

LA VALUTAZIONE STRUMENTALE E IN TEMPO REALE DEL RISCHIO DA SOVRACCARICO BIOMECCANICO

INAIL

2023

COLLANA SALUTE E SICUREZZA



LA VALUTAZIONE STRUMENTALE E IN TEMPO REALE DEL RISCHIO DA SOVRACCARICO BIOMECCANICO

INAIL

2023

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Autori

Alberto Ranavolo, Giorgia Chini, Francesco Draicchio, Tiwana Varrecchia

Redazione editoriale e grafica

Claudia Branchi, Pina Galzerano, Emanuela Giuli, Laura Medei

Immagine di copertina

Immagine realizzata da Alberto Ranavolo all'interno del LEF - Lean Experience Factory di San Vito al Tagliamento

per informazioni

Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale
Via Fontana Candida,1 - 00078 Monte Porzio Catone (RM)
dmil@inail.it, a.ranavolo@inail.it
www.inail.it

© **2023 Inail**

ISBN 978-88-7484-821-8

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Tipolitografia Inail - Milano, novembre 2023

PREMESSA

Questa monografia è stata realizzata con l'intento di rendere fruibili i risultati delle attività di ricerca svolte dal Laboratorio di ergonomia e fisiologia (LEF) del Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale (Dimeila) sul tema della valutazione strumentale del rischio da sovraccarico biomeccanico nelle attività di movimentazione manuale dei carichi.

Sebbene molte considerazioni sul tema fossero già in essere negli ultimi anni dello scorso secolo, il LEF, diretto dal Dott. Francesco Draicchio fino al giugno 2023 e attualmente dal Dott. Vincenzo Molinaro, si occupa di questo tema con continuità dai primi anni duemila a tutt'oggi.

Nello specifico, i ricercatori e tecnici del LEF hanno esplorato la possibilità di quantificare il rischio biomeccanico attraverso l'uso di tecnologie per il monitoraggio del movimento umano e di algoritmi sempre più performanti. Le tecnologie sono diventate nel tempo sempre più mature e pronte per un utilizzo sul campo grazie al processo di miniaturizzazione che le ha rese indossabili, senza cavi e con peso e dimensioni ridotti, mentre i più recenti protocolli di comunicazione dati e gli algoritmi propri dell'intelligenza artificiale hanno conferito a questi dispositivi la capacità di stimare il rischio con precisione, accuratezza e in tempo reale.

La valutazione quantitativa del livello di rischio in tempo reale si è resa ancora più necessaria con la quarta rivoluzione industriale che sta determinando un popolamento sempre più significativo nei luoghi di lavoro di tecnologie robotiche collaborative, rendendo, di fatto, ibrida la attuale società del lavoro.

La necessità di governare e controllare con criterio l'interazione tra il lavoratore umano e il collega robot ha aperto nuove sfide all'interno della comunità scientifica, fra le quali è cruciale la possibilità di conferire ai robot un comportamento modulabile e controllabile in base alle reali esigenze e necessità del lavoratore.

Inoltre, la misura del livello di rischio in tempo reale sta permettendo di progettare e sviluppare appropriati sistemi di feedback vibrotattili, visivi e acustici per il lavoratore, in grado di informarlo sulla eventuale necessità di modificare l'esecuzione dell'attività lavorativa al fine di ridurre il rischio stesso, costituendo uno strumento di formazione sul campo e di miglioramento della percezione del rischio.

Il LEF, oltre alle attività previste dai piani triennali della ricerca Inail, ha contribuito, e lo fa tutt'ora, allo studio dell'interazione uomo-robot in ambito occupazionale grazie a numerosi progetti nazionali e internazionali. Tra questi sono senz'altro da citare il progetto Horizon 2020 AnDy, i progetti MELA e i-MELA, ErgoCub, Laborius,

BRiSK, TRUExo e il progetto Horizon 2020 SOPHIA (Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production).

Il progetto SOPHIA, coordinato da Arash Ajoudani dell'Istituto italiano di tecnologia e finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione europea con l'accordo n. 871237, è stato il progetto che più di tutti ha permesso al gruppo di lavoro del LEF di approfondire il tema in questione e di proporre alla letteratura un nuovo approccio di valutazione del rischio biomeccanico. Il progetto ha, inoltre, consentito di lavorare sul versante degli standard internazionali di ergonomia della serie ISO 11228 che, grazie al supporto e al coordinamento dell'Istituto di normazione tedesco (Din), ha permesso la definizione di specifiche linee guida con il CEN Workshop Agreement intitolato 'Guideline for introducing and implementing real-time instrumental-based tools for biomechanical risk assessment'.

È quindi con grande soddisfazione e apprezzamento che condivido i risultati dello straordinario lavoro svolto in questi anni dal LEF del Dimeila, durante la direzione dal Dott. Sergio Iavicoli e poi del Dott. Stefano Signorini, prima del mio attuale incarico.

Giovanna Tranfo
*Direttrice del Dipartimento di medicina,
epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale*

INDICE

Introduzione	7
Le patologie correlate al lavoro a carico del sistema muscoloscheletrico	7
La normativa di riferimento	12
Approcci elencati negli standard internazionali di ergonomia: punti di forza e limiti	12
Le nuove opportunità offerte dal nuovo scenario dell'industria 4.0	16
Obiettivi	17
Trattazione: materiali e metodi	18
Le reti di sensori	19
Gli indici per il monitoraggio dell'impegno fisico del lavoratore e per la valutazione del rischio biomeccanico	20
Gli algoritmi dell'intelligenza artificiale	23
Risultati	27
Il tool sviluppato con il progetto SOPHIA	27
Il tool sviluppato con il progetto i-MELA	31
Conclusioni	33
Riferimenti bibliografici e sitografici	34
Riferimenti normativi	38

INTRODUZIONE

LE PATOLOGIE CORRELATE AL LAVORO A CARICO DEL SISTEMA MUSCOLOSCHIELETRICO

Le malattie e i disturbi muscoloscheletrici (DMS) da sovraccarico biomeccanico lavoro-correlati sono un insieme di condizioni infiammatorie e degenerative dolorose delle articolazioni, dei dischi vertebrali, della cartilagine, dei muscoli, dei tendini, dei legamenti e dei nervi periferici. I DMS sono associati a fattori di rischio fisici legati ad attività di movimentazione manuale dei carichi (MMC), tra cui, ad esempio, il sollevamento di carichi pesanti, la movimentazione ripetitiva di carichi leggeri e le attività che richiedono il mantenimento di posture fisse e incongrue per prolungati periodi di tempo [1]. La tipologia di ambiente di lavoro e di attività lavorativa incidono in modo sostanziale sulla loro insorgenza, severità e durata [2]. La prevalenza¹ mondiale a 12 mesi dei DMS riferiti al rachide e agli arti superiori varia dal 12% al 41% [3-5] mentre la loro incidenza² annuale varia tra un quarto e un terzo di tutte le malattie professionali [6-11].

In Italia, la banca dati (<https://bancadaticsa.inail.it>) e la 'Relazione annuale 2021 del Presidente' dell'Inail evidenziano che delle 55.202 denunce di malattia professionale nel 2021, 38.472 (il 70%) sono DMS. Complessivamente, i dati del 2021 hanno evidenziato un aumento del 22,8% delle denunce di malattia professionale in confronto all'anno precedente in cui il fenomeno tecnopatologico³ è risultato più attenuato a causa dell'emergenza epidemiologica da Covid-19 anche nel ricorso alla tutela assicurativa delle patologie correlate al lavoro. La Figura 1 mostra tutte le caratteristiche di malattia professionale denunciate dal 2017 al 2021.

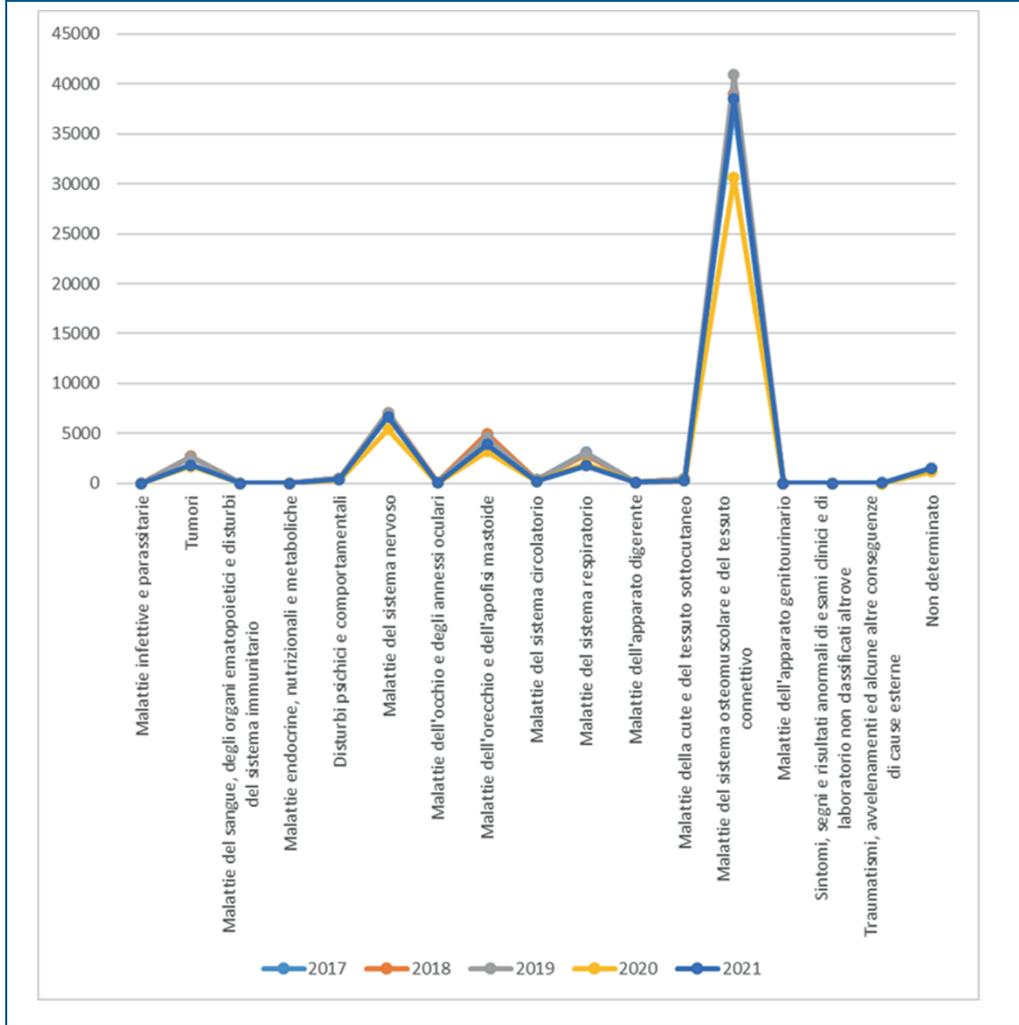
Nello stesso quinquennio, le dorsopatie e i disturbi a carico dei tessuti molli sono i DMS con l'incidenza più alta così come mostrato in Figura 2.

