

UTILIZZO DEI PARAMETRI CARDIACI PER UNA VALUTAZIONE FISIOLÓGICA DEI LAVORATORI ESPOSTI AL RISCHIO DA SOVRACCARICO BIOMECCANICO

PREMESSA - LA FREQUENZA CARDIACA

La frequenza cardiaca (FC), è il numero di battiti del cuore al minuto. Il cuore ha la capacità di generare il proprio ritmo tramite specifiche "cellule pacemaker".

La FC dipende da molti fattori, tra cui l'età, lo stato di salute generale, il livello di attività muscolare e lo stato emotivo. Quando si fa esercizio fisico o quando si è eccitati, ansiosi o spaventati, la FC aumenta. Le cellule pacemaker del cuore ricevono input dal Sistema Nervoso Autonomo (SNA) che ne modificano la frequenza. L'aumento dell'attività dei neuroni simpatici causa un incremento della FC. L'aumento dell'attività dei neuroni parasimpatici, invece, diminuisce la FC. In ogni momento il cuore riceve simultaneamente segnali dal sistema nervoso simpatico e parasimpatico, che agiscono in direzioni opposte. L'aumento o la diminuzione della FC dipende dai livelli di attività delle due componenti. Inoltre, anche il livello di adrenalina circolante agisce sul cuore: l'incremento determina un aumento della FC. Durante l'esercizio fisico, l'attività del sistema nervoso simpatico a livello del cuore aumenta e porta a un aumento della FC e del volume sistolico con conseguente aumento della gittata cardiaca.

L'azione antagonista dei sistemi simpatico e parasimpatico, in assenza di condizioni di stress fisici o psichici, comporta una variabilità della FC con una differenza di alcuni millisecondi tra un battito e l'altro; viceversa, fattori di stress fisici o psichici agiscono sulla variabilità della frequenza cardiaca, rendendola molto regolare e con scarse variazioni.

LA FC IN AMBITO OCCUPAZIONALE

In ambito occupazionale la FC viene spesso utilizzata per valutare l'impegno fisico dei lavoratori in contesti lavorativi scarsamente standardizzati e in cui i fattori di rischio biomeccanico a cui sono esposti non possono essere valutati in maniera efficace con le sole metodiche osservazionali. Lo stesso protocollo NIOSH (NIOSH, 1994) nel suo manuale prevede che se "le attività diverse da quelle di sollevamento (spinta, traino, trasporto, cammino, mantenimento di oggetti) eccedono del 10% il totale dell'attività lavorativa le misure del dispendio energetico e/o della FC sono richieste per valutare la domanda metabolica di ognuna delle differenti task" (<https://doi.org/10.26616/NIOSH-PUB94110-revised092021>).

Anche all'interno della norma tecnica ISO 11228-1, che tratta la valutazione del rischio delle attività di movimentazione manuale dei carichi, si possono trovare dei riferimenti all'utilizzo della FC. All'interno dell'Allegato D.1, la norma cita che "a seconda degli specifici compiti, l'analista può integrare l'analisi del sollevamento con ulteriori analisi. Questo può essere auspicabile quando posture o movimenti estremi sono usati nei compiti di

sollevamento, o per stabilire le richieste metaboliche di tutti i compiti coinvolti". Gli aspetti metabolici in ambito occupazionale sono diversi. Tra questi la FC rappresenta il parametro più semplice e immediato da monitorare. L'analisi della FC può essere un approccio valido per la valutazione del rischio in attività lavorative in cui sono coinvolti grandi distretti muscolari (movimentazione manuale di carichi monocompiti, composti, variabili e sequenziali, movimentazione dei pazienti, attività di spinta e traino), in attività in cui i lavoratori stanno per molto tempo con le mani oltre l'altezza delle spalle (c.d. "overhead work") o, più in generale, in mansioni che prevedono un'alta variabilità delle tipologie lavorative (NIOSH, 1994). L'analisi della FC invece non è indicata per attività in cui sono coinvolti piccoli distretti muscolari (movimenti ripetuti dell'arto superiore).

LE TECNOLOGIE INDOSSABILI PER LA REGISTRAZIONE DELLA FREQUENZA CARDIACA

La tecnologia più affidabile per il monitoraggio della FC è quella degli holter portabili. Questi dispositivi sono affidabili per il monitoraggio e quasi sempre certificati come dispositivi medici. Potrebbero risultare però poco pratici durante reali attività lavorative vista la presenza di numerosi elettrodi e cavi che potrebbero interferire con i movimenti del lavoratore.

