



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Studio e sperimentazione di metodi per la valutazione
dell'ergonomia fisica attraverso sistemi di visione e
sensori inerziali.**

**Study and testing of methods for evaluating physical
ergonomics through vision systems and inertial sensors.**

Relatore: Chiar.ma
Prof.ssa Alessandra Papetti

Tesi di Laurea di:
Simone Sospetti

Correlatore: Chiar.ma
Dott.ssa Ing. Marianna Ciccarelli

INDICE

1	Introduzione.....	6
2	Stato dell'arte.....	8
2.1	Ergonomia fisica	8
2.1.1	Normative.....	12
2.1.2	Metodi	14
2.1.3	Strumenti.....	17
3	Valutazione e confronto di due sistemi motion-capture: OptiTrack e Xsens	22
3.1	Studio dei sistemi Motion Capture.....	22
3.1.1	Sistema ottico: OptiTrack.....	23
3.1.2	Sistema inerziale: Xsens	30
3.1.3	Metodo e protocollo sperimentale.....	39
3.1.4	Raccolta dati ed analisi.....	41
3.1.5	Risultati e discussione	41
4	Metodi e strumenti per il calcolo dell'indice di rischio ergonomico	48
4.1	Rapid Entire Body Assessment (REBA).....	50
4.1.1	Automatizzazione calcolo indice REBA.....	58
4.2	Checklist OCRA	70
4.2.1	Automatizzazione calcolo posturale per la checklist OCRA	79
5	Sperimentazione in “Nuova Simonelli”	85
5.1	Raccolta e analisi dati.....	87
5.1.1	<i>Linea 1</i> – Stazione A: Operatore 1	88
5.1.2	<i>Linea 1</i> – Stazione B: Operatore 1	92
5.1.3	<i>Linea 4</i> – Stazione A: Operatore 2	94
5.1.4	<i>Linea 4</i> – Stazione B: Operatore 3	96
5.1.5	<i>Linea 4</i> – Stazione C: Operatore 4	98
5.2	Risultati e discussione	99
6	Sperimentazione in “COSMARI”	100
6.1	Valutazione ergonomica: RULA e REBA	102
6.1.1	Fase di raccolta.....	105
6.1.2	Fase di lancio.....	109
7	Conclusioni.....	113
8	Bibliografia e sitografia.....	116

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 - Percentuale di lavoratori che segnalano un problema di salute legato al lavoro, per tipologia di problema, UE-27, 2013.....	9
Figura 2.2 - Numero di lavoratori affetti da malattie segnalate da gruppo in Europa - Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro; Lussemburgo: 2020.....	10
Figura 2.3 - Valutazione delle attività manuali attraverso le ISO e norme EN nonché indici ergonomici associati.....	14
Figura 2.4 - Sistemi Motion Capture ottici e non ottici per la valutazione del rischio posturale	19
Figura 2.5 - Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo della tecnologia Motion Capture per la valutazione ergonomica.....	21
Figura 3.1 - Telecamere ad infrarossi e marker riflettenti indossabili, dei sistemi di visione OptiTrack	24
Figura 3.2 - Esempio di configurazione delle telecamere OptiTrack.....	24
Figura 3.3 - Interfaccia del software Motive.....	26
Figura 3.4 - Interfaccia del software STT InSight	27
Figura 3.5 - Esempio di report estratto in formato Word da STT InSight.....	29
Figura 3.6 - Hardware del sistema Xsens MVN Awinda: a) Sensore Xsens MVN; b) Dongle USB; c) Recording station; d) Sensore posizionato sulla cinghia in velcro.....	32
Figura 3.7 - Definizione dei 23 segmenti nel modello cinematico di Xsens MVN. Su ciascuno dei 17 segmenti indicati in grassetto è montata un'unità di misura inerziale	33
Figura 3.8 - Interfaccia del software di controllo Xsens MVN Analyze.....	33
Figura 3.9 - Configurazione dei tre soggetti durante le acquisizioni	40
Figura 3.10 - Andamenti nel tempo degli angoli articolari	44
Figura 4.1 - Livelli di azione REBA	51
Figura 4.2 – Punteggi tronco in REBA	52
Figura 4.3 – Punteggi collo in REBA	52
Figura 4.4 – Punteggi gambe in REBA.....	53
Figura 4.5 - Punteggi braccio in REBA	54
Figura 4.6 - Punteggi avambraccio in REBA.....	54
Figura 4.7 - Punteggi polso in REBA	55
Figura 4.8 - Template completo del metodo REBA realizzato in Excel	57
Figura 4.9 - Scheda I della checklist OCRA relativa al recupero nelle attività.....	72
Figura 4.10 – Prima parte della Scheda II della checklist OCRA relativa alla frequenza.....	74

Figura 4.11 - Seconda parte della Scheda II della checklist OCRA relativa alla forza	74
Figura 4.12 - Scheda III della checklist OCRA relativa alla postura	77
Figura 4.13 - Scheda IV della checklist OCRA relativa ai fattori complementari e al calcolo del punteggio finale.....	78
Figura 4.14 - Punteggi predefiniti relativi alle posture incongrue della spalla	81
Figura 4.15 - Punteggi relativi alle posture incongrue del gomito.....	81
Figura 4.16 - Posizione anatomica del corpo umano	82
Figura 4.17 - Punteggi relativi alle posture incongrue del polso	83
Figura 4.18 - Punteggi relativi alle prese della mano.....	84
Figura 4.19 - Esempio foglio di calcolo Excel con algoritmo di compilazione automatica della sezione posturale per la checklist OCRA.....	84
Figura 5.1 - Logo Nuova Simonelli, (MC)	85
Figura 5.2 - Preparazione e allestimento del sistema Xsens per acquisizioni ergonomiche sugli operatori di Nuova Simonelli.....	86
Figura 5.3 – Grafici che riportano i livelli di rischio della stazione A della Linea 1	88
Figura 5.4 - Punteggi parziali relativi allo Step 9 - Neck, con relativo grafico dei livelli di rischio per il collo nella stazione A della Linea 1	89
Figura 5.5 - Operazioni rilevate nella stazione A della Linea 1 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”	89
Figura 5.6 - Grafici di alcuni punteggi RULA d'interesse, in funzione del tempo.....	91
Figura 5.7 - Operazione di avvvitamento manuale nella stazione A della Linea	91
Figura 5.8 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione B della Linea 1	92
Figura 5.9 – Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione B della Linea 1 ...	92
Figura 5.10 - Operazione di sollevamento manuale e conseguente spostamento di componenti pesanti nella stazione B della Linea 1	93
Figura 5.11 -Grafico del punteggio RULA relativo al dorso in funzione del tempo.....	93
Figura 5.12 - Operazioni rilevate nella stazione B della Linea 1 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”	94
Figura 5.13 – Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione A della Linea 2.....	94
Figura 5.14 - Operazione di avvvitamento nella stazione A della Linea 1.....	95
Figura 5.15 - Operazioni rilevate nella stazione A della Linea 4 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”	96
Figura 5.16 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione B della Linea 4	96
Figura 5.17 - Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione B della Linea 4..	96