¹ La prevalenza misura la proporzione di individui di una popolazione che, in un dato momento, presentano la malattia. Questo indice statistico a rigore non dipende dal tempo.

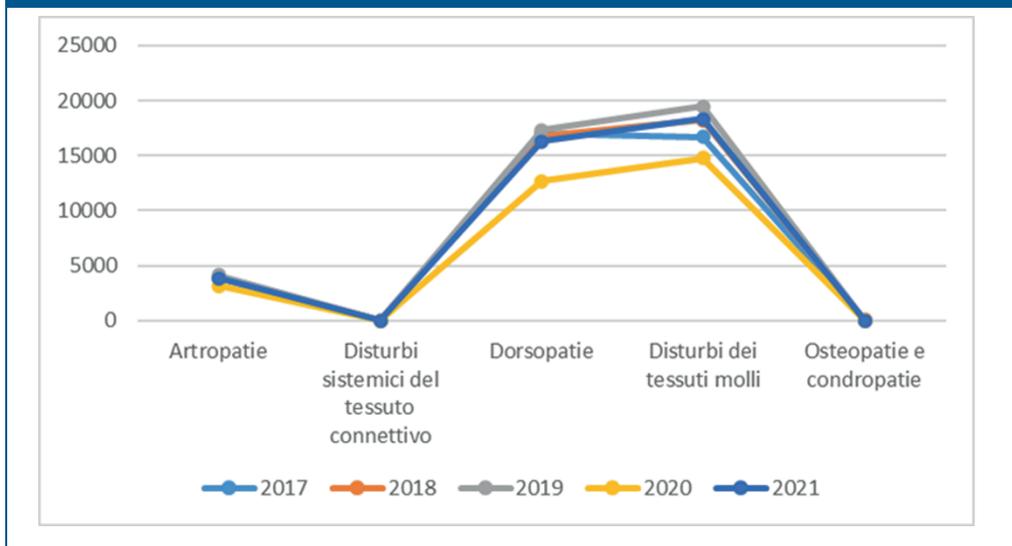
² L'incidenza è la misura della frequenza per indicare i nuovi casi di DMS che compaiono in una determinata unità di tempo (ad esempio in un mese o in un anno) all'interno di una determinata popolazione.

³ La tecnopatia è sinonimo di malattia professionale.

Figura 1 **Caratteristiche di malattia professionale denunciata dal 2017 al 2021**



(Dati estratti dalla banca dati Inail - <https://bancadaticsa.inail.it>)

Figura 2 Incidenza dei disturbi muscoloscheletrici dal 2017 al 2021

(Dati estratti dalla banca dati Inail - <https://bancadaticsa.inail.it>)

Le Tabelle che seguono mostrano nel dettaglio le caratteristiche delle dorsopatie (Tabella 1) e dei disturbi dei tessuti molli (Tabella 2).

L'elevata prevalenza e incidenza rende i DMS correlati al lavoro la forma più costosa di disabilità lavorativa e la principale causa di assenza per malattia e di disabilità in molte popolazioni professionali nel mondo industrializzato determinando un impatto negativo sulla salute e sulla produttività dei lavoratori [6,9,11].

I dati e gli effetti sopra riportati evidenziano la fondamentale necessità di progettare efficaci attività di prevenzione attraverso appropriati interventi ergonomici di concezione⁴ e di correzione⁵ che tengano anche conto delle opportunità offerte dal nuovo scenario dell'industria 4.0⁶.

⁴ Quando è possibile effettuare l'intervento già in fase di progettazione della postazione di lavoro, prima che essa venga realizzata.

⁵ Quando l'intervento viene eseguito su una postazione di lavoro esistente per cui sono possibili solo delle modifiche.

⁶ Il termine 'Industria 4.0', la cui paternità è attribuibile ai tedeschi Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas e Wolfgang Wahlster, deriva dalla tendenza della moderna automazione industriale a considerare l'utilizzo di alcune tecnologie innovative produttive per, tra gli altri, il miglioramento delle condizioni di lavoro e della qualità dei prodotti.

Tabella 1	Caratteristiche delle dorsopatie				
	2017	2018	2019	2020	2021
Altre spondilosi	1.437	1.304	1.254	1.087	1.422
Disturbi dei dischi intervertebrali cervicali	449	338	367	236	336
Disturbo di disco cervicale associato a radicolopatia	300	253	250	157	159
Altra ernia di disco cervicale	117	104	118	88	145
Altra degenerazione di disco cervicale	66	75	49	74	84
Disturbi di disco intervertebrale lombare e di altra sede associati a radicolopatia	5.801	5.974	5.847	4.809	5.629
Ernia di altro disco intervertebrale specificato	5.360	5.478	5.937	3.788	4.672
Degenerazione di altro disco intervertebrale specificato	3.428	3.259	3.480	2.395	3.769
Radicolopatia	46	37	27	24	62
Totale	17.004	16.822	17.329	12.658	16.278

Tabella 2 **Caratteristiche disturbi dei tessuti molli**

	2017	2018	2019	2020	2021
Altri disturbi muscolari	70	86	85	46	47
Sinovite e tenosinovite	490	615	759	565	684
Dito a scatto	327	324	322	249	271
Tenosinovite dello stiloide radiale (de quervain)	440	438	520	326	362
Altre sinoviti e tenosinoviti	618	660	660	425	530
Borsite dell'olecrano	23	30	19	23	20
Borsite prepatellare	60	75	72	49	48
Fibromatosi della fascia palmare (dupuytren)	155	148	135	93	114
Lesioni della spalla	3.706	3.856	3.886	2.973	3.667
Capsulite adesiva della spalla	11	12	15	10	20
Sindrome della cuffia dei rotatori	5.740	6.493	6.793	5.157	6.345
Tendinite bicipitale	277	278	247	179	195
Tendinite calcificante della spalla	555	650	734	594	782
Sindrome da 'impingement' (o da conflitto anteriore o da attrito acromion-omerale) della spalla	795	830	1.034	745	971
Borsite della spalla	91	76	103	79	117
Tendinite di achille	32	35	34	16	28
Altre entesopatie degli arti inferiori, escluso il piede	126	93	102	87	114
Altre entesopatie	372	174	174	130	99
Epicondilite mediale	1.803	2.105	2.402	1.797	2.375
Epicondilite laterale	893	1.169	1.275	1.146	1.473
Periartrite del polso	47	20	20	31	24
Altra entesopatia del piede	84	58	71	47	44
Totale	16.715	18.225	19.462	14.767	18.330

LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO

In Italia, in attuazione dell'art. 1 della l. 123/2007 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, il tema della valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico viene trattato all'interno del Titolo VI (movimentazione manuale dei carichi) del d.lgs. 81/2008, 'Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro' (Gazzetta ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. ordinario n. 108) integrato e corretto con il d.lgs. 106/2009 (Gazzetta ufficiale n. 180 del 05 agosto 2009 - Suppl. ordinario n. 142/l).

Già all'interno delle disposizioni generali del testo, oltre alla definizione di movimentazione manuale dei carichi di patologia da sovraccarico biomeccanico, si esplicita che il datore di lavoro ha l'obbligo di adottare tutte le misure organizzative necessarie, ricorrendo anche ad attrezzature meccaniche, per evitare la necessità di una movimentazione manuale dei carichi da parte dei lavoratori o di ridurre il rischio che comporta la movimentazione manuale di detti carichi. A tal fine il datore di lavoro deve organizzare i posti di lavoro, anche in fase di progettazione, in modo che detta movimentazione assicuri condizioni di salute e sicurezza.

Le norme tecniche della serie ISO 11228 nelle parti 1 (sollevamento carichi pesanti), 2 (traino e spinta) e 3 (movimentazione di carichi leggeri ad alta frequenza) sono da considerarsi quelle di riferimento tra quelle previste all'art. 168, comma 3:

- ISO 11228-1: 2021 Ergonomics - Manual Handling - Part 1: Lifting, Lowering and Carrying;
- ISO 11228-2: 2007, Ergonomics - Manual Handling - Part 2: Pushing and Pulling;
- ISO 11228-3: 2007, Ergonomics - Manual Handling - Part 3: Handling of low loads at high frequency;
- ISO/TR 12295: 2014, Ergonomics - Application Document for ISO Standards on Manual Handling (ISO 11228-1, ISO 11228-2 and ISO 11228-3) and Static Working Postures (ISO 11226);
- ISO 11226: 2000, Ergonomics - Evaluation of Static Working Postures.

