicamente ad affrontare il caldo. Un altro elemento chiave è la sottovalutazione del rischio, spesso percepito minore di quello reale, talvolta aggravato da un'eccessiva responsabilizzazione al dovere e/o motivazione allo svolgimento del proprio compito. Si pensi a coloro che fanno parte di gruppi di pronto intervento e che spesso indossano abbigliamento protettivo di tipo CBRNE (Chemical Biological Radiological Nuclear and Explosive) come personale sanitario, vigili del fuoco, militari.

Condizioni di alto rischio possono verificarsi anche in agricoltura, nell'industria siderurgica, in quella automobilistica, in quella dell'estrazione del petrolio, a bordo di imbarcazioni, sui cantieri edili e stradali.

Gli effetti sull'organismo che si possono verificare all'aumentare del surriscaldamento corporeo sono i seguenti: alterazioni cutanee, edema da calore, collasso cardiocircolatorio (per temperature rettali superiori a 39 °C), colpo di calore (temperature rettali dell'ordine dei 41 °C), alterazioni cerebrali, morte.

In sede NIOSH si ritiene che la temperatura del nucleo corporeo (*core temperature*), possa arrivare anche sino a 39 °C in condizioni controllate. Non è infatti scontato che un lavoratore subisca effetti avversi sulla propria salute al raggiungimento di 38°C o anche 39°C di temperatura interna. Tuttavia, tenuto conto dei possibili errori di rilevazione nella valutazione di stress termico e della sensibilità del singolo soggetto, è necessario che il limite adottato comprenda un opportuno margine di sicurezza ed è per questo motivo che tale limite viene universalmente assunto pari a 38 °C su indicazione della OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità).

Bisogna infine considerare che vi sono importanti fattori individuali, nella vulnerabilità al calore, tra cui: età, genere, grasso corporeo, droghe e alcol, stato di salute e disabilità fisiche.

3 – LA DISPERSIONE DEL CALORE SVILUPPATO INTERNAMENTE

Nella valutazione dello stress termico non deve essere sottovalutato il calore prodotto dell'attività fisica e che si accumula all'interno dell'organismo e la facilità/difficoltà a disperderlo. Sulla dispersione di questo incide evidentemente l'abbigliamento. Nei casi in cui i lavoratori devono indossare



anche un abbigliamento protettivo (e talvolta questo accade proprio per proteggersi dal calore esterno, specialmente radiato), la capacità di disperdere il calore sviluppato internamente può ridursi criticamente, fino ad annullarsi nel caso di abbigliamento incapsulante. Di qui l'importanza di considerare correttamente gli effetti dell'abbigliamento protettivo nelle valutazioni di stress termico.

Si rimanda al precedente lavoro (Merlino et al., 2018) per una descrizione più ampia delle conseguenze sullo stress termico riconducibili all'uso di abbigliamento protettivo.

In questa sede vogliamo però ricordare che gli effetti dell'abbigliamento sugli scambi di calore tra soggetto e ambiente sono riconducibili a due meccanismi: l'isolamento termico e la resistenza all'evaporazione.

L'isolamento termico dell'abbigliamento, individuato dal parametro I_{cl} , misurato in clo, influenza gli scambi termici di tipo non evaporativo che avvengono attraverso la pelle, ovvero quelli convettivi, radiativi e conduttivi. Com'è noto, l'isolamento termico complessivo dei capi di abbigliamento indossati dal lavoratore, si può determinare a mezzo dei dati e delle procedure reperibili nella norma tecnica UNI EN ISO 9920:2009 "Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento".

La resistenza all'evaporazione influenza invece gli scambi di calore che possono avvenire attraverso la pelle a mezzo del meccanismo dell'evaporazione. Quando la resistenza all'evaporazione è elevata (come nel caso di indumenti impermeabili) l'unico modo di disperdere calore rimane quello per convezione e irraggiamento dalla superficie esterna dell'abbigliamento, ma la quota di calore così dispersa è di molto inferiore a quella che sarebbe stata ceduta attraverso l'evaporazione del sudore all'esterno.

4 – VALUTAZIONE DELLO STRESS DA CALDO A PARTIRE DALL'AMBIENTE TERMICO

Sono due i metodi definiti a livello internazionale e recepiti anche in Italia per l'accertamento dei rischi connessi con lo stress termico da caldo a partire dalla caratterizzazione dell'ambiente termico:

- il metodo basato sull'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature), illustrato nella norma tecnica UNI EN ISO 7243:2017;
- il metodo denominato PHS (Predicted Heat Strain), basato sui descrittori t_{re} (temperatura rettale) e D (quantità di liquidi perduti durante l'esposizione), illustrato nella norma tecnica UNI EN ISO 7933:2005.

In termini gerarchici, il metodo WBGT dev'essere considerato di screening e alla portata anche di valutatori non esperti; se i livelli di riferimento del

metodo WBGT sono superati, dovrebbe essere adottato il metodo PHS con un accertamento condotto da parte di persona esperta.

Il principio del metodo WBGT si basa sull'assunzione che gli scambi di calore tra la strumentazione di misura e l'ambiente replichino quelli dell'essere umano e che pertanto l'impatto dello stress termico sulla persona sia direttamente correlabile con le letture della strumentazione. Questo naturalmente è vero solo in parte e dipende dallo specifico contesto (grado di umidità, ventilazione dell'aria, vestizione della persona, permeabilità al vapore dell'abbigliamento, ...).

Un approccio alternativo per evitare le limitazioni di cui sopra è quello di calcolare effettivamente lo scambio di calore tra una persona e l'ambiente, utilizzando i sei parametri di base che definiscono le condizioni climatiche e personali: temperatura dell'aria ambiente, temperatura radiante, umidità e velocità dell'aria, abbigliamento e tasso metabolico del soggetto. Il metodo PHS propone questo tipo di calcolo.

Un considerevole vantaggio di questo secondo metodo è quello che consente di ottenere una previsione dello stato di sollecitazione del lavoratore in ogni momento della sua esposizione, permettendo in questo modo all'igienista industriale di valutare la durata dell'esposizione sicura e quella dei periodi di recupero. Per questi scopi è importante che il valore dell'indice in un dato istante tenga conto delle esposizioni precedenti e dei tempi di risposta delle variabili fisiologiche considerate.

Il metodo può essere utilizzato se ogni parametro oggetto di valutazione rientra entro gli intervalli di applicabilità definiti dal metodo stesso (cfr. tabella 1)

Tabella 1: Intervalli di validità del metodo PHS (UNI EN ISO 7933:2005)

Grandezza	Simbolo	Intervallo di validità
temperatura dell'aria, °C	t_a	+ 15 , +50
differenza tra t_a e t_r . °C	$t_r - t_a$	0 , +60
pressione parziale del vapore acqueo, kPa	p_a	0 , 4,5
velocità dell'aria, m/s	v_a	0 , 3
attività metabolica, W	M	100 , 450
isolamento termico del vestiario, clo	I_{cl}	0,1 , 1

Nessuno dei due standard illustrati sopra è tuttavia adatto alla valutazione dello stress termico per lavoratori sottoposti ad alti carichi termici e che indossano abbigliamento protettivo. Il metodo WBGT non è infatti idoneo per valutazioni approfondite e il metodo PHS consente di compiere valutazioni

d-A2019

solo nei casi in cui l'isolamento termico dell'abbigliamento non supera il valore di 1 clo e l'indice di permeabilità al vapore non si discosta da 0.38.