Figura 5.18 - Operazioni rilevate nella stazione B della Linea 4 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”	97
Figura 5.19 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione C della Linea 4.....	98
Figura 5.20 - Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione C della Linea 4..	98
Figura 5.21 - Operazioni rilevate nella stazione C della Linea 4 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”	98
Figura 6.1 - Logo Gruppo COSMARI, (MC)	100
Figura 6.2 – Elaborazione del movimento nella fase di raccolta all’interno del software Xsens	104
Figura 6.3 – Elaborazione del movimento nella fase di lancio all’interno del software Xsens	105
Figura 6.4 – Grafico a torta dei livelli di rischio per le gambe durante l’attività di raccolta	107
Figura 6.5 – Postura durante la raccolta.....	107
Figura 6.6 – Grafico a torta dei livelli di rischio REBA per collo e dorso durante l’attività di raccolta.....	108
Figura 6.7 – Grafico a torta dei livelli di rischio RULA per collo e schiena durante l’attività di raccolta.....	108
Figura 6.8 – Grafico a torta dei livelli di rischio per le gambe durante l’attività di lancio	110
Figura 6.9 – Postura durante il lancio	110
Figura 6.10 - Grafico a torta dei livelli di rischio REBA per collo e dorso durante l’attività di lancio.....	111
Figura 6.11 - Grafico a torta dei livelli di rischio RULA per collo e schiena durante l’attività di lancio.....	111
Figura 6.12 – Grafici a torta dei livelli di rischio RULA per braccio e polso (dx) durante l’attività di lancio.....	112

1 Introduzione

Nonostante l'Industria 4.0 abbia portato molteplici impatti positivi, attraverso l'adozione di tecnologie digitali, la connettività dei processi produttivi e l'uso intensivo dei dati, l'attenzione recentemente si è spostata sulla mancata considerazione dell'operatore umano: tale aspetto è diventato un catalizzatore per l'attuale rivoluzione industriale. La centralità dell'essere umano emerge, infatti, come uno dei pilastri fondamentali dell'Industria 5.0, una fase evolutiva che mira ad incorporare le tecnologie all'intelligenza umana e pone al centro della produzione l'uomo, concepito come un valore e non un costo, adottando un approccio innovativo, definito "Human-Centered Manufacturing". Questo nuovo paradigma implica che non sia più l'uomo a doversi adattare, ma l'ambiente stesso in cui opera viene progettato e realizzato per migliorare la vita e il lavoro degli operatori, assicurando al contempo sicurezza ed efficienza.

Se un'azienda vuole realizzare prodotti di alto livello qualitativo, anche l'attenzione alle condizioni di lavoro dei suoi operai deve essere mantenuta su un livello egualmente elevato. In questo contesto, è predominante il ruolo dell'ergonomia, che assume una posizione centrale nello studio dell'interazione tra l'individuo e il suo "workplace". L'ergonomia non è solamente una componente ausiliaria, ma riveste un ruolo fondamentale nella prevenzione dagli infortuni e nella promozione del benessere dell'uomo. Le postazioni di lavoro devono conformarsi a specifiche norme ergonomiche per ridurre il rischio di disturbi muscolo-scheletrici e sovraccarichi, creando un sistema che non solo rispetti le esigenze fisiologiche degli operatori, ma contribuisca anche in maniera tangibile a migliorare la loro soddisfazione e produttività. Questa attenzione alla progettazione ergonomica ha condotto, nel corso del tempo, allo sviluppo di diversi sistemi avanzati e metodologie per supportare la valutazione del rischio, legata alle

posture incongrue, discriminando le situazioni accettabili da quelle non accettabili. L'utilizzo di sensori di movimento, telecamere 3D e tecnologie di monitoraggio biomeccanico consentono un'analisi approfondita delle attività lavorative, permettendo di identificare e correggere potenziali problemi ergonomici.

Considerato l'importante ruolo di queste tecnologie, la seguente trattazione fa riferimento ad uno studio comparativo tra il sistema OptiTrack, che traccia il movimento degli individui attraverso telecamere per creare una rappresentazione 3D basata sui dati raccolti, e il sistema inerziale Xsens. Questa analisi mira a valutare la precisione e l'efficacia di entrambe le tecnologie nel campo dell'ergonomia industriale.

In parallelo, sono stati approfonditi i due metodi di valutazione ergonomica 'REBA' e 'Checklist OCRA', con lo scopo di sviluppare algoritmi in grado di automatizzare i calcoli che caratterizzano tali modelli.

Infine, nei capitoli conclusivi di questa tesi, si procederà con la presentazione dei risultati ottenuti da due valutazioni ergonomiche condotte per conto di due differenti aziende. Nel caso di "Nuova Simonelli", sono stati impiegati dati ergonomici raccolti in diverse linee produttive al fine di condurre un'approfondita valutazione ergonomica mediante l'utilizzo del metodo RULA. Per quanto riguarda "Cosmari", sono stati simultaneamente applicati i metodi RULA e REBA, al fine di completare la valutazione posturale durante le attività di raccolta porta a porta svolte dagli operatori ecologici. Tale approccio permette anche di evidenziare le differenze tra questi due metodi, seppur molto simili tra loro.