Si sottolinea anche in questa trattazione che le norme tecniche, ove applicabili, costituiscono criteri di riferimento per il testo unico. Negli altri casi si fa riferimento alle buone prassi e alle linee guida.

APPROCCI ELENCATI NEGLI STANDARD INTERNAZIONALI DI ERGONOMIA: PUNTI DI FORZA E LIMITI

Dagli anni Ottanta e Novanta del secolo scorso a oggi molti gruppi di studio e di ricerca hanno proposto alla comunità internazionale del settore della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro molteplici approcci per la stima del rischio da sovraccarico biomeccanico, alla misura di efficacia degli interventi ergonomici

Tabella 4 **Metodi di valutazione del rischio per spinta e traino**

Metodo	Riferimento bibliografico
Revised tables of maximum acceptable weights and forces	Snook and Ciriello 1991
Mital Tables	Mital et al, 1997
Risk assessment of pushing and pulling tool (RAPP)	HSE 2016
Assessment of pulling and pushing based on key indicators	Jurgens et al, 2002
RAMP tool	Lind 2016

Tuttavia, ad essi sono associate alcune criticità [12,13], quali:

- la natura spesso osservazionale;
- la soggettività;
- l'attuazione delle procedure attraverso un approccio con carta e penna;
- una ridotta efficienza;
- limitazioni d'uso associate a restrizioni delle equazioni e delle variabili;
- accuratezza e precisione non sempre sufficienti;
- ripetibilità non sempre elevata;
- affidabilità non sempre elevata.

Tabella 5 **Metodi di valutazione del rischio per movimenti ripetuti**

Metodo	Riferimento bibliografico
ACGIH assessment of hand activity level (HAL)	ACGIH 2015, 2002 Akkas et al, 2014 Radwin et al, 2014
Strain index (SI)	Moore and Garg, 1995 Garg et al, 2016
Occupational repetitive actions (OCRA) index and checklist	Colombini, 1998 Occhipinti, 1998 Colombini et al, 2002 Occhipinti e Colombini 2004 Proto e Zimbalatti, 2015 Battaglia et al, 2015 Ruddy et al, 2012
OWAS	Aptel et al, 2000
Rapid upper limb assessment method (RULA)	McAtamney e Corlett, 1993 Labbafinejad et al, 2017
Rapid entire body assessment method (REBA)	Hignett e McAtamney, 2000 Jones e Hignett, 2007
The European Assembly Worksheet (EAWS)	Schaub, 2013

Oltre ai punti di debolezza sopra elencati, ampiamente dibattuti in letteratura, non si può prescindere da un interessante confronto [14-16] in cui si analizzano le basi scientifiche su cui gli Standard internazionali di ergonomia sono stati realizzati nel tempo. Gli autori di questo dibattito hanno argomentato su diverse criticità relative alle serie ISO 11228 e sulla necessità di:

- definire procedure per la produzione di standard ergonomici che siano basate sull'evidenza;
- definire criteri certi di identificazione dei comitati che lavorano a specifiche sezioni degli standard;
- rilevare sempre l'identità dei membri dei comitati;
- pubblicare i profili scientifici dei membri;
- coinvolgere attivamente le principali parti interessate: autorità del lavoro, aziende, professionisti del mondo dell'ergonomia (medici del lavoro, tecnici della prevenzione, responsabili dei servizi di prevenzione e protezione, ecc.) e scienziati competenti della materia;

- motivare la scelta di alcuni metodi di valutazione del rischio rispetto ad altri al fine di evitare potenziali conflitti di interesse;
- evitare dichiarazioni basate su opinioni personali e in contrasto con la letteratura scientifica.

Oltre alle considerazioni associate ad alcuni limiti dei metodi di valutazione del rischio biomeccanico e delle basi scientifiche che sostengono gli attuali Standard internazionali di ergonomia, è assolutamente necessario che si tenga conto di ulteriori aspetti cruciali che possano apportare un significativo rinnovamento in questo campo. In particolare, la quarta rivoluzione industriale sta permettendo l'adozione di nuovi approcci basati su reti di sensori indossabili per il monitoraggio del comportamento motorio e dell'impegno fisico del lavoratore durante l'esecuzione delle attività di MMC. Questo nuovo scenario è solo parzialmente e correttamente contemplato dalle modifiche che si stanno apportando alla serie ISO 11228 con la finalità di includere le nuove tecnologie.

LE NUOVE OPPORTUNITÀ OFFERTE DAL NUOVO SCENARIO DELL'INDUSTRIA 4.0

I più recenti e innovativi sensori indossabili miniaturizzati senza fili (wireless) possono essere indossati dal lavoratore senza che esso modifichi la naturale strategia motoria durante l'esecuzione dell'attività lavorativa. Le reti di sensori possono includere dispositivi per la misura della cinematica del movimento (unità di misura inerziali (IMU) e telecamere di profondità 3D), della cinetica del movimento (guanti e solette sensorizzate per la misurazione delle forze che il lavoratore scambia con l'ambiente di lavoro) e del comportamento dei muscoli scheletrici (sensori di elettromiografia di superficie (sEMG)). I dati da tutti i sensori possono essere acquisiti contemporaneamente al fine di migliorare sensibilmente l'accuratezza e la precisione della valutazione biomeccanica [17-22].

Nell'ambito della valutazione del rischio biomeccanico questi dispositivi possono essere utilizzati con una doppia finalità [12,13]:

- per la 'valutazione quantitativa strumentale diretta';
- per il 'rating delle variabili di input per approcci tradizionali/standard'.

La valutazione strumentale quantitativa diretta può essere eseguita nei casi in cui i metodi tradizionali/standard non sono utilizzabili o, quando lo sono, per ottenere una conferma della loro bontà.

Il rating delle variabili di input per gli approcci tradizionali/standard può essere utilizzato per incrementare precisione e accuratezza degli approcci stessi. Ad esempio, alcuni metodi per la valutazione del rischio biomeccanico di attività di movimentazione di carichi leggeri ad alta frequenza richiedono la misurazione

dell'ampiezza dei movimenti articolari dell'arto superiore, che può essere facilmente e automaticamente effettuata utilizzando IMU e algoritmi dedicati. Inoltre, il cambiamento sostanziale dei luoghi di lavoro con la crescente presenza di tecnologie collaborative uomo-robot, di dispositivi assistivi indossabili come gli esoscheletri [23], di dispositivi per il feedback sensoriale [20,23] e di procedure gestite da algoritmi propri dell'intelligenza artificiale, si sta rivelando significativamente positiva per ciò che riguarda la riduzione dell'impegno fisico del lavoratore, del livello di rischio biomeccanico e dell'insorgenza dei DMS sul lavoro. Gli attuali metodi di valutazione del rischio biomeccanico, essendo stati concepiti in periodi in cui questo cambiamento non si era ancora manifestato, sono solo parzialmente utilizzabili in questo nuovo scenario. Questa lacuna implica la attuale necessità di aggiornare gli standard esistenti per l'ergonomia umana includendo gli approcci strumentali, concepiti su presupposti scientificamente robusti, in attività lavorative di MMC eseguite senza e con l'ausilio di tecnologie robotiche.

OBIETTIVI

Questo documento ha l'obiettivo di definire i criteri di base che devono essere rispettati per eseguire una corretta valutazione strumentale e in tempo reale del rischio biomeccanico. In particolare, si intende descrivere:

- le tecnologie per il monitoraggio del movimento umano che possono essere utilizzate direttamente nei luoghi di lavoro e non solo nei laboratori di ricerca;
- gli algoritmi e gli indici che possono essere considerati per il 'rating' del livello di rischio biomeccanico;
- i tool di valutazione sviluppati all'interno di due progetti: SOPHIA e MELA.

TRATTAZIONE: MATERIALI E METODI

Le tecnologie che possono essere usate per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico nelle attività di MMC devono permettere l'acquisizione, l'elaborazione e l'analisi di segnali cinematici, cinetici ed elettromiografici di superficie. Il monitoraggio di indici basati su questi segnali offrirebbe la possibilità di analizzare:

- la postura statica e dinamica del lavoratore attraverso lo studio dei comportamenti del tronco e delle articolazioni degli arti inferiori e superiori;
- le forze scambiate dal lavoratore con l'ambiente;
- le forze di taglio e di compressione che agiscono sui diversi distretti articolari;
- i comportamenti dei muscoli scheletrici dei distretti coinvolti durante l'esecuzione delle attività di MMC. Tali comportamenti possono essere riferiti ai muscoli presi singolarmente o a più muscoli o gruppi muscolari considerati contemporaneamente.

Al fine di facilitare la comprensione delle tecnologie e degli indici che possono essere utilizzati per la valutazione strumentale del rischio, si forniscono di seguito alcune definizioni:

Cinematica

Descrizione del movimento dei segmenti e delle articolazioni del tronco, della testa e degli arti superiori e inferiori utilizzando esclusivamente le nozioni di spazio e tempo, indipendentemente dalle cause, le forze, che generano il movimento stesso [24-26].

Cinetica

Studio del movimento del corpo considerando le forze che lo generano [27].

Attività dei muscoli

Studio delle attivazioni elettriche dei muscoli durante l'esecuzione di un movimento o il mantenimento di una postura fissa attraverso procedure non invasive.