I due metodi appena richiamati sono gli unici elaborati a livello internazionale per una valutazione oggettiva dello stress termico da caldo riferita a gruppi di lavoratori, ma in entrambi i casi si assume che l'abbigliamento sia tale da garantire l'efficacia di tutti i meccanismi di scambio termico tra uomo e ambiente.

L'unico standard che affronta il caso di lavoratori che devono indossare abbigliamento speciali a protezione di altri tipi di rischio (ad esempio polveri, agenti chimici, agenti microbiologici, taglio e lo stesso irraggiamento di calore) è quello emesso nel Regno Unito, denominato BS 7963:2000 dal titolo "Guide to the assessment of heat strain in workers wearing personal protective equipment".

Questo standard non definisce un nuovo indice di esposizione, ma propone dei metodi per correggere le procedure definite dai metodi esistenti¹ (WBGT e PHS) per ottenere una possibile valutazione degli effetti dello stress termico da caldo anche per i lavoratori che devono indossare abbigliamento protettivi o altri DPI che possono incidere sull'ambiente termico personale.

Rimandando al precedente articolo per una dettagliata illustrazione della procedura proposta dallo standard britannico, richiamiamo di seguito i principi da questo adottati per rivedere la metodologia PHS (è parere degli scriventi che un indice di screening come il WBGT non dovrebbe nemmeno essere preso in considerazione per esaminare casi ad alta criticità).

a) Innanzitutto occorre determinare l'impatto dei DPI, abbigliamento incluso, sul tasso metabolico. Questo risulterà aumentato quando il lavoratore indossa un abbigliamento diverso da quello *standard*² e la BS 7963 propone con la tabella 3.2, una serie di fattori correttivi da aggiungere al tasso metabolico determinato in base agli sforzi compiuti dal lavoratore,

¹ Per la precisione i metodi esistenti cui si fa riferimento sono:

- EN 12515:1997, recepita in Italia con la UNI EN 12515:1999 "Ambienti caldi - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico mediante calcolo della sudorazione richiesta", sostituita nel 2005 dalla UNI EN ISO 7933:2005 "Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile
- EN 27243:1993, recepita in Italia con la UNI EN 27243:1996 "Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro)", sostituita nel 1997 dalla UNI EN ISO 7243:2017 "Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT (temperatura globo del bulbo bagnato)"

Ad ogni modo le correzioni proposte dalla BS 7963 si applicano quasi identicamente anche alle più recenti revisioni delle norme citate nello standard UK.

² Con abbigliamento da lavoro standard si intende un insieme di capi leggeri, in termini di isolamento termico, e permeabili all'aria e al vapore: indice di isolamento termico (I_{cl}) pari a 0.6 e indice di permeabilità (i_m) pari a 0.38 (cfr UNI EN ISO 7243:2017).



tramite la UNI EN ISO 8996:2005 (“Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico”).

- b) Quindi sarà necessario valutare se l'isolamento termico dell'abbigliamento sia effettivamente da correggere per tenere conto degli effetti dinamici. La procedura PHS prevede di applicare questa correzione comunque, ma se l'abbigliamento indossato è attillato o addirittura completamente incapsulante, andrebbe impedita questa correzione imponendo che il parametro $I_{cl\ dyn}$ assuma lo stesso valore del parametro I_{cl} , ammesso che sia fattibile con i tool software che si hanno a disposizione.
- c) Sempre con riferimento all'abbigliamento, nel caso in cui questo abbia un'alta resistenza all'evaporazione o, al limite, sia impermeabile, andrà tenuto conto di ridurre, se non eliminare, la quota di calore ceduta dal corpo all'ambiente per evaporazione del sudore.
- d) Per rendere conto infine della limitata capacità del corpo di disperdere calore per evaporazione, la norma suggerisce di imporre una velocità dell'aria non superiore a 0.1 ms^{-1} . In questo modo si riduce anche la quota di calore che sarà ceduta per convezione, considerato che questa quota è anch'essa inferiore a quella che si sarebbe avuta se l'abbigliamento fosse stato permeabile al vapore.

Si deve far osservare che gli esiti ottenuti apportando gli aggiustamenti sopra, non possono che risultare peggiori di quelli che si ottengono con l'applicazione della metodica PHS “pura” e risulta pertanto utile condurre una rivalutazione apportando gli aggiustamenti proposti dalla BS 7963 se l'esame compiuto con il metodo PHS restituisce esiti accettabili ma non di totale sicurezza (per esempio tempi limite dell'ordine dell'ora e/o inferiori alla durata del compito). Una mancata rivalutazione, in questi casi, può comportare pesanti sottostime se gli operatori indossano un abbigliamento con isolamento termico e resistenza all'evaporazione molto diversi da quello standard.

5 – VALUTAZIONE DELLO STRESS DA CALDO MEDIANTE MISURAZIONI FISIOLGICHE

La normazione tecnica emessa a livello internazionale fornisce anche un metodo di valutazione dello stress termico a partire dalla determinazione di alcuni parametri fisiologici dell'addetto (UNI EN ISO 9886:2004³).

In questo caso si giunge ad una valutazione riferibile solo allo specifico addetto, con l'implicazione che ne va eseguita una per ognuno dei soggetti esposti, ma con il vantaggio di ottenere un esito che tiene conto di alcune specificità del singolo.

³ “Ergonomia - Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche”



La norma illustra i metodi per la misurazione e l'interpretazione dei seguenti parametri fisiologici:

1. temperatura del nucleo corporeo (body core temperature);
2. temperature della cute;
3. frequenza cardiaca;
4. perdita di massa corporea.

Tenuto conto del grado di invasività e delle difficoltà metrologiche di alcune di queste pratiche, l'unica utilizzabile sul campo per valutazioni di igiene industriale è quella della misurazione della frequenza cardiaca. Tuttavia anche questa presenta una serie di limiti: l'impossibilità di restituire i risultati in tempo reale, una certa arbitrarietà nella determinazione degli extra-battiti cardiaci riconducibili all'innalzamento termico del nucleo corporeo e una scarsa praticabilità sul campo, considerato che per ogni esposizione al calore ritenuta pericolosa, si deve prevedere l'interruzione dal lavoro dell'addetto allo scopo di eseguire una misurazione della frequenza cardiaca in un ambiente a temperatura controllata con il soggetto a riposo e per un tempo prolungato (almeno 15 minuti).

Esistono tuttavia soluzioni che, pur non godendo dell'*imprimatur* di un organo di normazione, possono risultare utili per giungere ad un'attendibile e praticabile valutazione individuale dello stress termico basata sul monitoraggio della frequenza cardiaca.

Con il precedente articolo (Merlino et al, 2018) abbiamo illustrato il metodo elaborato da Mark J. Buller nel 2013 (Buller et al, 2013), il quale ha dimostrato che la frequenza cardiaca HR può essere letta come una funzione della temperatura del nucleo t_{cr} , distorta da rumore e filtrata applicando un filtro Kalman. Il sistema restituisce risultati paragonabili a quelli della misura della temperatura esofagea e, pur non potendolo ritenere sostitutivo della misura diretta della t_{cr} , risulta sufficientemente accurato nel fornire un'indicazione operativa della sollecitazione termica del personale nei luoghi di lavoro.