2 Stato dell'arte

La rapida evoluzione del panorama industriale ha sollevato una crescente consapevolezza sull'importanza di integrare l'essere umano nei contesti produttivi. Questo cambiamento di prospettiva, con una chiara focalizzazione sull'umanizzazione dell'ambiente lavorativo, ha introdotto nuovi paradigmi volti a migliorare la qualità della vita lavorativa e promuovere una produzione più sostenibile. In questo contesto, il presente capitolo si propone di esplorare lo stato dell'arte delle ricerche sull'ergonomia fisica e le tecnologie avanzate impiegate per ottimizzare l'interazione tra l'umano e l'ambiente di lavoro.

2.1 Ergonomia fisica

A partire dalla fine degli anni '80, i Disturbi Muscolo-Scheletrici (DMS) legati al lavoro, rappresentano una percentuale significativa degli infortuni sul lavoro e delle richieste di risarcimento dei lavoratori nei paesi industrializzati occidentali.

Il Dipartimento del Lavoro degli Stati Uniti (2005) definisce i DMS legati al lavoro come lesioni o disturbi dei muscoli, dei nervi, dei tendini, delle articolazioni, della cartilagine e dei dischi spinali associati all'esposizione a fattori di rischio sul luogo di lavoro [1]. Il quadro dei fattori di rischio associati ai DMS rivela una distinzione tra motivi non legati al contesto lavorativo, quali età, sesso, abitudini e stato mentale, e quelli legati alla sfera professionale. Tra i fattori professionali, spiccano i movimenti ripetitivi, il carico statico, le posture scomode e l'uso prolungato ed eccessivo della forza, i quali possono esercitare un carico significativo sul sistema muscoloscheletrico [2]. Questo aumento di stress biomeccanico accresce il rischio di sviluppare DMS, potenzialmente causando danni a varie parti del corpo, tra cui schiena, collo, spalle e polsi.

I principali fattori chiave comprendono attività di movimentazione manuale come sollevare, trasportare e spingere, posture non neutre che comportano piegamenti o torsioni, movimenti ripetitivi e vibrazioni del corpo intero. In generale, l'esposizione a questi fattori non rappresenta un rischio significativo se l'intensità rimane entro i livelli di tolleranza degli individui e se è garantito un recupero sufficiente. Le attività di assemblaggio sono un esempio di lavoro in cui le procedure sono rigorosamente standardizzate con tempi di ciclo brevi (meno di 30 secondi), poche variazioni delle attività e pause ridotte [3].

Nell'Unione Europea, il 60% dei soggetti che presentano problemi di salute legati al lavoro, associano i disturbi muscoloscheletrici come principale causa [4].

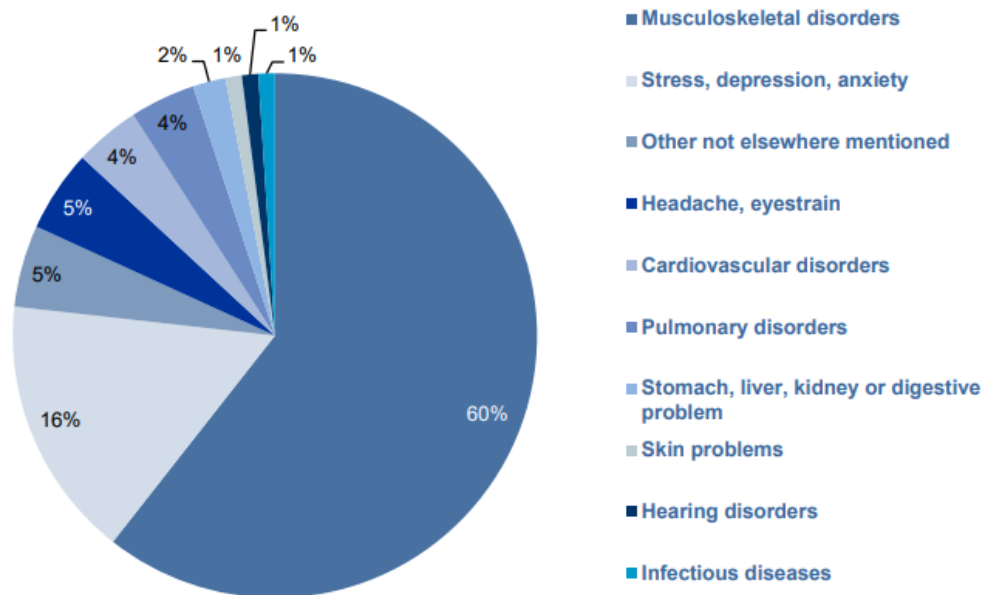


Figura 2.1 - Percentuale di lavoratori che segnalano un problema di salute legato al lavoro, per tipologia di problema, UE-27, 2013