LE RETI DI SENSORI

Così come già esplicitato negli obiettivi, in questa trattazione si considerano esclusivamente tecnologie per il monitoraggio del movimento umano che possono essere usate con semplicità e da tutti all'interno dei luoghi di lavoro e non esclusivamente in laboratorio. Tale scelta si rende necessaria perché la valutazione del rischio biomeccanico deve essere eseguita su lavoratori che eseguono il compito lavorativo reale e non simulato in laboratorio, senza modificare la loro naturale strategia motoria. Per tale motivo si farà riferimento esclusivamente alla sensoristica indossabile sebbene alcune soluzioni alternative siano disponibili nel mercato. Si escludono dai contenuti del testo i sistemi optoelettronici ad infrarosso e le piattaforme di forza.

Il termine sensore indossabile fa riferimento a sensori miniaturizzati, di piccole dimensioni, di peso trascurabile e senza cavi in grado di trasferire i segnali prelevati dal lavoratore attraverso efficaci protocolli di comunicazione wireless⁷.

Senza dubbio i sensori che più sono maturi, da questo punto di vista, per le acquisizioni cinematiche, cinetiche ed elettromiografiche sono le 'unità di misura inerziali (IMU)', gli *strain gauge*, i guanti e le solette sensorizzate, e i sensori per l'elettromiografia di superficie con prelievo bipolare.

Oggi questi sensori possono essere facilmente integrati e sincronizzati costituendo di fatto una unica rete. Si forniscono di seguito le definizioni principali riferite ai dispositivi indossabili sopra elencati:

Unità di misura inerziali (IMU)

Sensori composti generalmente da accelerometri, giroscopi e magnetometri. Misurano l'accelerazione e l'orientamento dei segmenti e articolazioni di interesse. Questi sensori lavorano sfruttando il principio di inerzia. Il termine inerzia si riferisce alla resistenza al movimento offerta da una massa libera che viene accelerata da una forza o da una coppia esterna [24-26].

In Figura 3A) una tra le reti IMU disponibili in commercio.

Strain gauge, guanti e solette sensorizzate

Sensori indossabili per la misurazione wireless e in tempo reale delle forze e delle pressioni in corrispondenza dell'interfaccia lavoratore-ambiente, lavoratore-utensile, lavoratore-pezzo in produzione. Alcuni di questi dispositivi sono dotati di IMU.

In Figura 3B) una soletta sensorizzata che può essere utilizzata per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico.

⁷ Tra questi protocolli di trasmissione dati segnaliamo quelli Bluetooth, WiFi e Ultra Wide Band.

Sensori per l'elettromiografia di superficie con prelievo bipolare

Sensori in grado di rilevare sulla cute il potenziale elettrico generato dai muscoli scheletrici superficiali (sottostanti la cute). Questa metodica strumentale permette lo studio del comportamento dei muscoli anche durante il movimento [28-33]. Le sonde che si trovano in commercio hanno generalmente due aree circolari metalliche alle quali di applicano due elettrodi pregellati che vanno in contatto con la cute. I due elettrodi conferiscono al prelievo del segnale il termine 'bipolare'⁸.

In Figura 3C) una rete di sensori per elettromiografia di superficie bipolare.

Figura 3

Dispositivi indossabili



A) Rete di unità di misura inerziali disponibile in commercio; B) Soletta sensorizzata; C) Sensore per elettromiografia di superficie bipolare.

(A - progetto MELA (Inail-lit); B - OpenGo Sensor Insoles (<https://moticon.com/opengo/sensor-insoles/>); C - BTS Bioengineering (<https://www.btsbioengineering.com/it/>))

GLI INDICI PER IL MONITORAGGIO DELL'IMPEGNO FISICO DEL LAVORATORE E PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO BIOMECCANICO

In molteplici articoli che si trovano nella letteratura scientifica è possibile selezionare alcuni indici basati su dati cinematici, cinetici ed elettromiografici di superficie sensibili ai differenti livelli di rischio e direttamente correlati alle variabili

⁸ L'elettromiografia di superficie può essere anche effettuata ad alta densità (High Density surface Electromyography, HDsEMG). In questo caso gli elettrodi che, sulla cute, vengono posti in corrispondenza del muscolo sono in numero maggiore di due (si può arrivare anche a 128). Con questa finalità si utilizzano array di elettrodi lineari e bidimensionali (chiamate matrici o schiere). Con l'approccio ad alta densità è possibile l'analisi delle mappe di potenziale, la decomposizione del segnale SEMG per ottenere la frequenza di scarica dei potenziali d'azione delle unità motorie e una stima più accurata della manifestazione mioelettrica della fatica muscolare.

che generano il danno nelle attività di MMC. Per questa ragione questi indici possono essere utilizzati per la valutazione diretta del rischio biomeccanico. È possibile rendere questa valutazione più precisa e accurata grazie all'uso di algoritmi di intelligenza artificiale di cui si farà una breve descrizione nel paragrafo che segue. Altre sorgenti di conoscenza sul tema della salute nei luoghi di lavoro ci informano che le reti di sensori sono in grado di misurare molte delle variabili necessarie per il rating del livello di rischio attraverso l'uso di approcci tradizionali/standard.

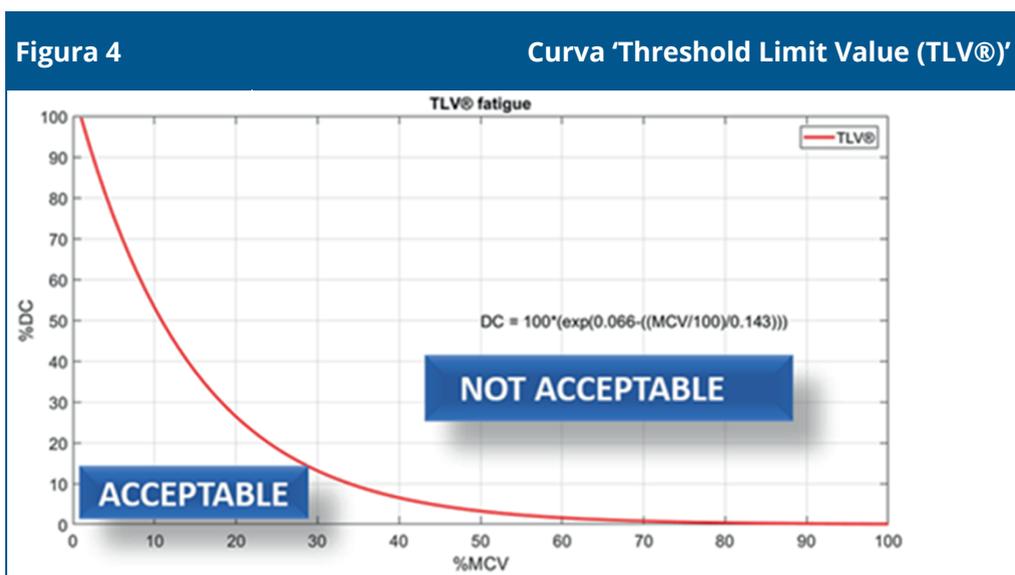
Di seguito si elencano alcuni degli indici più performanti per la valutazione diretta del rischio biomeccanico:

- **Lifting Energy Consumption (LEC)** [34]: è un indice che utilizza dati cinematici e che, basandosi sul comportamento del centro di massa del lavoratore, restituisce informazioni sul dispendio energetico meccanico durante l'esecuzione di specifiche attività di MMC. Questo indice è particolarmente efficace per le attività di sollevamento di carichi pesanti e può essere utilizzato nei tool di valutazione del rischio in quanto è in grado di discriminare i diversi livelli di rischio (così come calcolato dall'equazione del Niosh) ed è correlato alle forze di compressione e di taglio a livello dell'articolazione lombo-sacrale (L5-S1) del rachide;
- **sEMG Average Rectified Value (ARV)** [12]: è un indice, basato su acquisizione elettromiografica di superficie, costruito sul valore medio dell'attivazione di un muscolo di interesse. È stato dimostrato che questo indice è particolarmente utile quando si è interessati a classificare il rischio nelle attività di sollevamento di carichi pesanti. Per questo motivo tale indice viene calcolato all'interno di uno o più cicli di sollevamento;
- **Root Mean Square (RMS)** [12]: è un indice, basato su acquisizione elettromiografica di superficie, correlato alla potenza del segnale generato da un muscolo di interesse. È stato dimostrato che questo indice è particolarmente utile quando si è interessati a classificare il rischio nelle attività di sollevamento di carichi pesanti. Per questo motivo tale indice viene calcolato all'interno di uno o più cicli di sollevamento;
- **Time-Varying Multimuscule Co-activation function (TMCf)** [35]: è un indice, basato su acquisizione elettromiografica di superficie, il cui comportamento dipende dal tipo di simultanea attivazione di due o più muscoli o gruppi muscolari coinvolti nella esecuzione dell'attività di MMC di interesse. Così come ARV e RMS, il TMCf è particolarmente utile per la classificazione del rischio biomeccanico nelle attività di sollevamento di carichi pesanti sebbene sia stato utilizzato anche per attività di movimentazione di carichi leggeri ad alta frequenza eseguiti senza e con l'ausilio di robot collaborativi [36]. Anche tale indice viene calcolato all'interno di uno o più cicli di sollevamento o di movimenti ripetitivi;

- Fatica muscolare localizzata [37]: è un indice, basato su acquisizione elettromiografica di superficie, costruito sulla stima dell'affaticamento di uno o più muscoli coinvolti in attività di MMC affaticanti. I risultati della letteratura scientifica evidenziano come questo indice sia in grado di classificare il rischio nelle attività di movimentazione manuale di carichi leggeri ad alta frequenza.