Con un successivo studio del 2015 (Buller et al, 2015) è stata esaminata la performance dell'algorithm nella stima della T_{cr} nel caso di personale di primo intervento, vestito con abbigliamento protettivo completamente incapsulante. L'esito è stato molto buono.

Per valutare la performance dell'algorithm gli autori hanno esaminato le differenze tra le temperature misurate direttamente mediante termometri in forma di pillola ingeribile e quelle stimate dall'algorithm che elabora i dati sulla frequenza cardiaca.

L'algorithm si è confermato come affidabile e utilizzabile anche nei casi in cui gli addetti indossino abbigliamento protettivo di tipo CBRNE (Chemical Biological Radiological Nuclear and Explosive Equipment).

Nel lavoro del 2015 gli autori conducono anche una disamina dei limiti del metodo ed evidenziano che il modello necessita di essere testato su una popolazione più ampia e più eterogenea; l'attuale è infatti stato verificato su



un gruppo piuttosto omogeneo di soggetti, soprattutto in termini di età e forma fisica (si trattava di militari dell'esercito americano sottoposti ad annuali test sullo stato di salute).

Si fa notare inoltre che il modello lavora al meglio se è nota la temperatura interna iniziale. Tuttavia potrebbero essere numerose le circostanze in cui questo dato è ignoto, ma in questi casi si può fornire una temperatura ipotetica, per esempio 37.1 °C, tenendo conto che l'incertezza sul risultato aumenta. Prove fatte in questo senso hanno restituito valori ancora accettabili dei parametri utilizzati per validare il buon comportamento del modello.

Il lavoro si conclude ribadendo che il monitoraggio individuale dello stress termico è molto importante poiché le risposte organiche alle sollecitazioni termiche degli individui possono essere diverse, anche a parità di compito lavorativo. L'algoritmo di calcolo della temperatura interna del corpo elaborato da Buller e colleghi è in grado di fornire stime ragionevolmente valide della temperatura interna in diversi contesti. Inoltre l'algoritmo, se utilizzato congiuntamente a un sistema di monitoraggio della frequenza cardiaca indossato dal lavoratore, consentirebbe di rilevare lo stress termico dell'individuo in tempo reale permettendo così di prevenire eventuali malattie o incidenti dovuti all'eccesso di calore, oltre che a gestire al meglio i programmi di lavoro.

È parere degli scriventi che questa metodologia, per quanto ai suoi albori, risulti preziosa già oggi per esaminare i casi maggiormente critici di esposizione allo stress termico da caldo. Dopo averne sperimentato l'uso nell'estate del 2018 ed averne restituito l'esito al convegno dBA di quell'anno, con il 2019 abbiamo iniziato ad adottarla per condurre i nostri accertamenti tecnici di stress termico laddove i metodi standardizzati presentano i limiti illustrati sopra.

6 – DISPOSITIVI PER IL MONITORAGGIO

Sul mercato sono presenti dispositivi per il monitoraggio di diversi parametri riferiti allo stato di attività e di salute umana. Alcuni integrano anche una stima della temperatura del nucleo (o temperatura rettale) quale grandezza derivata dalla frequenza cardiaca e tra questi citiamo il dispositivo chiamato BioHarness della Zephyr e quello denominato EQ02 della Equivital.

Nel corso della nostra prima sperimentazione abbiamo impiegato un dispositivo che restituiva una molteplicità dei parametri, tra cui la temperatura del nucleo; inoltre, grazie a un collegamento radio, consentiva anche il monitoraggio in tempo reale.

d=BA2019



Figura 1. Tipologia di dispositivi adottati da noi per le prime sperimentazioni e indirizzati al monitoraggio di diversi parametri umani correlati alla salute ed all'attività fisica del soggetto



Figura 2. Tipologia di dispositivi per il monitoraggio della frequenza cardiaca da torace da noi valutati per l'adozione in campo.

Nella transizione verso un sistema da adottare correntemente abbiamo provato diversi altri dispositivi, per approdare infine a lettori della sola frequenza cardiaca con tecnologia ottica, tipicamente indirizzati agli sportivi.

L'andamento della temperatura interna è stato da noi ricavato a posteriori elaborando i dati sulla frequenza cardiaca, con l'algoritmo di Buller, reso noto dall'autore come funzione Matlab (Buller et al., 2013).

Questa scelta è stata dettata dalla necessità di condurre grandi quantità di misurazioni. Si ricorda infatti che un accertamento condotto mediante il monitoraggio di parametri fisiologici restituisce risultati riferibili al solo individuo oggetto dell'osservazione e, benché questo costituisca un vantaggio perché consente di valutare il rischio a cui è esposto il soggetto, implica tuttavia la necessità di condurre l'accertamento su tutti i lavoratori. Inoltre, perlomeno in questo primo anno di adozione, abbiamo scelto di condurre osservazioni della durata di una settimana lavorativa per ogni addetto. Questo per garantire che le osservazioni includessero ogni possibile fase lavorativa così da essere ragionevolmente sicuri di non perdere quelle più gravose dal punto di vista dello stress termico e, anzi, che di queste ci fosse qualche ridondanza tra i dati raccolti.

Con queste basi, un ipotetico monitoraggio di 20 addetti per 1 settimana lavorativa ciascuno, può essere svolto mediante 5 sensori nell'arco di 4 settimane o, meglio, mediante 10 sensori nell'arco di 2 settimane. Si capisce tuttavia quanto sia facile che le giornate di osservazione raggiungano il numero di diverse decine, se non il centinaio.

Si tenga conto che è possibile ricavare i valori della temperatura del nucleo a partire da letture della frequenza cardiaca (1 dato al minuto), mediante l'algoritmo di Buller, anche senza scrivere del codice *ad-hoc*. Sul sito Internet della USARIEM (US Army Research Institute of Environmental Medicine) è infatti pubblicato un calcolatore online che implementa lo stesso calcolo (questo l'indirizzo: https://www.usariem.army.mil/index.cfm/modeling/cbt_algorithm#estimate). Noi abbiamo utilizzato questo calcolatore per verificare l'esattezza dei risultati ottenuti con il tool preparato internamente. Per quel che concerne le misurazioni della frequenza cardiaca, abbiamo provato sistemi basati su sensori elettrici (ECG) e dispositivi ottici, da torace i primi, da polso o braccio i secondi. Il miglior compromesso tra affidabilità, costo, maneggevolezza e facilità di utilizzo, a nostro parere, è raggiunto dai sensori ottici da indossare sul braccio. Noi abbiamo scelto un modello a 6 LED.