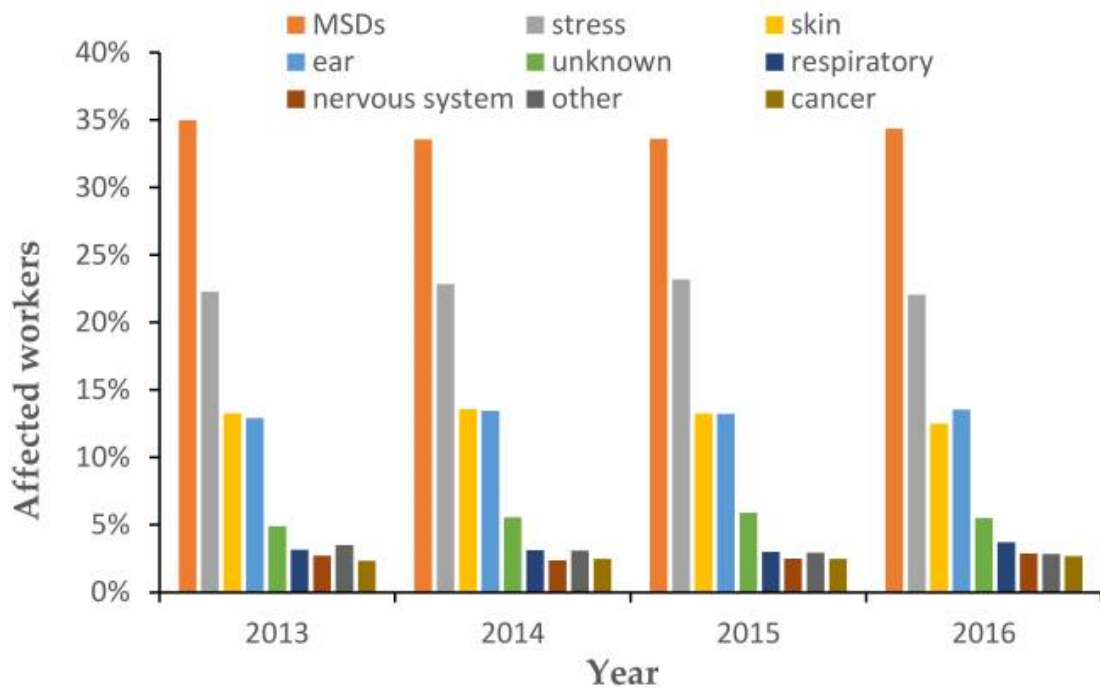


Figura 2.2 - Numero di lavoratori affetti da malattie segnalate da gruppo in Europa - Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro; Lussemburgo: 2020

Altri dati significativi sono stati estratti dall'Indagine Europea sulla Forza Lavoro (2012) che rivela come i DMS, nel complesso, rappresentino il 50% di tutte le assenze dal lavoro di durata superiore a tre giorni, il 49% di tutte le assenze di due settimane o più e circa il 60% di tutti i casi di incapacità permanente segnalati [5]. Un'ampia percentuale di DMS è a breve termine, quindi i lavoratori potrebbero riprendersi adottando semplici misure non appena compaiono i primi sintomi. Quanto prima viene gestito un DMS, tanto meno è probabile che diventi una condizione cronica che porti ad un'assenza dal lavoro a lungo termine. Ciò sottolinea maggiormente l'importanza di interventi tempestivi per ridurre al minimo la disabilità e ripristinare la salute portando a risparmi tangibili in termini di sanità, assistenza sociale e riduzione dell'assenteismo.

Si stima che il costo totale della perdita di produttività attribuibile ai DMS tra le persone in età lavorativa nell'UE, potrebbe raggiungere il 2% del Prodotto Interno Lordo (PIL). È il settore manifatturiero a subire le maggiori perdite economiche: in Germania, ad esempio, si registra una perdita di produzione di circa 6,45 milioni di euro e una perdita di valore lordo di 10,63 milioni di euro [4].

Lo sviluppo dei DMS legati al lavoro è influenzato da molteplici fattori associati all'ergonomia fisica: pertanto, sulla base di tali dati e statistiche esposte, la sfida principale per l'ergonomia è progettare il lavoro in modo da prevenire i disturbi muscoloscheletrici, senza impatto negativo sulla qualità della produzione e sulla produttività. L'ergonomia fisica implica l'esame delle interazioni tra uomo, macchina e ambiente da un punto di vista meccanico e fisico. In questo particolare contesto viene posta enfasi sull'indagine delle posizioni assunte dai lavoratori durante i turni, dello sforzo e della gestione dei carichi, della movimentazione di strumenti e attrezzature, nonché della disposizione degli spazi operativi e dell'organizzazione complessiva della postazione di lavoro.

2.1.1 Normative

L'ergonomia fisica, intesa come disciplina che mira a ottimizzare l'interazione tra gli individui, il lavoro e il loro ambiente, è soggetta a specifiche normative per garantire la salute e la sicurezza sul luogo di lavoro.

Gli standard internazionali di ergonomia furono formalmente presi in considerazione nel 1973 da un simposio dell'International Ergonomics Association (IEA) tenutosi presso l'Università di Loughborough nel Regno Unito. Le raccomandazioni hanno portato alla creazione dell'ISO TC 159 "Ergonomia", con la Germania (DIN) che ne detiene la segreteria [6], [7]. D'interesse è l'ISO/TC 159/SC 3, incentrata sulla standardizzazione di metodi di misurazione del corpo umano, metodi di valutazione delle posture di lavoro, delle prestazioni fisiche e della forza e le procedure ergonomiche necessarie per applicarli.

In Italia, le principali fonti normative sono rappresentate dalle norme UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), leggi e decreti ministeriali, nonché dalle disposizioni dell'INAIL (Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro). Il D.Lgs. 81/08 (Testo Unico sulla Sicurezza e Salute nei luoghi di lavoro) sancisce che la valutazione e gestione del rischio da sovraccarico biomeccanico è per tutti i Datori di Lavoro un obbligo di legge [8]: vengono esplicitamente richiamate le disposizioni delle norme tecniche della serie ISO 11228 (parti 1-2-3) all'interno delle quali sono riportate linee guida dettagliate per la valutazione del rischio e per la definizione degli interventi da apportare per la sua riduzione.

Tabella 2.1 - Parti della serie UNI ISO 11228 - "Ergonomia - Movimentazione manuale"

UNI ISO 11228-1	“Operazioni di sollevamento e trasporto di carichi”
UNI ISO 11228-2	“Operazioni di spinta e traino di carichi”
UNI ISO 11228-3	“Movimenti ripetuti degli arti superiori”

Ai fini della valutazione del rischio legato alla movimentazione manuale dei carichi (MMC), utili indicazioni possono essere tratte dalle norme tecniche della serie UNI EN 1005-2009 (“Sicurezza del macchinario – Prestazione fisica umana” parti 1, 2, 3, 4 e 5) in termini di movimentazione di manuale di macchinari e di parti componenti il macchinario, così come la movimentazione di oggetti leggeri ad alta frequenza.

Un buon design ergonomico è un requisito fondamentale per evitare posture lavorative inadeguate che possano sovraccaricare il sistema muscoloscheletrico. La UNI ISO 11226:2019, in vigore dal 6 Giugno 2019, adotta lo standard della UNI ISO 11226:2000 (“Ergonomia – Valutazione delle posture di lavoro statiche”) e riporta raccomandazioni di tipo ergonomico a coloro che si occupano della progettazione, o della riprogettazione, del lavoro specificando i limiti raccomandati per le posture statiche di lavoro senza alcuno sforzo o con il minimo sforzo esterno, tenendo conto degli angoli assunti dalle varie articolazioni del corpo sia della durata del tempo [9].