Per il rating delle variabili di input necessarie alla valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico con approcci tradizionali/standard si elencano di seguito alcune esperienze.

- Approccio proposto da Potvin [38,39]: si può utilizzare l'elettromiografia di superficie applicare questo metodo al fine di quantificare lo sforzo fisico nelle attività ripetitive. Esso fornisce una curva di fatica chiamata (Figura 4) 'Threshold Limit Value (TLV®)' al fine di calcolare il 'acceptable percent duty cycle' (DC) che si definirà accettabile quando tutte le percentuali della forza espresse rispetto alla Massima Contrazione Volontaria (MCV) calcolate all'interno del ciclo saranno al di sotto della curva. Il TLV® si applica a cicli di lavoro compresi tra lo 0,5% e il 90% ed è inteso per lavori.



(Potvin JR. An equation to predict maximum acceptable loads for repetitive tasks based on duty cycle: evaluation with lifting and lowering tasks. *Work*. 2012a;4(Suppl1):397-400. Potvin JR. Predicting maximum acceptable efforts for repetitive tasks: an equation based on duty cycle. *Hum factors*. 2012;54(2):175-88. Erratum in: *Hum Factors*. 2012b;54(2):296)

- Ciclici eseguiti per 2 o più ore al giorno. Si evidenzia che l'ACGIH ha rielaborato i dati di Potvin e quindi leggermente modificato la curva TLV [38,39].

- Instantaneous Lifting Index [40]: le variabili necessarie per il calcolo dei moltiplicatori dell'equazione del Niosh possono essere misurate automaticamente utilizzando sensori IMU. Riportiamo, a puro titolo di esempio, la modalità con cui i calcoli possono essere effettuati:

$$HM(\text{Start}) = \frac{0,25}{H(\text{Start})} = \frac{0,25}{\text{Hands}_{mp}(\text{Start}) \cdot \text{Foot}_p(\text{Start})}$$

$$VM(\text{Start}) = 1 - 0,3 \cdot |0,75 - V(\text{Start})|$$

$$DM_{SS} = 0,82 + \frac{0,045}{D_{SS}} = 0,82 + \frac{0,045}{V(\text{Stop}) - V(\text{Start})}$$

$$AM_{SS} = 1 - 0,0032 \cdot A_{SS} = 1 - 0,0032 \cdot [A(\text{Stop}) - A(\text{Start})]$$

$$FM(i) = f(F(i)) = f\left(\frac{n_{\text{lifts}}(i)}{\text{min}}\right)$$

GLI ALGORITMI DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Così come stiamo sperimentando quotidianamente, molti degli obiettivi piccoli e grandi che ci prefiggiamo possono essere raggiunti efficacemente e rapidamente attraverso l'uso di sistemi che generano previsioni e decisioni. L'insieme degli approcci utilizzati per l'implementazione di questi sistemi prende il nome di intelligenza artificiale (AI). L'AI permette di sviluppare modelli di rappresentazione di set di dati, di ampliare la conoscenza di molti fenomeni e sistemi anche complessi e di svolgere numerose attività con crescenti livelli di automazione.

Tra gli approcci sopra menzionati meritano una descrizione di base le reti neurali artificiali in quanto offrono la possibilità di elaborare l'informazione in modo parallelo e distribuito in analogia con la modalità con cui le reti neurali biologiche presenti negli esseri umani processano i dati. Il punto di forza di queste reti risiede nella possibilità di poterle sottoporre ad un processo di apprendimento attraverso la somministrazione di un adeguato addestramento con esempi appropriati e informazioni note. L'architettura delle reti neurali artificiali si fonda su elementi di base chiamati neuroni artificiali, unità di calcolo che, disposti in più strati, possono lavorare in parallelo tra loro interconnessi. Per caratterizzare correttamente una rete neurale artificiale occorre quindi descrivere il neurone artificiale come singola

unità di calcolo e definire la sua funzione di trasferimento, scegliere la topologia⁹ della rete sulla base del numero di neuroni e di strati, della tipologia di interconnessione degli strati e dell'algoritmo usato per l'addestramento. Alcuni dei problemi che possono essere risolti dalle reti neurali prendono il nome di:

- pattern recognition;
- data classification.

Le reti neurali permettono l'individuazione di tendenze di set di dati che risultano estremamente complessi per essere rilevati dall' uomo o da tradizionali approcci di calcolo ed elaborazione.

In sintesi, le reti neurali hanno la capacità di:

- apprendere da esempi di e da esperienze iniziali;
- auto-organizzarsi;
- processare il dato in tempo-reale.

L'architettura della rete neurale artificiale, che ha un significativo impatto sulle capacità di elaborazione della rete stessa, viene a determinarsi attraverso la scelta della disposizione dei neuroni e delle interconnessioni ed è costituita da:

- uno strato di ingresso (insieme di neuroni) che riceve un input dall'esterno;
- uno o più strati di neuroni nascosti che ricevono dati dalle uscite di uno strato precedente;
- uno strato di uscita di neuroni che rende disponibile all'esterno il risultato dell'elaborazione.

La modalità con cui i dati fluiscono dall'ingresso, agli strati nascosti fino all'uscita determina la tipologia di rete:

- reti feed-forward: usate per rispondere ad un quesito specifico attraverso l'uso di informazioni che sono a disposizione;
- reti parzialmente ricorrenti: usate per rispondere ad un quesito specifico attraverso l'uso di informazioni che sono a disposizione e l'utilizzo di dati già processati in passato e che vengono resi disponibili in ingresso in modalità feed-back. In questo caso quindi la rete neurale tiene memoria degli ingressi passati. Le due architetture principali per le reti parzialmente ricorrenti sono:
 - a feed-back dalle unità dello strato nascosto ad un insieme di unità addizionali (unità contesto);
 - a feed-back dalle unità dello strato nascosto e dall'uscita ad un insieme di unità addizionali (unità contesto);

⁹ La topologia, dal greco τόπος, luogo, e λόγος, studio, assume il significato di studio dei luoghi sebbene sia diventata una importante branca della matematica che studia le proprietà delle figure, degli oggetti matematici e dei modelli.

- reti completamente ricorrenti: dotate di connessioni a due vie. Un insieme di neuroni costituisce lo strato d'ingresso che fa passare gli ingressi al sistema. Quindi i dati fluiscono circolarmente su tutte le unità adiacenti circolando avanti e indietro fino a che le attivazioni delle unità si stabilizzano. Queste reti possono richiedere tempi di calcolo molto lunghi per raggiungere uno stato stabile.

L'addestramento della rete permette di modificare i pesi assegnati alle interconnessioni e consente la generalizzazione del suo comportamento. Infatti, dopo aver imparato da un insieme di esempi, se l'addestramento è andato a buon fine, la rete svolge il compito per cui è stata addestrata riuscendo anche a lavorare su esempi mai visti in precedenza.

L'addestramento può essere supervisionato o non supervisionato.

- L'addestramento supervisionato usa un 'maestro esterno' che suggerisce alla rete, per ogni input fornito, quale dovrebbe essere la risposta (output). Questo tipo di addestramento ha la finalità trovare la configurazione di pesi che minimizza l'errore tra uscita corrente e uscita desiderata. L'addestramento supervisionato si basa su un funzionamento definito offline in cui le due fasi di addestramento e di funzionamento sono distinte.
- L'addestramento non supervisionato non usa il 'maestro esterno' e quindi la rete artificiale auto-organizza i dati di input al fine di estrarre proprietà comuni. Questo tipo di addestramento si basa su un funzionamento definito online in cui le fasi di addestramento e di funzionamento sono simultanee.

Altri tipi di addestramento sono implementati con diversi algoritmi (addestramento con rinforzo), come ad esempio la regola delta (semplice e generalizzata) come addestramento supervisionato e la regola di Kohonen come addestramento non supervisionato.

Le reti neurali artificiali trovano applicazioni in numerosi campi in cui è richiesta la predizione o la classificazione dei dati (previsione di vendita, controllo di processi industriali, ricerche di mercato, analisi dei rischi, marketing strategico).

L'applicazione delle reti neurali artificiali è molto diffusa anche in medicina. A partire da dati acquisiti con sEMG, ECG, RX, TAC, ecografie, appropriate reti neurali artificiali possono essere addestrate ad estrarre caratteristiche comuni, costruire modelli, classificare, individuare differenze tra i dati offrendo un supporto al percorso diagnostico. Infatti, le applicazioni biomediche fanno riferimento:

- al supporto alla diagnosi;
- alla prognosi e trattamento (es. individuazione del migliore trattamento farmacologico, selezione della terapia);
- alle analisi biochimiche (es. analisi del sangue, analisi delle urine, monitoraggio dei livelli di glucosio);
- alla elaborazione delle immagini per la identificazione di tumori, ecc.;

- alla elaborazione dei segnali per la classificazione delle forme d'onda EEG, sEMG, ecc.;
- allo sviluppo di farmaci attraverso la modellizzazione di nuove molecole.

Ad esempio, in una sessione sperimentale eseguita di Gandolla e colleghi [41] si sono utilizzati come input specifici segnali elettromiografici con la finalità di addestrare reti neurali artificiali per la progettazione e implementazione di una mano robotica in grado di stimare l'intenzione di movimento del soggetto prima dell'effettiva esecuzione dello stesso.

Le reti neurali artificiali cominciano ad essere utilizzate significativamente anche nell'ambito dell'ergonomia fisica per la 'classificazione' automatica, e possibilmente in tempo reale, del rischio da sovraccarico biomeccanico nelle attività di MMC.