Figura 3. Tipologia di dispositivo da noi adottato per gli accertamenti di igiene industriale (cardiofrequenzimetro da braccio con tecnologia ottica a sei LED)



Nell'utilizzo su un campione di circa 50 persone abbiamo riscontrato delle perdite di dati per mancata lettura della pulsazione cardiaca. Tali lacune si sono presentate in numero elevato solo su specifici soggetti indicando che probabilmente si tratta di un problema riferibile a casi precisi. Al momento non ne abbiamo individuato la causa che inizialmente avevamo cercato nella colorazione della pelle, ipotesi scartata però dal produttore. Questo è un elemento da approfondire perché, per quanto limitato a pochi casi (3 su 50 nel corso dei nostri monitoraggi dell'estate 2019), se il numero di dati persi è elevato, potrebbe richiedere di adottare un diverso sistema di misura (ad esempio la fascia toracica).

Tornando sui sistemi che implementano a bordo la stima della temperatura interna, si raccomanda di verificare quale sia la procedura di calcolo utilizzata. Con il calcolatore online segnalato sopra è inoltre possibile controllare che i risultati restituiti siano in linea con quelli attesi dal metodo di Buller.

7 – ORGANIZZAZIONE DI UNA CAMPAGNA DI RILIEVI

Ai fini della progettazione della campagna di rilievi si deve tenere conto che la valutazione relativa allo stress termico da caldo mediante il monitoraggio della temperatura interna, prevede di accertare che quest'ultima non superi mai il valore di 38 °C nemmeno per un minuto all'interno della giornata lavorativa (dove 38 °C, come spiegato sopra, comprende già un margine di sicurezza).

Questo implica la necessità che il rilievo sia sufficientemente esteso da includere ogni fase lavorativa che espone l'addetto allo stress termico. Riteniamo inoltre raccomandabile che il monitoraggio inizi in condizioni di riposo, meglio se a inizio turno, così che l'algoritmo di calcolo abbia dati sufficienti perché l'eventuale gap tra l'effettiva temperatura interna iniziale dell'addetto e quella assunta nel calcolo abbia una minima rilevanza nella determinazione della temperatura interna durante le fasi di esposizione al calore. Il valore della temperatura interna iniziale è assunto pari a 37.1 °C nell'algoritmo di Buller (è invece pari a 36.8 °C nella procedura di calcolo PHS). Il metodo riesce comunque a neutralizzare velocemente un eventuale errore anche grossolano nell'attribuzione della temperatura iniziale del soggetto.

Nel corso delle campagne condotte nell'estate 2019 abbiamo monitorato ogni addetto per l'intero turno, per 5 giornate lavorative. Questo ha garantito l'acquisizione dei dati sulla frequenza cardiaca anche nei momenti di maggior stress termico e in occasioni ripetute.

Il monitoraggio strumentale dev'essere corredato da un diario sul quale sono annotati gli orari dei diversi compiti lavorativi svolti e anche i momenti di permanenza in ambienti termicamente non stressanti, così come quelli di riposo e recupero. Questa è un'attività da progettare anzitempo, badando



all'efficienza del processo, per evitare di dover compilare decine se non centinaia di schede con la descrizione e la tempistica di ogni attività che compone l'intera giornata di ogni lavoratore oggetto di osservazione. Un'iniziativa efficace può essere quella di suddividere i compiti lavorativi in classi, da quella a stress termico nullo fino a quella di massima esposizione, fornendo solo per le situazioni termicamente più sollecitanti il dettaglio circa la descrizione dell'attività e l'orario di inizio e fine.

Nella tabella 2 si propone un esempio di suddivisione delle attività lavorative in tre classi:

1. stress termico irrilevante
2. condizioni ambientali non severe ma sforzo fisico medio o intenso
3. condizioni ambientali severe

La seconda classe serve a tenere conto dei casi in cui il surriscaldamento corporeo deriva dall'attività muscolare. Non deve infatti essere trascurata la quota di calore sviluppata internamente da parte di un soggetto che compie sforzi fisici di una qualche rilevanza, soprattutto se l'abbigliamento che indossa non consente un'efficace evaporazione. Per esempio, per un lavoratore impegnato nella pulizia della stiva di una nave, con abbigliamento incapsulante e respiratore, la temperatura interna potrebbe superare i 38 °C in breve tempo anche con una temperatura dell'aria di 18 °C (BS, 2000).

Nella tabella 3 restituiamo come potrebbe essere stilato il diario delle attività di una giornata lavorativa che consenta una corretta interpretazione dei tracciati della temperatura interna, risparmiando nel contempo di annotare informazione di scarsa utilità a questo scopo.

Nella nostra pratica di questo primo anno di applicazione di tale modalità di indagine, abbiamo utilizzato una suddivisione in classi lievemente più articolata, ovvero la seguente:

1. aree con condizioni climatiche di comfort termico, nelle quali i compiti lavorativi comportano dispendio metabolico molto basso
2. aree con condizioni climatiche di comfort termico, nelle quali i compiti lavorativi comportano dispendio metabolico di bassa/media intensità
3. aree con condizioni climatiche di stress termico, nelle quali i compiti lavorativi comportano dispendio metabolico di bassa/media intensità
4. aree con condizioni climatiche di elevato stress termico, nelle quali i compiti lavorativi comportano dispendio metabolico di media/alta intensità



Tabella 2: esempio di suddivisione in classi delle attività lavorative

classe	attività/ambiente (<i>esempi</i>)	abbigliamento protettivo
1 (stress termico irrilevante)	sala controllo climatizzata pulpito climatizzato sala break mensa	--
2 (condizioni ambientali non severe ma sforzo fisico medio o intenso)	riparazioni in officina attività in spazi confinati	<ul style="list-style-type: none"> • guanti • grembiule/giubbotto alluminizzato • elmetto • maschera anti-particolato • respiratore • tuta incapsulante
3 (condizioni ambientali severe)	plancher fronte forno fusorio cambio refrattari manovre in cella calda ispezione sala macchine attracco in ore meridiane	<ul style="list-style-type: none"> • guanti • grembiule/giubbotto alluminizzato • elmetto • maschera anti-particolato • respiratore • tuta incapsulante

Tabella 3: esempio di diario della giornata lavorativa di un manutentore

classe	attività/ambiente	abbigliamento protettivo	start stop
1	--	--	--
3	plancher fronte forno	X guanti X grembiule alluminizzato X elmetto X maschera anti-particolato • respiratore • tuta incapsulante	11:52 12:15
1	--	--	--
2	attrezzaggio pressa	X guanti • grembiule/giubbotto alluminizzato • elmetto • maschera anti-particolato • respiratore • tuta incapsulante ...	14:00 16:10
1	--	--	--

8 – ESEMPI TRATTI DALLE NOSTRE PRIME VALUTAZIONI

Nel seguito sono pubblicati esempi di grafici dove è tracciato l'andamento della temperatura interna nel corso del periodo di osservazione di un singolo lavoratore.

Il tempo si estende, come anticipato, all'intero turno di lavoro e per tutta la settimana lavorativa, così che l'osservazione riferita al singolo operatore si compone di tanti grafici quanti sono le giornate lavorate nella settimana.