2.1.2 Metodi

Per la valutazione dei rischi ergonomici, gli studi negli anni hanno fornito diversi metodi e strumenti [10], mostrati nella Tabella 2.2. I fattori di esposizione analizzati mediante tali tecniche, variano: alcuni di essi permettono solo valutazioni posturali, mentre la maggior parte valuta diversi aspetti di esposizione fisica, come riportato nella Tabella 2.3 [11]. Il numero di metodologie disponibili è, quindi, molto ampio, eppure nessuno di essi è universalmente ideale per tutti gli scopi: approcci diversi sono necessari per il raggiungimento di obiettivi differenti. Questo rende la scelta di un metodo, in base alle specifiche esigenze, una fase molto delicata ed impegnativa: l'utente dovrà considerare il compromesso tra accuratezza, complessità, costi e facilità d'uso durante l'identificazione di un metodo appropriato [12].

Un contributo è fornito dalle normative, le quali permettono di individuare i metodi più adatti a determinati contesti: le norme ISO 11228-1 e ISO 11228-2 prevedono l'utilizzo di Revised NIOSH Lifting Equation e Tabelle di Snook e Ciriello per la valutazione del rischio da movimentazione manuale di carichi [9]. Mentre le normative EN 1005-5 e ISO 11228-3 considerano il metodo OCRA come metodo preferenziale per la valutazione di lavori manuali ripetitivi, essendo considerato il più completo [13]. La Figura 2.3 riporta in uno schema quanto detto sulla relazione tra normative e metodi di valutazione.

Manual material activity	Lifting & carrying	Pushing & pulling	Low loads at high frequency	Posture & movements
ISO	11228-1	11228-2	11228-3	11226
EN	1005-2	1005-3	1005-5	1005-4
Ergonomic Index	NIOSH	Snook & Ciriello	OCRA	OWAS, RULA & REBA

Figura 2.3 - Valutazione delle attività manuali attraverso le ISO e norme EN nonché indici ergonomici associati [14]

La checklist OCRA (Occupational Repetitive Actions) è uno strumento semplificato per misurare il rischio di sovraccarico biomeccanico degli arti superiori, che può essere utilizzato sia nella fase iniziale di stima dei livelli di rischio in un determinato ambiente o per gestire il rischio. Tale tecnica si compone di cinque parti incentrate sui quattro principali fattori di rischio (tempo di recupero, frequenza, forza, postura) e una serie di fattori complementari (vibrazioni, basse temperature, impatti ripetuti ecc.). L'analisi prevede l'utilizzo di punteggi preassegnati (più alto è il punteggio, maggiore è il rischio) per definire il rischio associato a ciascuno dei fattori sopra menzionati. Di conseguenza, la somma e il prodotto dei valori parziali generano un punteggio finale che stima il livello di esposizione, sulla base dell'indice OCRA, caratterizzato da quattro diversi livelli (verde, giallo, rosso e viola). Nel voler valutare, invece, la postura dell'intero corpo, il "Rapid Entire Body Assessment" (REBA), sviluppato da Sue Hignett e Lynn McAtamney [15], è tra i metodi più utilizzati [16]. Il principio su cui si basa il metodo REBA è molto simile a quello del "Rapid Upper-Limb Assessment" (RULA): in generale, si osservano le posizioni dei singoli segmenti corporei e i punteggi posturali aumentano quando le posture si discostano dalla posizione neutra. Si effettua un'analisi congiunta delle posture degli arti superiori (braccio, avambraccio, polso) del tronco, del collo e degli arti inferiori, oltre a discriminare il tipo di presa e di attività muscolare eseguita. I punteggi ricavati dalla valutazione posturale descritta vengono sommati per ottenere un punteggio complessivo che poi può essere confrontato con tabelle che indicano in rischio in cinque livelli, da trascurabile a molto elevato. I punti di forza di questo metodo sono rappresentati dalla facilità e rapidità d'uso oltre ad un buon rapporto costo-efficienza; gli svantaggi sono dovuti principalmente alla mancata considerazione dei tempi di recupero, durata dell'esposizione e frequenza delle posture nell'arco della giornata [12].

Tabella 2.2 - Metodi di valutazione del rischio ergonomico

Riferimento	Metodo/Tecnica	Principali caratteristiche	Parti del corpo
[17]	OWAS	Registrazione ed analisi delle posture dell'intero corpo	Arti sup. Arti inf. Tronco
[18]	RULA	Categorizzazione della postura e della forza del corpo, correlati a diversi livelli di valutazione	Arti sup. Tronco Collo
[19]	REBA	Categorizzazione della postura e della forza del corpo, correlati a diversi livelli di valutazione	Arti sup. Arti inf. Tronco Collo
[20]	Indice OCRA	Indice sintetico di esposizione a movimenti ripetuti degli arti superiori	Arti sup.
[13]	Checklist OCRA	Procedura breve per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico	Arti sup.
[21]	Mini-Checklist OCRA	Procedura rapida e sintetica per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico in settori dove l'organizzazione del lavoro non presenta ritmi, tempi e cicli come nell'industria classica	Arti sup.
[22]	Strain Index	Indice combinato di sei fattori di esposizione, per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico nelle attività lavorative comportanti movimenti ripetuti	Arti sup.
[23]	OSHA	Metodo per la valutazione semi-quantitativa delle posture più critiche e per la determinazione dell'urgenza delle azioni correttive.	Arti sup. Arti inf. Tronco
[24]	NIOSH Lifting Equation	Equazione che permette l'analisi della postura correlata al carico biomeccanico per la movimentazione manuale	Tronco
[25]	Tabelle di Snook e Ciriello	Tabelle che forniscono valori limite di riferimento del peso (azioni di trasporto) o della forza esercitata nella fase iniziale e di mantenimento dell'azione (traino e spinta)	Tronco

Tabella 2.3 - Fattori di esposizione valutati dalle tecniche

Rif.	Metodo	Postura	Carico/ Forza	Frequenza di movimento	Durata	Recupero	Altro*
[17]	OWAS	X	X				
[18]	RULA	X	X	X			
[19]	REBA	X	X	X			X
[20]	Indice OCRA	X	X	X	X	X	X
[13]	Checklist OCRA	X	X	X	X	X	X
[21]	Mini-Checklist OCRA	X	X	X	X	X	X
[22]	Strain Index	X	X	X	X		X
[23]	OSHA	X	X	X			
[24]	NIOSH Lifting Equation	X	X	X	X	X	X
[25]	Tabelle di Snook e Ciriello		X	X			X

Altro* include accoppiamento di carico, tipo di presa con le mani, distanza di movimentazione carichi, fattori organizzativi ecc.