In alcuni lavori infatti, [42-44] le reti neurali artificiali sono state usate per classificare alcune attività lavorative a basso e ad alto rischio in base alla probabilità di insorgenza di problematiche alla schiena con particolare riferimento al tratto lombo-sacrale. Nello specifico sono stati utilizzati come ingressi alcune variabili meccaniche che risultano fattori potenzialmente rischiosi come il numero di sollevamenti per ora, i momenti di picco e i picchi di velocità. In due studi successivi [45-46] l'approccio quantitativo di apprendimento basato su reti neurali artificiali è stato utilizzato per predire il rischio biomeccanico direttamente da parametri sEMG e cinematici, mostrando che una corretta combinazione di funzioni di input e architetture di rete può portare a buoni risultati di classificazione. In questi studi tutte le reti neurali sono reti 'feed-forward' addestrate con alcuni dei parametri di ampiezza e di frequenza, considerando diverse combinazioni di parametri di ingresso, diversi numeri di livelli nascosti e di neuroni in ogni strato nascosto.

RISULTATI

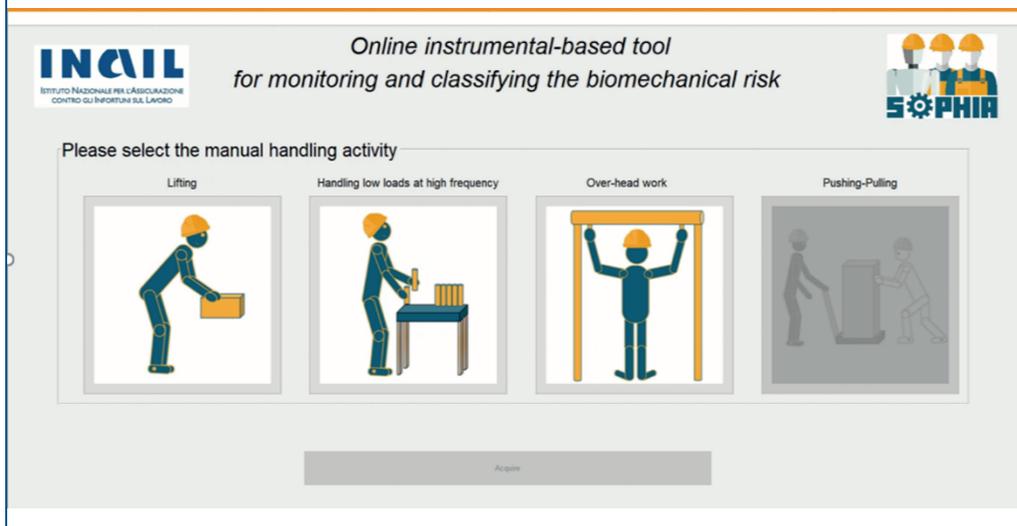
Molti dei risultati raggiunti e pubblicati nella letteratura scientifica nazionale e internazionale dal gruppo di ricerca del Laboratorio di ergonomia e fisiologia sono stati messi a fattor comune e resi disponibili per ulteriori attività previste da due progetti in cui l'istituto è stato coinvolto: il progetto Horizon 2020 SOPHIA e il progetto MELA.

IL TOOL SVILUPPATO CON IL PROGETTO SOPHIA

Il progetto SOPHIA (Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production) ha ricevuto il finanziamento dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione europea (H2020-ICT-2019-2, 2019/2023) nell'ambito dell'accordo di sovvenzione n. 871237.

All'interno del partenariato europeo di progetto, Inail ha avuto il compito di progettare e sviluppare nuovi approcci per la valutazione del rischio biomeccanico all'interno del nuovo scenario offerto dalla quarta rivoluzione industriale. L'obiettivo è stato raggiunto e l'attuale versione del tool permette, integrando alcune reti di sensori commerciali, la valutazione del rischio in attività di sollevamento di carichi pesanti, di movimenti ripetitivi e di mantenimento di posture fisse e incongrue (Figura 5).

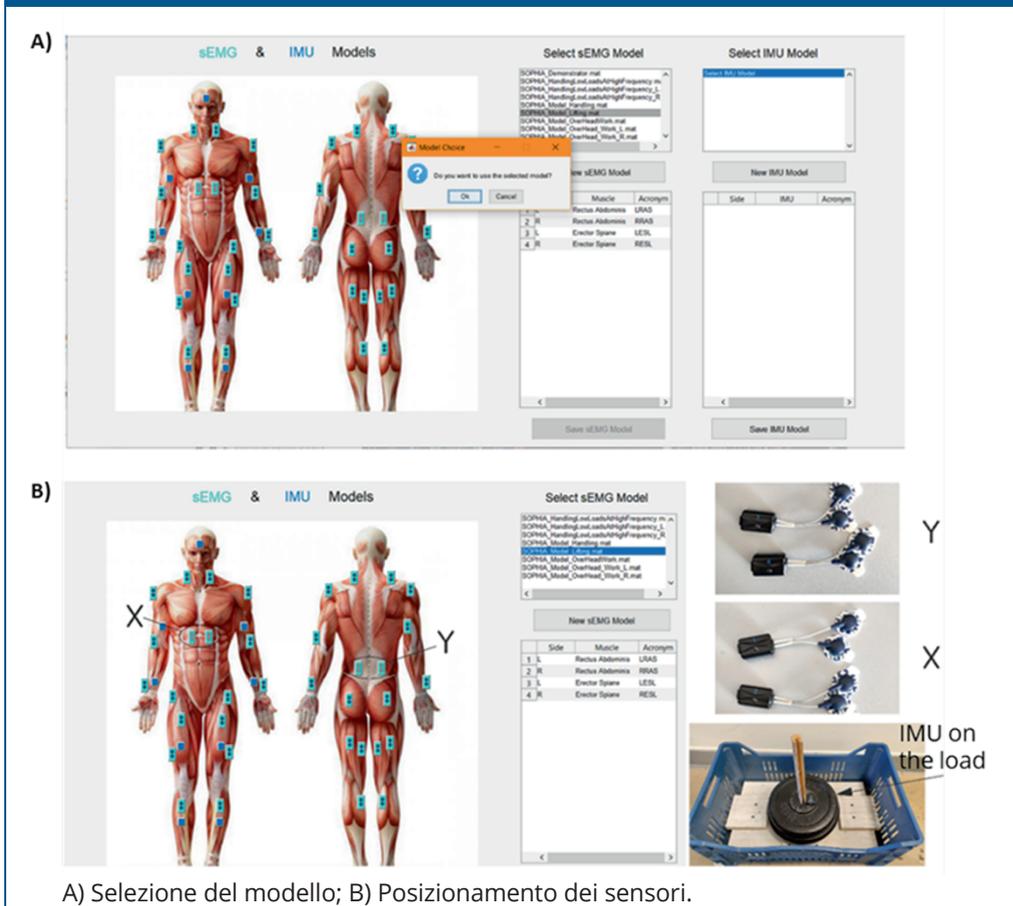
Figura 5 **Interfaccia iniziale del tool per la valutazione del rischio biomeccanico nelle attività di movimentazione manuale dei carichi**



(Progetto SOPHIA - Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production - www.project-sophia.eu)

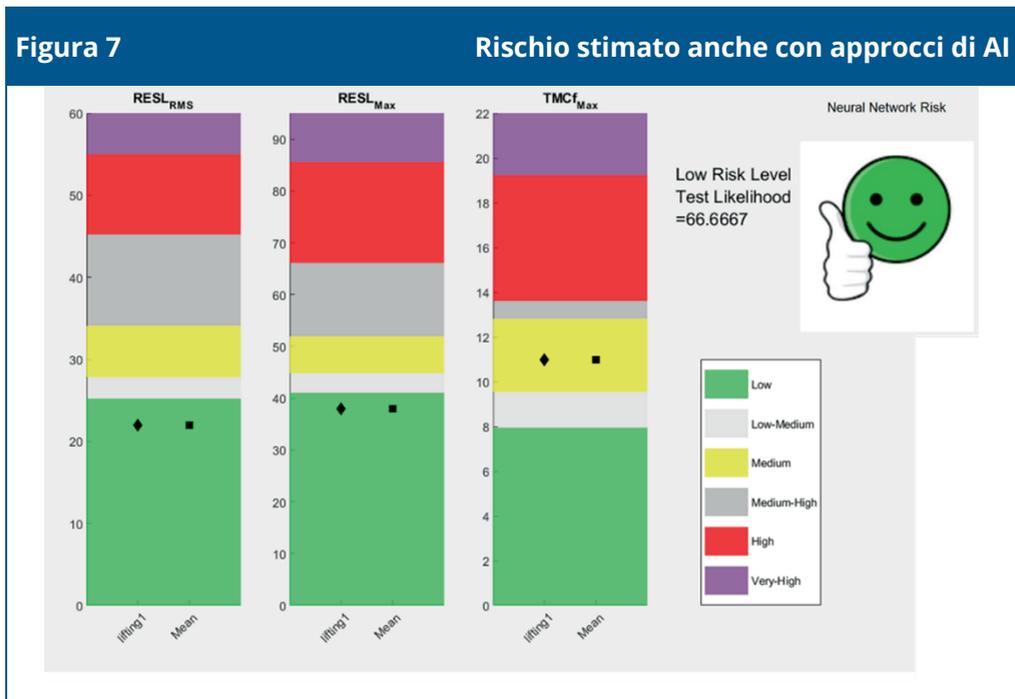
La piattaforma software offre la possibilità di classificare il rischio attraverso l'utilizzo di tutti gli indici descritti nei metodi di questa monografia e guida l'utente, attraverso una interfaccia Matlab intuitiva e di semplice utilizzo, alla corretta selezione e posizionamento dei sensori sulla base dell'attività di MMC selezionate (Figura 6).