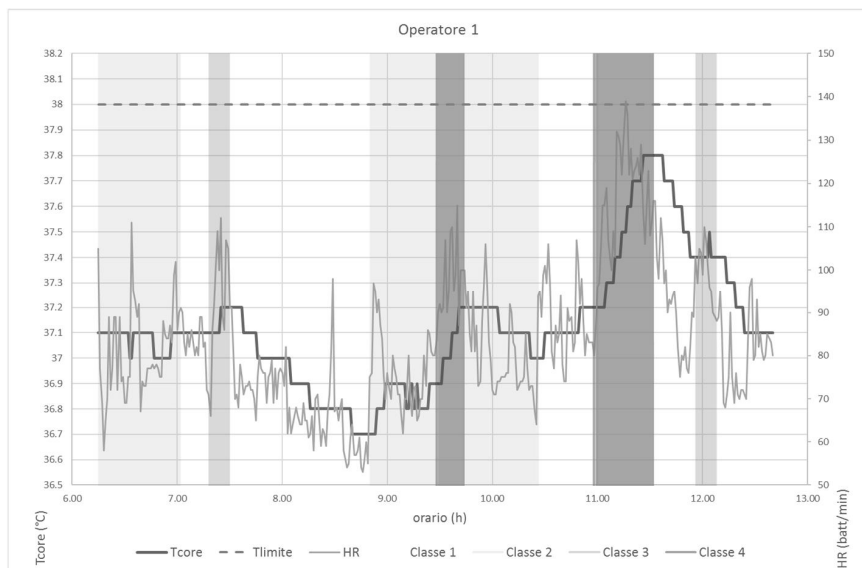


Figura 4. Andamento della grandezza HR misurata nel corso di un intero turno di lavoro e della grandezza Tcore calcolata dai valori della prima. In questo caso la Tcore si mantiene sempre al di sotto del limite di 38 °C.

Il tracciato della temperatura interna (Tcore) è quello con la linea più marcata e si compone di un valore al minuto. La linea più sottile rappresenta la frequenza cardiaca (HR) ed anche questa è rappresentata con un dato ogni minuto. Si precisa che la pulsazione cardiaca è acquisita con la frequenza di un dato al secondo e, considerato che la procedura di calcolo della Tcore elaborata da Buller richiede un dato al minuto, è calcolato il valor medio di HR per ogni minuto a partire dalle singole misurazioni.

Nell'area del grafico sono anche indicate le diverse fasi lavorative, distinte solo in base alla loro classe di appartenenza. Ricordiamo che le fasi termicamente più stressanti sono inserite nelle classi 3 e 4 (fasce più scure nel grafico).

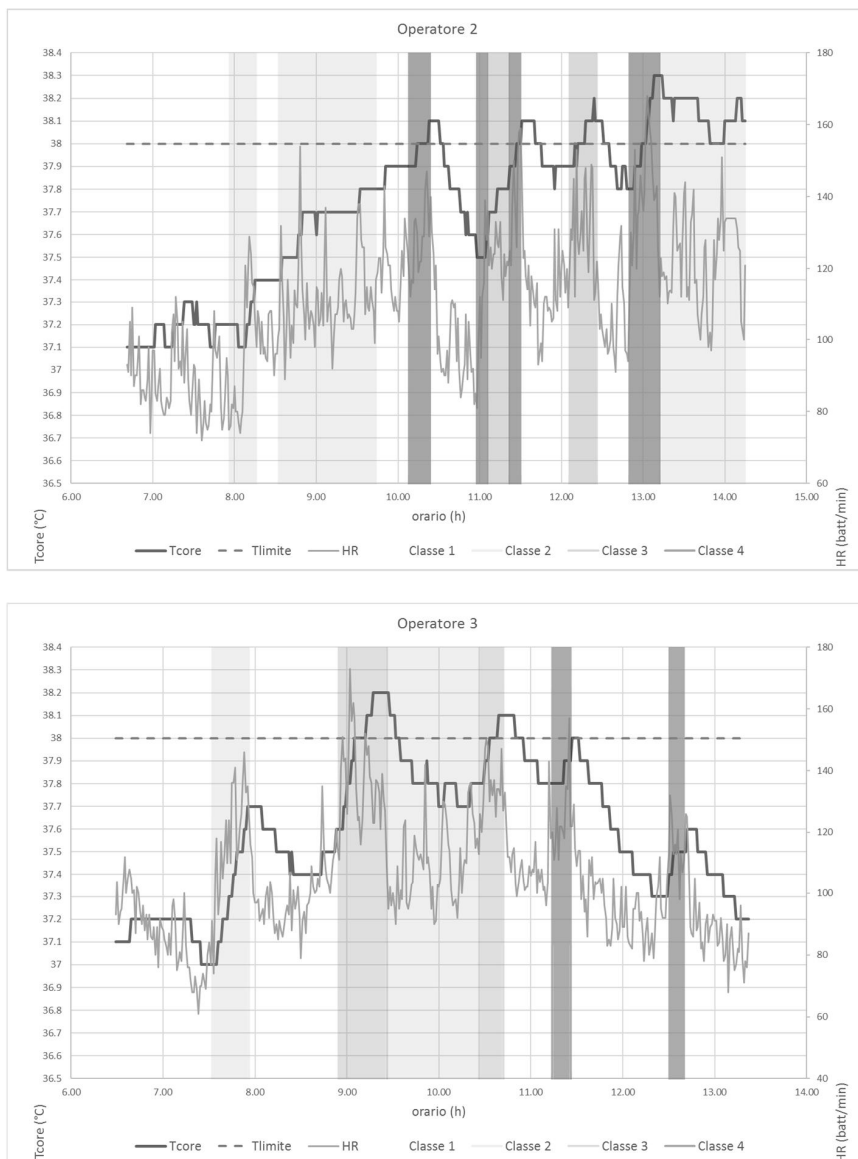


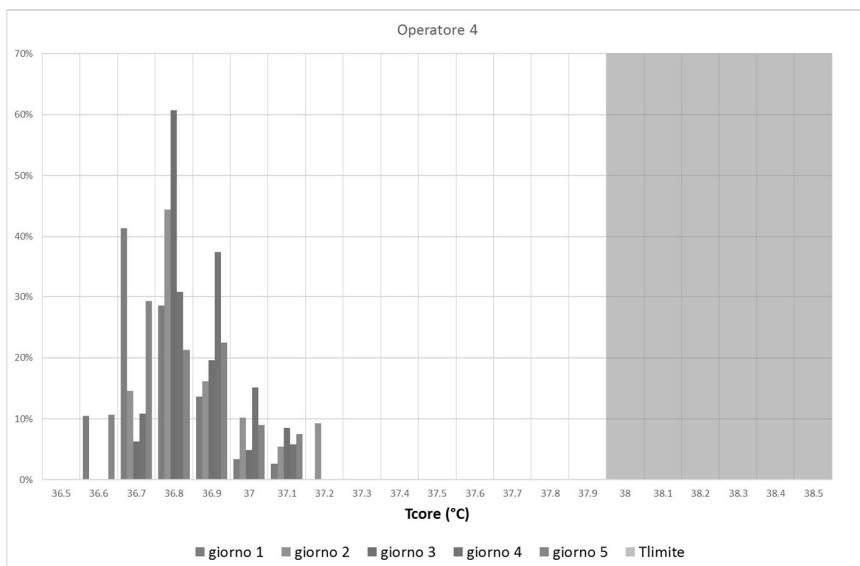
Figure 5 e 6. Andamento delle grandezze HR e Tcore. Nel primo caso la Tcore segue un trend crescente con ripetuti superamenti della temperatura limite di 38 °C. Nel secondo caso la Tcore segue un trend crescente nella prima parte della giornata per poi invertirlo. Si hanno però tre occasioni in cui la Tcore raggiunge o supera la temperatura limite di 38 °C.