2.1.3 Strumenti

I vari metodi citati possono essere classificati in tre categorie: self-report, metodi di osservazione e misurazioni dirette. In primo luogo, le autovalutazioni vengono intese principalmente come interviste e questionari dedicati ai lavoratori; tuttavia, presentano inconvenienti come l'inaffidabilità della percezione dell'esposizione e del rischio, dando luogo a interpretazioni distorte. In secondo luogo, i metodi osservativi prevedono l'osservazione diretta del lavoratore e dei compiti corrispondenti, come i diffusi metodi RULA, REBA, NIOSH ecc. Il problema è che la raccolta dei dati viene generalmente ottenuta mediante l'osservazione soggettiva o la semplice stima degli angoli proiettati nei video/immagini: ciò porta a una bassa precisione e ad un'elevata variabilità. Alla luce di tutto questo, per compensare tali criticità, è stata sviluppata un'ampia gamma di metodi diretti che si basano su sensori collegati direttamente al soggetto, per la misurazione delle variabili di esposizione sul lavoro.

Questi metodi vanno da semplici dispositivi portatili per la misurazione dell'ampiezza del movimento articolare ai goniometri elettronici, che forniscono registrazioni continue del movimento attraverso le articolazioni durante il processo. Un altro metodo diretto è l'Analisi Elettromiografica (EMG), per stimare la tensione muscolare, così come il monitoraggio della frequenza cardiaca [11].

L'attuale contesto dell'Industria 4.0 si focalizza sull'importanza di aggiornare i metodi osservativi e di sviluppare, quindi, nuove tecniche oggettive per la valutazione ergonomica. Nello specifico, per prevenire il rischio muscoloscheletrico, la tecnologia di Motion Capture è una delle più accurate, moderne e oggettive [26]. Il MoCap appartiene alla categoria dei metodi di misurazione diretti: fornisce la digitalizzazione in tempo reale del movimento umano. Risulta che sia la tecnologia più comunemente utilizzata per la valutazione dell'ergonomia nei settori industriali (manufatturiero, logistico e edile), ma l'importanza della tecnologia MoCap sta crescendo anche nel settore sanitario per valutare le posture lavorative, come strumento di supporto alla riabilitazione o per individuare precocemente segni di malattia. I sistemi MoCap a scopo ergonomico possono essere di due tipi:

- *Sensor-based*, basati su unità di misura inerziali (IMU). Le IMU sono dispositivi elettronici che catturano il movimento attraverso l'elaborazione del segnale dei dati in uscita di vari sensori integrati (accelerometri, giroscopi e magnetometri). L'intero sistema funziona secondo il principio del rilevamento mediante sensori magnetici e a controllo inerziale, posizionati su apposite tute o supporti indossabili. Le tute convenzionali per il Motion Capture sono dotate di sensori su 17 diverse parti del corpo per rilevare la testa, gli arti superiori, comprese le mani, la schiena, il busto e gli arti inferiori, compresi i piedi.

- *Vision-based*, sistemi basati sull'acquisizione del movimento dell'oggetto per mezzo di un sistema di telecamere. L'oggetto è dotato di marcatori (markers), individuabili dalle telecamere; viene catturato il movimento di questi marker per riprodurre l'intero corpo umano in moto. Le telecamere inquadrano la scena da diverse angolazioni e vengono calibrate congiuntamente attraverso un sistema che conosce l'esatta posizione di ciascuna telecamera nello spazio [27].

I dati, per la valutazione dell'ergonomia del posto di lavoro, ricavati con questi sistemi sono ottenuti mediante simulazioni digitalizzate, che evita incoerenze e giudizi soggettivi. Per tale ragione la valutazione può essere eseguita senza la presenza di un ergonomo esperto o di un fisiologo.