In ambito occupazionale la FC può essere monitorata più agevolmente tramite le fasce toraciche o gli smartwatch. La fascia toracica rileva gli impulsi elettrici del cuore analogamente a quanto avviene in un elettrocardiogramma. È importante che venga indossata correttamente, a contatto con la pelle, appena sotto lo sterno e regolata in modo appropriato, per garantire la stabilità ed evitare lo scivolamento causato dalla sudorazione. Le più recenti fasce toraciche integrano, oltre ai parametri fisiologici legati all'attività del muscolo cardiaco, anche una sensoristica inerziale per il monitoraggio della postura del tronco. Queste fasce più evolute permettono la registrazione di parametri fisiologici e cinematici anche per l'intera durata del turno di lavoro. Gli smartwatch monitorano la frequenza cardiaca grazie a sensori ottici che analizzano le variazioni del flusso sanguigno nei tessuti sottostanti.

Un'ulteriore tecnologia per monitorare la FC che si sta sviluppando, per ora in ambito sportivo, è la fascia da braccio. Basata anch'essa su sensori ottici, viene indossata sulla parte superiore del braccio compresa tra il bicipite e il deltoide. Rispetto alla fascia toracica presenta una facilità nella vestizione, non stringe il petto e non richiede di inumidire gli elettrodi.

L'accuratezza della rilevazione di smartwatch e fasce da braccio, trattandosi di dispositivi ottici basati su tecnologia pulsossimetrica, può essere influenzata da diversi fattori, come la presenza di peli, tatuaggi, strati di indumenti o dal colore della pelle.

Dal punto di vista della misura della FC è bene precisare che, mentre le fasce cardiache registrano l'attività vera e propria del muscolo cardiaco (Heart Rate), gli smartwatch misurano la FC distale (Pulse Rate). La precisione del monitoraggio della FC con gli smartwatch odierni, anche di quelli non top di gamma, è comunque arrivata a livelli di affidabilità analoga a quella delle fasce cardiache.

VALUTAZIONE DELL'IMPEGNO FISICO DEI LAVORATORI TRAMITE FC

In letteratura sono presenti diversi metodi per valutare l'impegno fisico dei lavoratori analizzando la FC. Un primo studio pilota (Astrand, 1960) ha proposto come limite massimo accettabile per un periodo lavorativo di 8 ore 120-130 bpm per lavoratori "giovani" e 100-110 bpm per lavoratori "anziani". Più recentemente è stato proposto come limite massimo accettabile che può essere mantenuto durante un normale turno lavorativo di 8 ore una FC compresa tra

105 e 110 bpm oppure una FC di + 30/35 bpm rispetto alla FC a riposo (Sammito, 2024). Un ulteriore approccio è quello dell'analisi della FC media secondo la classificazione (Tabella 1) proposta dall' American Industrial Hygiene Association (AIHA,1971). L'AIHA specifica che dal livello "moderato" le pause sono necessarie. La FC media, pur essendo di facile interpretazione, può rappresentare un indicatore poco sensibile nei contesti lavorativi reali caratterizzati da elevata variabilità delle attività. In particolare, essa tende a "diluire" nel tempo eventuali picchi di lavoro intenso, che possono invece rappresentare le fasi più critiche in termini di affaticamento e rischio per il lavoratore, portando a una possibile sottostima del carico reale. Per sopperire parzialmente a questo limite è opportuno monitorare il lavoratore per l'intera durata della registrazione, annotare gli istanti degli eventi ritenuti significativi di un possibile incremento della FC e verificarli successivamente nel tracciato registrato.

Tabella 1		Classificazione proposta dall'AIHA	
Livello di attività		Range FC (bpm)	
Riposo, seduto		60-70	
Molto leggero		65-75	
Leggero		75-100	
Moderato		100-125	
Pesante		125-150	
Molto pesante		150-180	
Eccessivamente pesante		180+	

Oltre al semplice valore medio, altri approcci per valutare l'impegno dei lavoratori sulla base della FC sono il Costo Cardiaco Assoluto¹ (CCA) ed il Costo Cardiaco Relativo² (CCR) (Tabella 2). Il primo è un indice del carico di lavoro ed il secondo la percentuale di riserva di frequenza cardiaca. L'analisi del CCA e del CCR è indicata quando si vuole conoscere l'impegno dei lavoratori per lunghi periodi di lavoro (intero turno). Di seguito le formule per il loro calcolo:

${}^1\text{CCA} = \text{FC}_{\text{media}} - \text{FC}_{\text{rip}}$ ${}^2\text{CCR} = \text{CCA} / (\text{FC}_{\text{max}} - \text{FC}_{\text{rip}}) \cdot 100$

dove FC_{media} è la FC media durante l'attività lavorativa, FC_{max} è la FC massima teorica per ogni lavoratore e FC_{rip} è la FC a riposo. La FC a riposo deve essere presa, possibilmente, in una stanza silenziosa, ad una temperatu-

ra confortevole, senza luci intense ed evitando l'uso di smartphone per un periodo di almeno 10-15 minuti. Una considerazione va fatta sulla FC massima teorica, necessaria per ottenere il CCR. La FC massima teorica viene solitamente calcolata con la formula più conosciuta, ovvero 220-età (Fox,1971). La formula di Fox sembrerebbe sottostimare la FC massima teorica in persone con più di 40 anni (Tanaka, 2001). La letteratura evidenzia anche altre formule che si propongono di calcolare la FC massima teorica a partire dall'età. L'applicazione di queste formule potrebbe fornire valori anche molto differenti tra di loro. Nel contesto occupazionale il peso che, complessivamente, ha questo aspetto è comunque relativamente poco influente nel computo generale dei parametri legati all'attività cardiaca dei lavoratori.

Tabella 2				Classificazione del livello di impegno sulla base di CCA e CCR			
Livello di attività		CCA (bpm)		Livello di attività		CCR (%)	
Molto leggero		0-9		Molto leggero		0-9	
Leggero		10-19		Leggero		10-19	
Moderato		20-29		Moderato		20-29	
Pesante		30-39		Pesante		30-39	
Molto pesante		40-49		Più che pesante		40-49	
				Molto pesante		50-59	
				Intenso		60-69	

Un ultimo approccio che può essere considerato per valutare il livello di impegno a breve termine dei lavoratori (1-2 ore), è quello dei criteri di Frimat (1988). Il metodo prevede l'analisi di cinque parametri: 1) FC media dell'acquisizione, 2) FC di picco nell'acquisizione,

3) CCA, 4) CCR, e 5) accelerazione della FC (ΔFC): $FC_{\text{picco}} - FC_{\text{media}}$. Ogni parametro riceve un punteggio in base al valore (Tabella 3); la somma dei punteggi dei cinque parametri determina il livello di impegno del lavoratore (Tabella 4).

Tabella 3		Punteggi per i cinque parametri del coefficiente di Frimat			
Punti	CCA (bpm)	CCR (%)	FC_{picco} (bpm)	FC_{media} (bpm)	ΔFC (bpm)
1	10-14	0.10-0.14	110-119	90-94	20-24
2	15-19	0.15-0.19	120-129	95-99	25-29
4	20-24	0.20-0.24	130-139	100-104	30-34
5	25-29	0.25-0.29	140-149	105-109	35-39
6	>30	>0.30	>150	>110	>40

Tabella 4		Classificazione del livello di impegno dei lavoratori	
Punteggio Totale		Classificazione	
25		Estremamente pesante	
24		Molto pesante	
22		Pesante	
20		Stressante	
18		Soportabile	
14		Leggero	
12		Molto leggero	
≤ 10		Lavoro minimo	

STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE FUTURE

Le moderne tecnologie indossabili, compresi gli smartwatch, permettono la registrazione della FC in maniera facile, affidabile, non invasiva e a basso costo nei reali contesti lavorativi e anche una sua facile interpretazione ai fini della valutazione dei rischi occupazionali. I nuovi dispositivi permettono di registrare anche un altro parametro legato all'attività cardiaca che potrebbe essere monitorato per misurare il livello di impegno fisico del lavoratore ovvero l'Heart Rate Variability (HRV) (Sammito, 2024). Con l'HRV si monitora il tempo che intercorre tra un battito e l'altro, un aspetto fisiologico regolato dal SNA. Bassi valori di HRV indicano una prevalenza dell'attività simpatica del SNA associata ad una situazione "stressante" come lo sforzo fisico, ma anche un imminente pericolo o uno stato di ansia. Al contrario, alti valori di HRV sono associati ad una prevalenza dell'attività parasimpatica che bilancia l'attività simpatica favorendo riposo e recupero. Essendo l'HRV regolata dal SNA si può considerare un parametro più "fine" rispetto alla semplice analisi della FC, perché consente di valutare il funzionamento combinato di vari sistemi (cardiovascolare, nervoso, respiratorio, metabolico) rappresentando un indice attendibile delle condizioni fisiche come anche

della capacità di recupero e della tolleranza allo stress. Attualmente il monitoraggio dell'HRV in ambito occupazionale presenta delle limitazioni che ne impediscono il suo utilizzo come indicatore del livello di esposizione al rischio da sovraccarico biomeccanico del lavoratore. Contrariamente alla FC, non sono presenti in letteratura livelli base di riferimento standardizzati e non esistono classificazioni del livello di impegno del lavoratore come succede per la semplice FC. Inoltre, per il monitoraggio in continuo dell'HRV, i moderni smartwatch non hanno ancora raggiunto livelli di precisione paragonabili a quelli delle fasce cardiache o degli holter rendendo la sua misurazione meno semplice rispetto alla FC.