Si ricorda che l'esito restituito da una valutazione così condotta è riferibile solo allo specifico lavoratore e non è generalizzabile ad un gruppo omogeneo. Di contro le peculiarità del singolo soggetto sono in qualche modo valorizzate, mentre le procedure basate su rilevazioni delle grandezze ambientali si riferiscono obbligatoriamente al soggetto di riferimento.

Ciò nonostante, considerato che la procedura non include alcuna misurazione della temperatura corporea, la temperatura risultante deve essere considerata comunque una stima e questa sarà tanto più affidabile quanto più il soggetto è in buone condizioni di salute, fattore che comunque la medicina occupazionale dovrà aver già verificato soprattutto per coloro che possono essere esposti a condizioni termiche molto stressanti.

Il contributo della medicina occupazionale è inoltre rilevante per stabilire quanto debba essere ampio il periodo di osservazione di ciascun soggetto al fine di determinare correttamente l'entità del rischio con la tecnica della misurazione della frequenza cardiaca, così come per individuare le modalità con le quali ottenere l'opportuna riduzione dell'esposizione per i soggetti che abbiano raggiunto o superato il limite di 38 °C.

Riportiamo infine esempi di analisi delle frequenze dei dati di temperatura, eseguite sui giorni lavorati da ciascun addetto sotto osservazione, a mezzo delle quali si individua agevolmente se si tratti di un soggetto che si mantiene ben al di sotto della soglia del pericolo di 38 °C o se invece vi si avvicini criticamente o, addirittura, la superi e, nel caso, di quale entità e con quale frequenza.



d-A2019

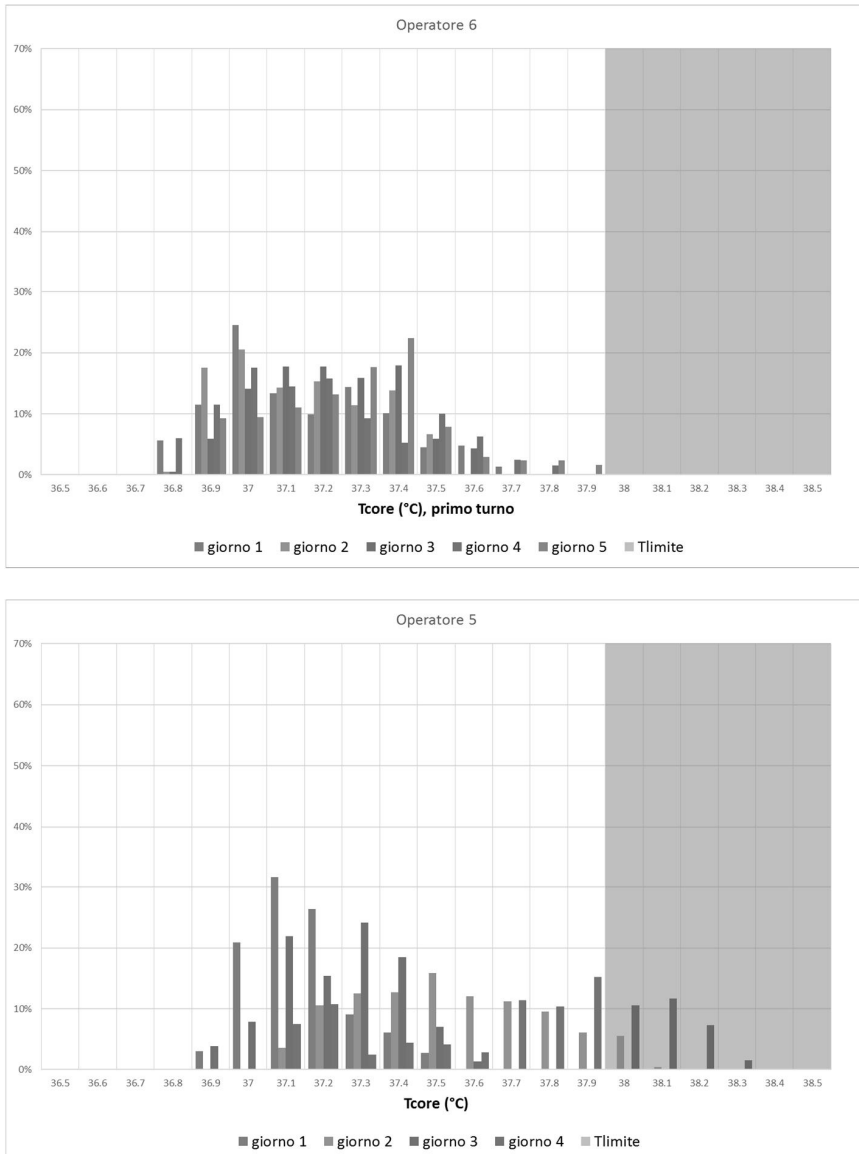


Figure 7, 8, 9. Analisi delle frequenze con cui occorrono i diversi valori della temperatura interna.



Dall'osservazione del primo dei tre grafici si nota che la temperatura interna si colloca sempre intorno al valore iniziale senza importanti scostamenti, per tutti e cinque i giorni sui quali si è protratta la misurazione.

Il secondo grafico mostra che esistono occasioni in cui la temperatura interna si avvicina criticamente al valore limite di 38 °C, per quanto si tratti di casi che si verificano in numero percentualmente molto basso.

Il terzo grafico testimonia invece una situazione nella quale è molto probabile che la temperatura del soggetto superi il valore limite di 38 °C.

9 – CONFRONTO TRA GLI ESITI RESTITUITI DA DUE METODI

In questa sezione restituiamo un confronto tra gli esiti di una valutazione condotta mediante lo standard UNI EN ISO 7933:2005 (PHS) e mediante la procedura non standardizzata definita da Buller per la stima della temperatura interna a partire dalla frequenza cardiaca.

Facciamo riferimento a due casi nei quali abbiamo potuto condurre le misurazioni necessarie ad eseguire entrambe le valutazioni.

Si faccia riferimento alle figure dalla 9 alla 12 dove ognuna delle due coppie di immagini fa riferimento alle due situazioni lavorative distinte.

La figura in alto (immagini 9 e 11) fa riferimento al risultato ottenuto con il metodo PHS. La figura in basso (immagini 10 e 12) fa invece riferimento al risultato ottenuto con il metodo basato sulla procedura di Buller.

Come ci si può attendere, i risultati ottenuti con la procedura PHS appaiono più prudenti rispetto a quelli ottenuti derivando la temperatura interna dalla frequenza cardiaca e questo risponde alla necessità del primo dei due metodi di garantire un opportuno margine di sicurezza, vista la complessità ed anche l'ambizione del metodo stesso che giunge a quantificare una grandezza fisiologica senza alcuna misurazione sulla persona a cui questo parametro si riferisce. Sempre per questo motivo la norma tecnica di riferimento (7933) raccomanda di passare ad un controllo fisiologico **diretto** e **individuale** nei casi in cui la procedura restituisca tempi limite inferiori ai 30 minuti.