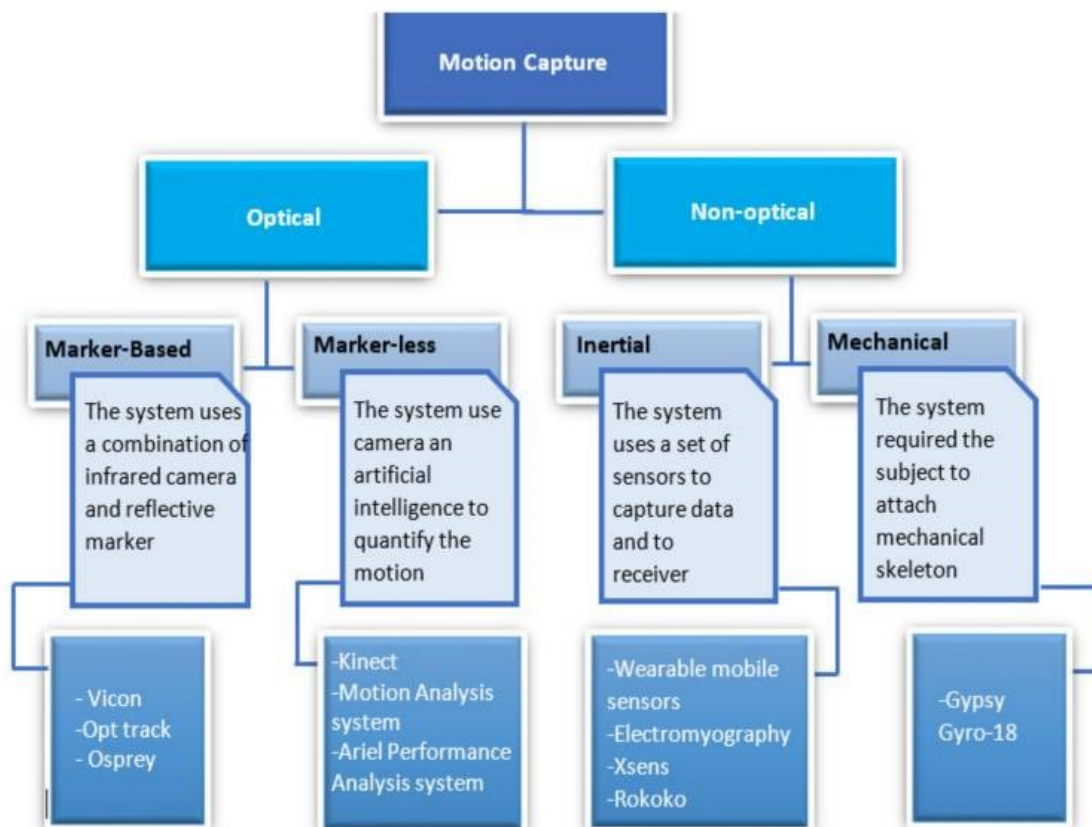


Figura 2.4 - Sistemi Motion Capture ottici e non ottici per la valutazione del rischio posturale [28]

Le sperimentazioni e gli studi, come riporta la letteratura scientifica, hanno messo in risalto la tecnologia MoCap, che emerge come un valido supporto nell'analisi di compiti lavorativi impegnativi e ripetitivi, contribuendo significativamente a ridurre il rischio di infortuni e disturbi muscoloscheletrici, oltre a potenziare le prestazioni lavorative e la produttività complessiva. Tuttavia, è importante notare che l'adozione di tale tecnologia comporta alcuni svantaggi, con il costo delle tute per il Motion Capture che rappresenta una delle principali sfide. Questo fattore limitante spesso limita lo studio dell'ergonomia delle posizioni di lavoro agli istituti di ricerca, dove risorse finanziarie più ampie sono disponibili. Nonostante queste sfide economiche, i vantaggi derivanti dall'utilizzo della tecnologia di Motion Capture sono significativi. La raccolta dei dati in un ambiente lavorativo reale, l'assenza di lunghi tempi di preparazione e l'applicazione indolore dei sensori senza ostacolare le attività lavorative sono tutti elementi positivi. Al di là dei benefici attuali, la tecnologia di Motion Capture è anche indicata come una risorsa preziosa per affrontare sfide future nei luoghi di lavoro, di fronte a cambiamenti demografici, all'aumento del numero di lavoratori anziani e alle loro specifiche esigenze [29]. In questo contesto, lo strumento di Motion Capture potrebbe giocare un ruolo cruciale nell'adattamento dei posti di lavoro per soddisfare queste esigenze in evoluzione. La Figura 2.5, è un quadro generale dei vantaggi e svantaggi del MoCap in ambito ergonomico, rispetto all'utilizzo di metodi standard.

Advantages	Disadvantages
Objectivity	Price
Reliability	Signal interference during data transmission in industry
Repeatability	Limited suit size
Combining of multiple ergonomic methods	Calibration required
Evaluation in pre-design stage	Large volume of transported data
Connectivity with AI	Requirement for high-powered PC
Real-time automatic data acquisition	

Figura 2.5 - Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo della tecnologia Motion Capture per la valutazione ergonomica [27]

L'ergonomia fisica rappresenta quindi una disciplina molto complessa e intrinsecamente problematica, la cui valutazione nell'ambito lavorativo deve rispettare criteri normativi, oltre che tecnici. Un'ampia varietà di metodi è stata sviluppata per affrontare questa sfida; tuttavia, diventa cruciale la selezione del metodo o della combinazione di metodi più appropriati in base alle specifiche finalità. Le valutazioni più generali, basate sull'osservazione, sembrano essere più adatte quando si hanno limitazioni sul tempo e sulle risorse a disposizione. Ma è sorta la necessità di implementare strumenti, come la tecnologia MoCap, che non solo semplifichino la selezione dei metodi di valutazione, ma che siano anche in grado di renderli più precisi e meno soggettivi.

3 Valutazione e confronto di due sistemi motion-capture: OptiTrack e Xsens

La finalità di tale trattazione, nell'ambito dell'ergonomia fisica, è quella di ampliare ed approfondire le conoscenze di strumenti e metodi, trattati nel precedente capitolo, impiegati per valutare le posture assunte dai lavoratori nell'ambito industriale.

3.1 Studio dei sistemi Motion Capture

Le unità di misura inerziale (IMU) sono diventate il pilastro nella valutazione del movimento umano al di fuori di ambienti sperimentali, rilevando e quantificando con estrema precisione gli angoli articolari. Ciò ha portato risvolti positivi nell'ergonomia, così come nella riabilitazione e nella scienza dello sport. Ma l'acquisizione del movimento articolare è resa possibile anche da sistemi optoelettronici, una tecnologia ottica che permette di valutare, in diversi ambiti, i movimenti di ciascuna articolazione nello spazio [30].

Allo scopo di effettuare un confronto tra tali sistemi Motion Capture di differente natura, la prima sperimentazione è stata per lo più realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), dell'Università Politecnica delle Marche: i protagonisti di questa analisi sono i due sistemi OptiTrack e Xsens. In primo luogo, si vuol quantificare l'accuratezza degli approcci ergonomici molto consolidati basati sull'utilizzo delle IMU (Xsens) e in secondo luogo, noti i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna tecnologia, si vogliono evidenziare le differenze principali nella misura degli angoli articolari, fondamentali per una completa valutazione posturale, e quindi ergonomica.