CONCLUSIONI

In conclusione, la FC si conferma essere un parametro fisiologico che può essere direttamente correlato al livello di impegno fisico dei lavoratori, facilmente monitorabile in reali contesti lavorativi, in particolare quelli che presentano un'alta variabilità della mansione (NIOSH, 1994), come agricoltura, silvicoltura, pesca, edilizia, GDO, logistica, raccolta rifiuti porta a porta, movimentazione bagagli, movimentazione pazienti senza alterare la normale attività lavorativa ed a costi accessibili anche per le PMI. La FC può essere anche un

valido supporto nel valutare le attività di sollevamento standardizzate che possono presentare difficoltà nella oggettiva misurazione di tutti i parametri necessari al calcolo dei vari indici presenti nella norma ISO 11228-1 (variabile, composito e sequenziale). Vista la facilità di registrazione, la non invasività delle attrezzature utilizzate e anche l'impossibilità di utilizzare le comuni metodologie di valutazione del rischio biomeccanico la FC e, con meno frequenza l'HRV, stanno iniziando ad essere utilizzati, integrati con altre metodiche strumentali quali elettromiografia di superficie e sensoristica inerziale, nel monitoraggio dei parametri fisiologici per verificare l'efficacia degli esoscheletri occupazionali (ISO/CD 25563, 2026) per

la riduzione del rischio da sovraccarico biomeccanico. La Tabella 5 riassume vantaggi e svantaggi nell'utilizzo degli aspetti legati all'utilizzo della FC in ambito occupazionale per valutare l'impegno fisico dei lavoratori. Data la multifattorialità dell'insorgenza delle patologie muscolo-scheletriche, per una valutazione del rischio più completa dell'impegno fisico del lavoratore, un approccio multidisciplinare che preveda l'analisi sia con metodiche osservazionali, ove applicabili, che di tipo strumentale, rimane comunque la soluzione migliore per poter comprendere meglio quali sono i fattori di rischio che più influenzano la mansione che si intende analizzare e per verificare l'efficacia delle soluzioni proposte.

Tabella 5 Principali vantaggi e svantaggi dell'utilizzo della FC in ambito occupazionale	
PRO	CONTRO
Metodica non invasiva, a basso costo e con attrezzatura facile da usare.	Alcuni approcci potrebbero essere poco sensibili e non catturare l'efficacia di eventuali interventi migliorativi.
Attrezzatura resistente (per acquisizioni sul luogo di lavoro con lavoro fisico pesante o condizioni ambientali critiche come caldo, freddo e umidità).	Non c'è una correlazione di sovraccarico con uno specifico distretto posturale/muscolo.
Possibilità di registrare attività lavorative non standardizzate per l'intero turno di lavoro.	La FC può dipendere da fattori fisiologici non influenzabili (età, ritmo circadiano, genetica, genere), dallo stile di vita (consumo di alcool, fumo, obesità, livello di allenamento, tensione mentale/stress), da fattori esterni (temperatura, rumore, lavoro a turni) e da patologie.
Facilità nell'elaborazione e nell'analisi dei dati.	Applicabile solo in attività lavorative dove sono coinvolti grandi gruppi muscolari. Non è indicata per attività in cui sono coinvolti piccoli distretti muscolari.
Analisi specifica per ogni lavoratore.	La valutazione è riferita al singolo lavoratore e non generalizzabile alla postazione di lavoro.

PER ULTERIORI INFORMAZIONI

Contatti: al.silvetti@inail.it; a.papale@inail.it

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

AIHA. Ergonomics Guide to assessment of metabolic and cardiac costs of physical work. Am Ind Hyg Assoc J. 1971;32(8):560-564.

Astrand I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. Acta Physiol Scand Suppl. 1960; 49(169):45-59.

Frimat P, et al. Utilisation d'une grille d'évaluation de l'astreinte cardiaque. Rev Med Trav 1988;15(4):159-160.

ISO/CD 25563 - Ergonomics - Process for the integration of wearable physical assistive devices (exoskeletons) - Expression of needs selection, design, assessment and deployment. Geneva: ISO; 2026.

Sammito S, et al. Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational health science. J Occup Med Toxicol. 2024;19(1):15.

Tanaka H, et al. Age-predicted maximal heart rate revisited. J Am Coll Cardiol. 2001;37(1):153-156.

PAROLE CHIAVE

Sovraccarico biomeccanico; Ergonomia; Valutazione del rischio