Riteniamo ragionevole assumere che il metodo basato sul monitoraggio della frequenza cardiaca restituisca risultati più realistici, più accurati e meglio riferibili al singolo soggetto, per quanto rimanga una stima della temperatura interna e non una misura diretta. A questo proposito si deve tenere in considerazione che la norma dedicata alla supervisione medica degli esposti ad ambienti molto caldi o molto freddi (UNI EN ISO 12894:2002) avverte che anche i metodi basati sulle misurazioni fisiologiche di cui alla 9886 si devono applicare a soggetti sani, ovvero che non presentino alterazioni del controllo fisiologico della temperatura corporea.

d-A2019

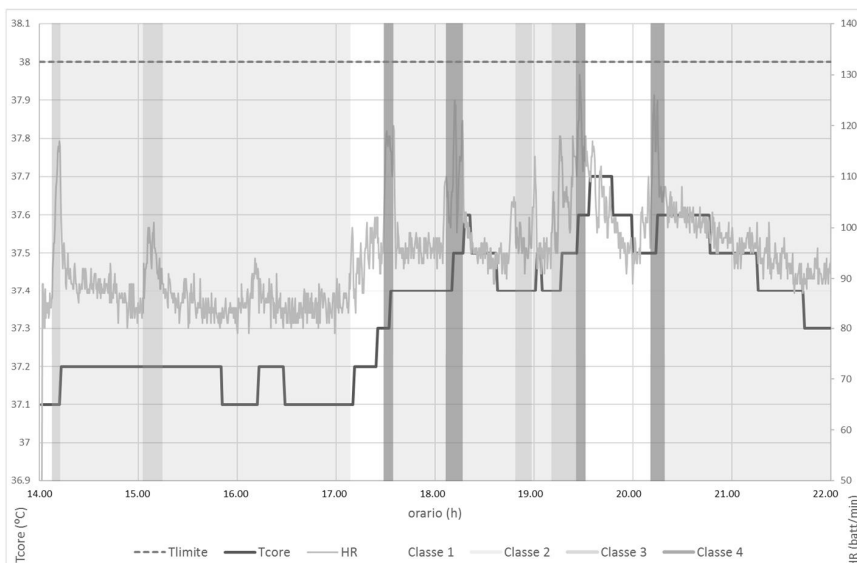
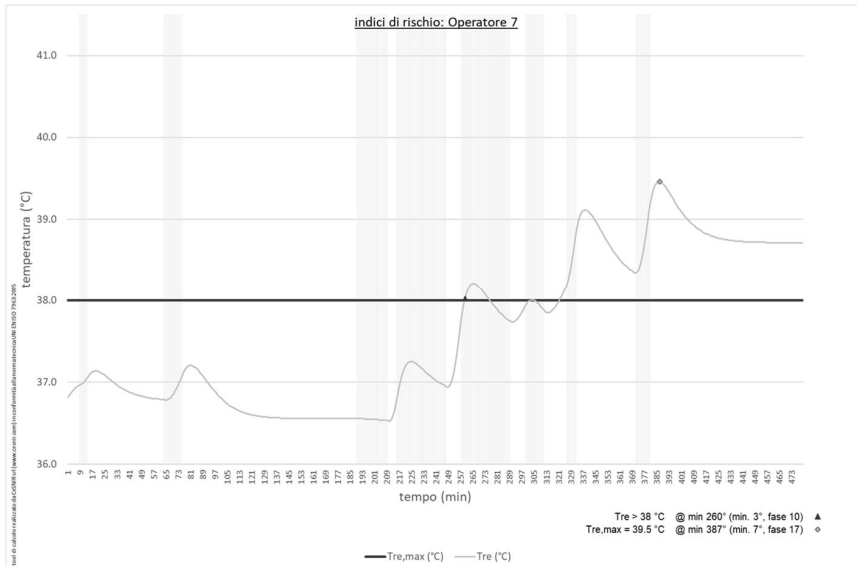


Figure 9 e 10. Nelle due figure è rappresentato l'andamento della temperatura del nucleo così come restituito dall'applicazione delle due differenti procedure. Gli esiti risultano differenti, con il superamento del limite nel primo caso e il rispetto nel secondo.

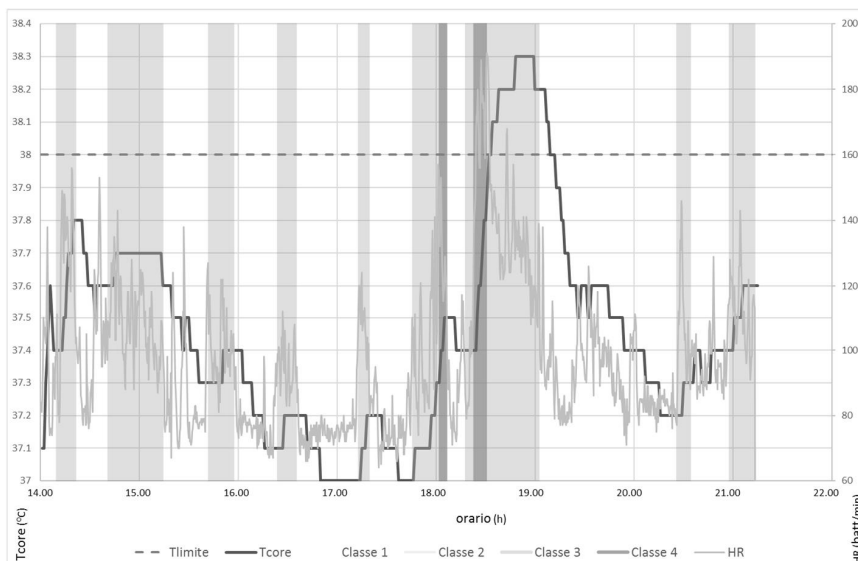
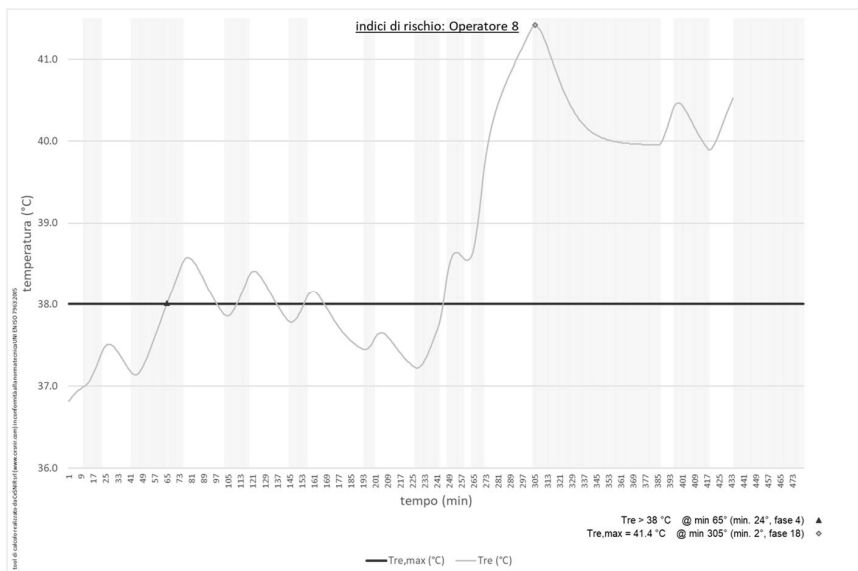


Figure 11 e 12. Nelle due figure è rappresentato l'andamento della temperatura del nucleo così come restituito dall'applicazione delle due differenti procedure. In questo esempio si riscontra il superamento del limite di 38 °C in entrambi i casi ma di misura molto differente.