Figura 6 Selezione e posizionamento dei sensori sulla base dell'attività di movimentazione manuale dei carichi selezionata



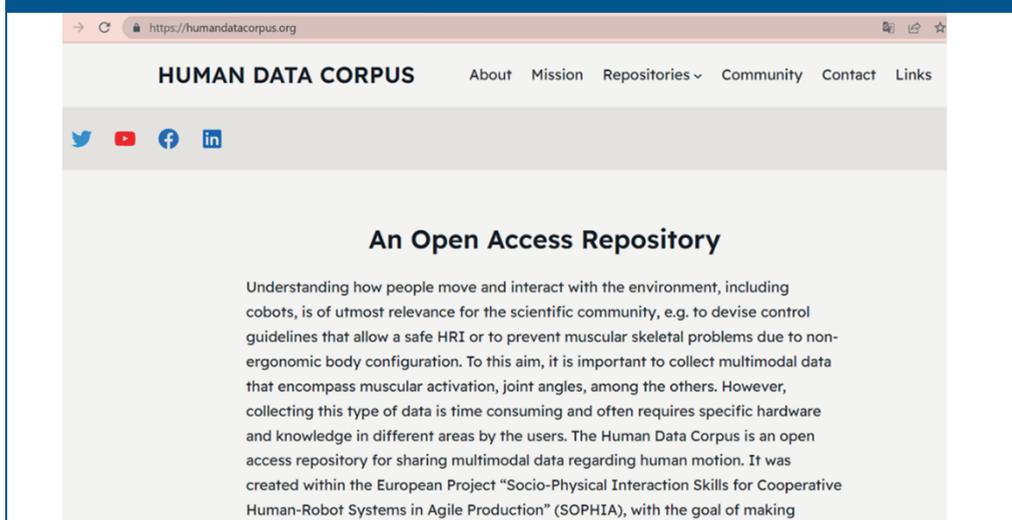
(Progetto SOPHIA - Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production - www.project-sophia.eu)

Il software offre infine la possibilità di stampare una metrica con l'indicazione del livello di rischio stimato anche con approcci di AI (Figura 7).



(Progetto SOPHIA - Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production - www.project-sophia.eu)

Sempre all'interno di questo progetto il partenariato, con il diretto coinvolgimento dell'Inail, si è anche progettato e realizzato un database pubblico dal nome HumanDataCorpus (<https://humandatacorpus.org/>) con la finalità di permettere ai professionisti del settore della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro di capire come i lavoratori si muovono e interagiscono con l'ambiente occupazionale e i robot collaborativi consentendo loro di ottimizzare il controllo dei robot in maniera sempre più efficace e sicura, prevenendo i DMS. A tal fine, si è realizzato un capiente contenitore in cui poter immagazzinare o scaricare dati multimodali che comprendano segnali cinematici, cinetici e sEMG. Il database Human Data Corpus è divenuto dunque un archivio ad accesso libero per la condivisione di dati multimodali sul movimento umano in ambito occupazionale. Questo database (Figura 8), oltre ad una sezione di ergonomia, ospita anche il preesistente database Handcorpus, sviluppato nell'ambito del progetto europeo 'The Hand Embodied' e supportato dall'IEEE RAS Technical Committee on Robot Hand Grasping and Manipulation.

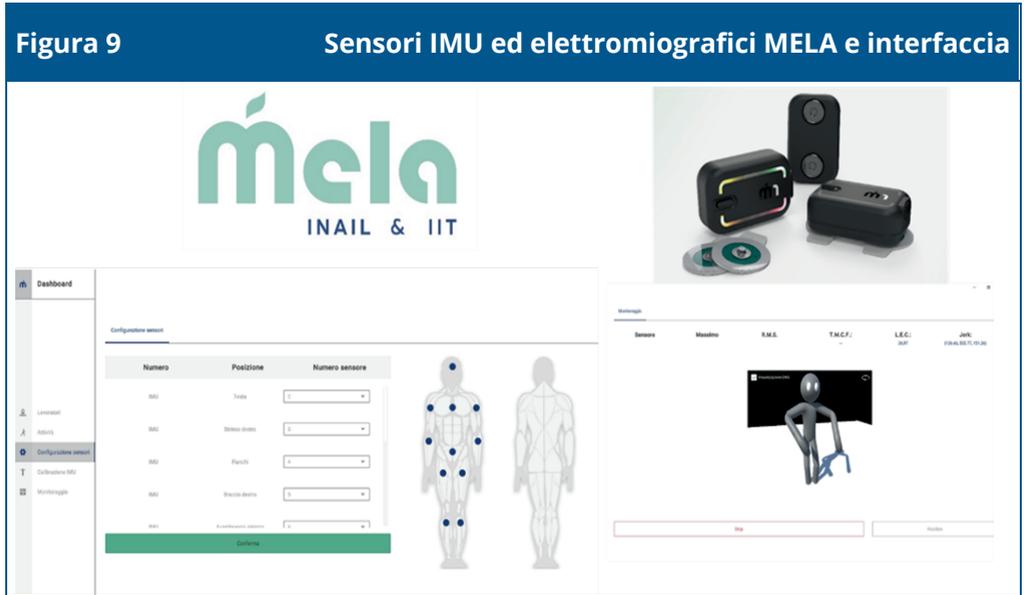
Figura 8 Database pubblico dal nome Human Data Corpus

(Progetto SOPHIA - Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production - www.project-sophia.eu)

IL TOOL SVILUPPATO CON IL PROGETTO I-MELA

Il progetto MELA è stato concepito da Inail ed è stato sviluppato con la collaborazione dell'Istituto italiano di tecnologia con l'obiettivo di riprogettare l'interfaccia Matlab di SOPHIA e di realizzare una rete di sensori che integrassero IMU e sensori per sEMG (Figura 9).

La Figura 9 mostra l'interfaccia con la possibilità di definire il modello di acquisizione e monitorare in tempo reale una determinata attività.



(Progetto SOPHIA - Socio-Physical Interaction Skills for Cooperative Human-Robot Systems in Agile Production - www.project-sophia.eu)

CONCLUSIONI

Gli attuali sensori indossabili, wireless e miniaturizzati, per il monitoraggio della cinematica e cinetica del movimento umano e dei comportamenti muscolari permettono l'acquisizione di tutti i segnali necessari per il calcolo di appropriati indici che la letteratura scientifica ha dimostrato essere sensibili al livello di rischio e correlati alle variabili che generano il danno. Appropriati algoritmi di machine learning permettono una classificazione ottimizzata e automatica del livello di rischio biomeccanico durante l'esecuzione di attività di MMC.

Gli approcci strumentali potranno essere utilizzati per stimare direttamente il rischio o per quantificare le variabili richieste dai metodi tradizionali.

La possibilità di disporre di un livello di rischio accurato e preciso in tempo reale offre una incrementata capacità di prevenzione dei DMS permettendo il controllo di tecnologie robotiche collaborative e la somministrazione di specifici stimoli al lavoratore in grado di informarlo sulla eventuale necessità di modificare l'esecuzione del task lavorativo. Per tale motivo questi approcci, oltre ad essere strumenti di misura, potranno in futuro essere considerati sempre di più degli strumenti di formazione sul campo per un miglioramento della percezione del rischio.

È particolarmente importante sottolineare che questi approcci sono solo all'inizio di un lungo percorso di validazione e verifica nei luoghi di lavoro. Attualmente il loro utilizzo si è dimostrato essere efficace esclusivamente in alcuni contesti e per alcune attività di MMC. La complessità dei luoghi di lavoro e la variabilità associata alle attività di MMC implica una enorme prudenza e la necessità di produrre ancora una enorme conoscenza tecnico-scientifica sul tema. I vantaggi offerti da questi tool strumentali non devono, infine, nascondere la necessità di approfondire i temi della efficace usabilità da parte dei professionisti che si occupano di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, accettabilità da parte dei lavoratori, del trattamento dei dati personali e delle questioni etiche.

Un'ultima considerazione va fatta sul versante normativo. Sarà cruciale che, nel momento in cui ci saranno le necessarie evidenze scientifiche, gli aggiornamenti degli standard ergonomici a livello europeo e internazionale includano gli approcci strumentali per la valutazione del rischio biomeccanico nelle attività di MMC. Questo tipo di processo richiederà sicuramente del tempo, ma alcune esperienze cominciano a ben classificare questo ambito. In particolare, si segnala un documento scritto in ambito 'European Committee for Standardization (Cen)' intitolato 'Guideline for introducing and implementing real-time instrumental-based tools for biomechanical risk assessment' che si pone l'obiettivo di fornire delle linee guida per l'esecuzione di una corretta valutazione del rischio biomeccanico con approcci strumentali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

- [1] Bao S, Howard N, Lin JH. Are work-related musculoskeletal disorders claims related to risk factors in workplaces of the manufacturing industry? *Ann. Work. Expo. Heal.* 2020;64(2):152-164.
- [2] Bernard BP. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute of Occupational Safety and Health. *Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors: A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Lower Back*; DHHS (NIOSH). Washington, DC, USA. 1997. Url: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/97-141> [consultato settembre 2023].
- [3] Van Hoof W, O'Sullivan K, O'Keeffe M et al. The efficacy of interventions for low back pain in nurses: A systematic review. *Int. J. Nurs. Stud.* 2018;77:222–231.
- [4] Kim KH, Kim KS, Kim DS et al. Characteristics of work-related musculoskeletal disorders in Korea and their work-relatedness evaluation. *J. Korean Med. Sci.* 2010;25(Suppl):S77-86.
- [5] Huisstede BMA, Bierma-Zeinstra S, Koes BW et al. Incidence and prevalence of upper extremity musculoskeletal disorders. A systematic appraisal of the literature. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2006;7:7.
- [6] HSE (Health and Safety Executive). *Self-Reported Work-Related Illness (SWI) and Workplace Injuries: Results from the Labour Force Survey (LFS)—Index of Tables*. Url: <http://www.hse.gov.uk/statistics/lfs/index.htm> [consultato settembre 2023].
- [7] BLS. *Nonfatal Occupational Injuries and Illnesses Requiring Days Away from Work*: Washington, DC, USA: Bureau of Labor Statistics; 2015.
- [8] Pector JT, Lieblich M, Bao S et al. Automation of workplace lifting hazard assessment for musculoskeletal injury prevention. *Ann. Occup. Environ. Med.* 2014;26:15.
- [9] Palmer KT, Harris EC, Linaker C et al. Effectiveness of community- and workplace-based interventions to manage musculoskeletal-related sickness absence and job loss: A systematic review. *Rheumatology (Oxford)*. 2012;51(2):230-242.
- [10] Linaker C, Harris EC, Cooper C et al. The burden of sickness absence from musculoskeletal causes in Great Britain. *Occup. Med.* 2011;61(7):458-64.
- [11] Da Costa BR, Vieira ER. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: A systematic review of recent longitudinal studies. *Am. J. Ind. Med.* 2010;53(3):285-323.
- [12] Ranavolo A, Varrecchia T, Iavicoli S et al. Surface electromyography for risk assessment in work activities designed using the “revised NIOSH lifting equation”. *Int. J. Ind. Ergonom.* 2018;68:34-45.

- [13] Alberto R, Draicchio F, Varrecchia T et al. Wearable monitoring devices for biomechanical risk assessment at work: Current status and future challenges—A systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(9):2001. Erratum in *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(11).
- [14] Armstrong TJ, Burdorf A, Descatha A et al. Scientific basis of ISO standards on biomechanical risk factors. *Scand. J. Work. Environ. Health* 2018; 44(3):323-9.
- [15] Armstrong TJ, Burdorf A, Descatha A et al. Authors' response: Letter to the editor concerning OCRA as preferred method in ISO standards on biomechanical risk factors. *Scand. J. Work. Environ. Health* 2018;44(4):439-440.
- [16] Colombini D, Occhipinti E. Scientific basis of the OCRA method for risk assessment of biomechanical overload of upper limb, as preferred method in ISO standards on biomechanical risk factors. *Scand. J. Work. Environ. Health*. 2018;44(4):436-8.
- [17] Marras WS, Lavender SA, Ferguson SA et al. Quantitative dynamic measures of physical exposure predict low back functional impairment. *Spine*. 2010a;35(8):914-923.
- [18] Marras WS, Lavender SA, Ferguson SA et al. Quantitative biomechanical workplace exposure measures: Distribution centers. *J. Electromyogr. Kinesiol*. 2010b;20(5):813-822.
- [19] Valero E, Sivanathan A, Bosché F et al. Musculoskeletal disorders in construction: A review and a novel system for activity tracking with body area network. *Appl. Ergon*. 2016;54:120-130.
- [20] Kim W, Lorenzini M, Kapicio K et al. ErgoTac: A Tactile Feedback Interface for Improving Human Ergonomics in Workplaces. *IEEE Robot. Autom. Lett*. 2018;3(4):4179-4186.
- [21] Fernandez J, Zhang J, Heidlauf T et al. Multiscale musculoskeletal modelling, data-model fusion and electromyography-informed modelling. *Interface Focus* 2016; 6(2):20150084.
- [22] Sartori M, Llyod DG, Farina D. Neural data-driven musculoskeletal modeling for personalized neurorehabilitation technologies. *IEEE Trans. Biomed. Eng*. 2016;63(5):879-893.
- [23] Ranavolo A, Ajoudani A, Cherubini A et al. The Sensor-Based Biomechanical Risk Assessment at the Base of the Need for Revising of Standards for Human Ergonomics. *Sensors (Basel)*. 2020;20(20):5750.
- [24] Picerno P, Iosa M, D'Souza C et al. Wearable inertial sensors for human movement analysis: a five-year update. *Expert Rev Med Devices*. 2021;18(sup1):79-94.
- [25] Prasanth H, Caban M, Keller U et al. Wearable Sensor-Based Real-Time Gait Detection: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2021;21(8):2727.

- [26] Faisal AI, Majumder S, Mondal T et al. Monitoring Methods of Human Body Joints: State-of-the-Art and Research Challenges. *Sensors* (Basel). 2019;19(11):2629.
- [27] Shahabpoor E, Pavic A. Measurement of Walking Ground Reactions in Real-Life Environments: A Systematic Review of Techniques and Technologies. *Sensors* (Basel). 2017;17(9):2085.
- [28] Merletti R, Farina D. *Surface Electromyography. Physiology, engineering and applications.* IEEE Press, J. Wiley; 2016.
- [29] Merletti R, Parker PA. *Electromyography. Physiology, engineering and non-invasive applications.* IEEE Press, J. Wiley; 2004.
- [30] Ranavolo A. *Principi di Elettromiografia di Superficie.* Roma: Edizioni Universitarie Romane; 2021.
- [31] Url:<https://www.robertomerletti.it> [consultato settembre 2023].
- [32] Hermens HJ, Freriks B, Merletti R et al. European recommendations for surface electromyography. In: 8th Deliverable of the SENIAM Project. Enschede, Roessingh Research and Development. 1999.
- [33] Barbero M, Merletti R, Rainoldi A. *Atlas of Muscle Innervation Zones: Understanding Surface Electromyography and its Applications.* New York: Springer; 2012.
- [34] Ranavolo A, Varrecchia T, Rinaldi M et al. Mechanical lifting energy consumption in work activities designed by means of the "revised NIOSH lifting equation". *Industrial health.* 2017; 55(5):444-454.
- [35] Ranavolo A, Mari S, Conte C et al. A new muscle co-activation index for biomechanical load evaluation in work activities. *Ergonomics.* 2015;58(6):966-979.
- [36] Varrecchia T, Chini G, Tarbouriech S et al. The assistance of BAZAR robot promotes improved upper limb motor coordination in workers performing an actual use-case manual material handling. *Ergonomics.* 2023;1-18.
- [37] Ranavolo A, Chini G, Silvetti A et al. Myoelectric manifestation of muscle fatigue in repetitive work detected by means of miniaturized sEMG sensors. *Int. J. Occup. Safe. Ergonom.* 2018; 24(3):464-474.
- [38] Potvin JR. An equation to predict maximum acceptable loads for repetitive tasks based on duty cycle: evaluation with lifting and lowering tasks. *Work.* 2012a;4(Suppl1):397-400.
- [39] Potvin JR. Predicting maximum acceptable efforts for repetitive tasks: an equation based on duty cycle. *Hum factors.* 2012;54(2):175-88. Erratum in: *Hum Factors.* 2012b;54(2):296.
- [40] Santopaolo A, Lorenzini M, Privitera L et al. Biomechanical Risk Assessment of Human Lifting Tasks via Supervised Classification of Multiple Sensor Data In IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots, Humanoids; Ginowan Okinawa Japan, 20 novembre - 1 dicembre 2022. IEEE, 2022. 746-751.

- [41] Gandolla M, Ferrante S, Ferrigno G et al. Artificial neural network EMG classifier for functional hand grasp movements prediction. *J Int Med Res.* 2017;45(6):1831-1847.
- [42] Zurada J, Karwowski W, Marras WS. A neural network-based system for classification of industrial jobs with respect to risk of low back disorders due to workplace design. *Appl. Ergon.* 1997;28:49–58.
- [43] Chen CL, Kaber DB, Dempsey PG. A new approach to applying feedforward neural networks to the prediction of musculoskeletal disorder risk. *Appl. Ergon.* 2000;31: 269–282.
- [44] Chen CL, Kaber DB, Dempsey PG. Using feedforward neural networks and forward selection of input variables for an ergonomics data classification problem. *Hum. Factors Ergon. Manuf.* 2004;14:31–49.
- [45] Varrecchia T, De Marchis C, Rinaldi M et al. Lifting activity assessment using surface electromyographic features and neural networks. *Int. J. Ind. Ergonom.* 2018;66:1-9.
- [46] Varrecchia T, De Marchis C, Draicchio F et al. Lifting activity assessment using kinematic features and neural networks. *Appl. Sci.* 2020;10(6):1989.

RIFERIMENTI NORMATIVI

Decreto legislativo del 9 aprile 2008, n. 81

Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro.

ISO/DIS 11228-1. Ergonomics - Manual Handling Part 1

Lifting and Carrying; ISO: Geneva, Switzerland;2021.

ISO 11228-2. Ergonomics - Manual Handling Part 2

Pushing and Pulling; ISO: Geneva, Switzerland;2007.

ISO/DIS 11228-3. Ergonomics - Manual Handling Part 3

Handling of Low Loads at High Frequency; ISO: Geneva, Switzerland;2007.

ISO/TR 12295: 2014, Ergonomics

Application Document for ISO Standards on Manual Handling (ISO 11228-1, ISO 11228-2 and ISO 11228-3) and Static Working Postures (ISO 11226).

ISO 11226: 2000, Ergonomics

Valuation of Static Working Postures.

INAIL - Direzione centrale pianificazione e comunicazione

Piazzale Giulio Pastore, 6 - 00144 Roma
dcpianificazione-comunicazione@inail.it

www.inail.it

ISBN 978-88-7484-821-8