Ricordiamo inoltre che la metodologia PHS restituisce la temperatura interna del soggetto esposto utilizzando un modello di calcolo che chiede in input le seguenti grandezze:

- temperatura dell'aria (°C)
- temperatura media radiante (°C)
- velocità dell'aria (m/s)
- pressione parziale del vapor d'acqua, (kPa)
- isolamento termico statico dell'abbigliamento indossato dal lavoratore nelle diverse fasi lavorative (clo)
- tasso metabolico associato alle attività compiute (W/m²)
- peso (kg) e altezza (m) del soggetto
- acclimatamento (si/no)
- postura (seduto, in piedi, accovacciato)
- durata di ogni singola esposizione
- eventuale potenza ceduta nel compiere lavoro (W/m²)
- eventuale velocità (m/s) e direzione (°) di camminamento rispetto alla direzione del movimento d'aria.
- frazione della superficie corporea sotto abbigliamento riflettente (Ap, adimensionale)
- fattore correttivo per eventuale abbigliamento riflettente (Fr, adimensionale)
- indice di permeabilità al vapore dell'abbigliamento (im, adimensionale, in realtà fissato dalla norma e pari a 0.38)

Il metodo oggetto del presente lavoro giunge alla stima della temperatura interna del soggetto esposto utilizzando un modello di calcolo che chiede in input esclusivamente il dato seguente:

- frequenza cardiaca del soggetto esposto (bpm).

9 – CONCLUSIONI

Con questo lavoro, prosecuzione di quello presentato nel 2018 in questo stesso convegno, rendiamo conto dell'applicazione nella pratica corrente di igiene industriale del metodo presentato l'anno scorso per condurre gli accertamenti di stress termico da caldo a partire dal monitoraggio della frequenza cardiaca degli esposti. Abbiamo richiamato i limiti dei metodi basati sulle rilevazioni ambientali (metodiche PHS e WBGT) e per i quali si rimanda al lavoro precedente per un'analisi più dettagliata.

La nostra valutazione è che la metodologia basata sul monitoraggio della frequenza cardiaca possa essere un prezioso strumento a servizio dell'igiene industriale ma riteniamo che questa adozione sia possibile e auspicabile aderendo alla soluzione proposta dal ricercatore americano M. J. Buller che consente di tracciare le variazioni della temperatura interna direttamente dalle letture della frequenza cardiaca; confermiamo l'opinione, già espressa nel

lavoro precedente, che la procedura standardizzata proposta dalla UNI EN ISO 9886:2004 sia invece di difficile applicazione pratica e troppo interferente con l'attività aziendale.

L'aspetto più delicato, per quanto contemporaneamente più vantaggioso, è rappresentato dal fatto che i risultati ottenuti sono riferibili esclusivamente alla situazione espositiva esaminata, ovvero allo specifico lavoratore oggetto dell'osservazione, nelle condizioni di lavoro esistenti al momento del monitoraggio. Il metodo si basa infatti sulla misurazione di una grandezza fisiologica (la frequenza cardiaca) con il vantaggio di restituire un risultato che tiene conto di alcune peculiarità della persona osservata, ma con l'implicazione di non consentire di estendere questo risultato ad alcun altro soggetto (si ricordi comunque che anche questo metodo assume che il lavoratore sia sano e che la propria capacità termoregolazione funzioni regolarmente).

Riteniamo che sia necessario lavorare sul fronte delle procedure per la ricerca di una soluzione condivisa su temi come la durata delle misurazioni e l'organizzazione dei rilievi di frequenza cardiaca che, per quanto riferibili al singolo soggetto, si possano considerare ben rappresentativi della variabilità delle esposizioni in cui può incorrere.

Ad oggi suggeriamo di protrarre le misurazioni per la durata di un'intera settimana lavorativa (5 turni di lavoro completi). I costi dei dispositivi per la rilevazione della frequenza cardiaca non rappresentano una difficoltà all'esecuzione di misurazioni così estese e su più lavoratori in contemporanea, mentre occorre progettare con cura la modalità di redazione del diario che può invece avere costi importanti. Per mantenere questi ultimi sotto controllo, una soluzione sarebbe quella di far stendere il diario ai soggetti monitorati, ma va tenuto conto che una corretta compilazione di questo è fondamentale per l'interpretazione dei risultati e, sulla base della nostra esperienza, questa soluzione non si è rivelata funzionale. Occorre valutare bene come ottenere una compilazione puntuale del diario, eventualmente incaricandone un terzo. Un ulteriore sviluppo può essere quello di includere delle misurazioni di temperatura corporea nei casi dubbi o in quelli di superamento del limite, ricorrendo a tecniche poco invasive come quella della misura della temperatura timpanica con sensori senza contatto, ammesso che una rivalutazione delle tecniche più moderne restituisca maggiore affidabilità di questo metodo rispetto a quanto stabilito dall'ultima edizione della 9886 risalente al 2002.

Concludiamo auspicando che l'attenzione degli igienisti verso questo agente di rischio cresca ancora e che i futuribili apporti tecnici e scientifici sul tema coniughino al meglio accuratezza e praticabilità.



10 – BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] M. J Buller *et al.* (2013) *Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations*, *Physiological Measurement*, 34, 781-798
- [2] M. J. Buller *et al.* (2015) *Real-time core body temperature estimation from heart rate for first responders wearing different levels of personal protective equipment*, *Ergonomics*, 58:11, 1830-1841
- [3] A. Merlino, G. Gambino, G. Quadrio (2018) *Valutazione dello stress termico per lavoratori sottoposti ad alti carichi, in regime di non applicabilità delle metodiche WBGT e PHS*, atti del convegno nazionale dBA 2018 (Bologna, 17 ottobre 2018)
- [4] NIOSH (1986), *Occupational exposure to hot environments*, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No 86-113, Washington DC, USA
- [5] UNI EN 12515:1999 *Ambienti caldi - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico mediante calcolo della sudorazione richiesta*
- [6] BS 7963:2000 *Guide to the assessment of heat strain in workers wearing personal protective equipment*
- [7] UNI EN ISO 12894:2002 *Ergonomia degli ambienti termici - Supervisione medica per persone esposte ad ambienti molto caldi o molto freddi*
- [8] UNI EN ISO 9886:2004 *Ergonomia - Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche*
- [9] UNI EN ISO 7933:2005 *Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile*
- [10] UNI EN ISO 7243:2017 *Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT (temperatura globo del bulbo bagnato)*
- [11] *Core Body Temperature Estimation From Heart Rate*, US Army Research Institute of Environmental Medicine (USARIEM), 13 June 2014, http://www.usariem.army.mil/index.cfm/modeling/cbt_algorithm