3.1.1 Sistema ottico: OptiTrack

OptiTrack è un'azienda specializzata nella progettazione di hardware e software all'avanguardia per l'acquisizione e il tracciamento del movimento 3D. Famosa per la sua precisione 3D leader nel settore, offre flussi di lavoro semplificati, output in tempo reale con bassissima latenza e produce localmente, garantendo prezzi competitivi nel settore. Con un approccio aperto agli sviluppatori e accesso gratuito, OptiTrack risulta essere la scelta preferita in vari settori, tra cui realtà virtuale, droni, giochi e produzione cinematografica, istruzione e ricerca universitaria, ingegneria, robotica, misurazione industriale, scienze della vita, prestazioni sportive, prevenzione degli infortuni e altro ancora [31].

Il sistema Motion Capture, fornito da OptiTrack, rientra nella categoria di tecnologie di tipo ottico con marcatori (Mbased). Utilizza più telecamere ad infrarossi, sincronizzate tra loro, che acquisiscono la posizione e il movimento dei vari marker riflettenti, presenti direttamente sulla tuta in velcro indossata dall'individuo da rilevare nello spazio. I dati raccolti dai sensori di immagine vengono poi elaborati dal software come un insieme di punti, corrispondenti ai marcatori individuati, disposti in una configurazione unica a realizzare una rappresentazione digitalizzata 3D del corpo umano in movimento [32].

Il sistema OptiTrack a disposizione per il seguente studio è installato nel Laboratorio MIR (Mechatronics & Industrial Robotics) dell'Università Politecnica delle Marche, ed è composto da 12 videocamere ad alta prestazione, compresi i vari marker, tute ed accessori forniti dall'azienda per garantire la sua totale funzione applicativa.



Figura 3.1 - Telecamere ad infrarossi e marker riflettenti indossabili, dei sistemi di visione OptiTrack

Seppur due telecamere sono sufficienti ad ottenere la posizione di un dato marker, si ritiene necessario l'utilizzo di più telecamere per garantire che la linea di vista tra almeno due telecamere e un marker sia sempre garantita in un dato momento. Vale però la pena ricordare che l'utilizzo di telecamere aggiuntive, oltre ad un investimento maggiore, comporta un'elaborazione delle informazioni più complicata.

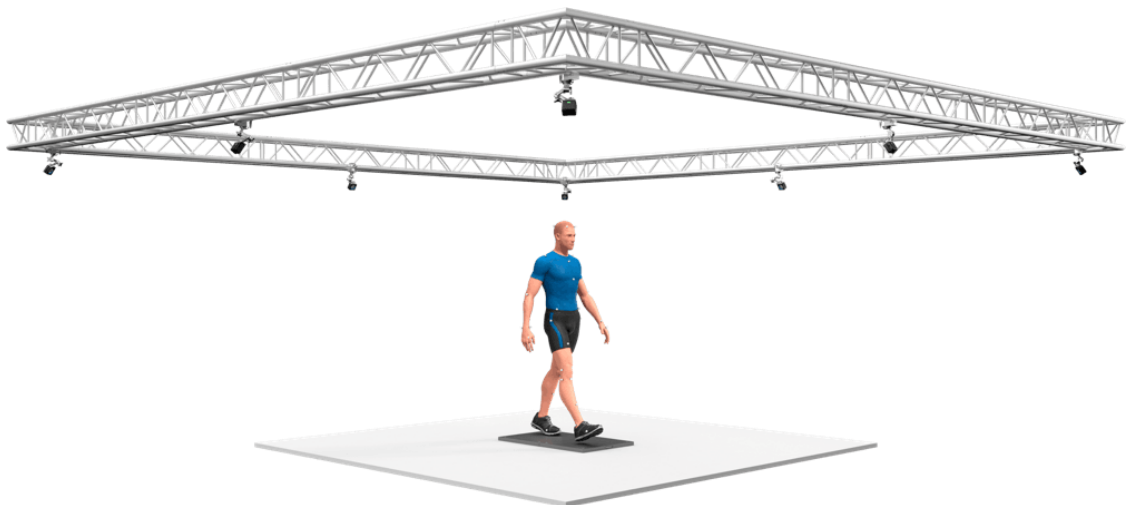


Figura 3.2 - Esempio di configurazione delle telecamere OptiTrack

Le telecamere hanno una velocità di acquisizione compresa tra 30 e 1000 fotogrammi al secondo, che consente a questo particolare sistema di catturare oggetti che viaggiano a velocità più elevate rispetto ad altri sistemi di acquisizione. La calibrazione del sistema deve essere eseguita facendo inizialmente inseguire dalle telecamere un oggetto riconosciuto dal software; ciò consente di calcolare la posizione di ciascuna telecamera rispetto a un punto di riferimento noto. Se una delle telecamere viene spostata, anche minimamente, sarà necessaria la ricalibrazione [33]. L'installazione delle telecamere richiede, preliminarmente, la scelta di un'area idonea e di dimensioni adeguate agli scopi. Questo perché il sistema è in grado di offrire le massime prestazioni solo in determinate condizioni quali l'assenza di oggetti e pavimenti riflettenti, in assenza di altre sorgenti luminose ecc. perché andrebbero ad ostacolare ed interferire con il principio di acquisizione delle telecamere.

Oltre all'hardware ed un computer host, il sistema richiede uno o più software per il funzionamento completo:

- *Motive*, è una piattaforma software che si abbina alle telecamere OptiTrack per tracciare e catturare il movimento dei marker attaccati al soggetto. Offre una configurazione semplice, produce dati puliti e permette la calibrazione delle telecamere del sistema. I dati acquisiti possono essere registrati ed esportati, in diversi formati (CSV, C3D, BVH ecc.) o trasmessi in live streaming in altre pipeline [34].



Figura 3.3 - Interfaccia del software Motive

- *STT InSight*, è un ulteriore software sviluppato dalla collaborazione di OptiTrack con STT Systems. È una soluzione completa, scientifica e clinica per l'analisi del movimento umano 3D in tempo reale. STT InSight riceve dati sulla posizione dei marcatori 3D senza etichetta da Motive e calcola le posizioni delle articolazioni, la posizione delle ossa e l'orientamento con una precisione leader del settore. I dati biomeccanici, come spostamento, velocità, accelerazione, forze e angoli articolari vengono visualizzati in tempo reale e i report possono essere generati in pochi secondi.

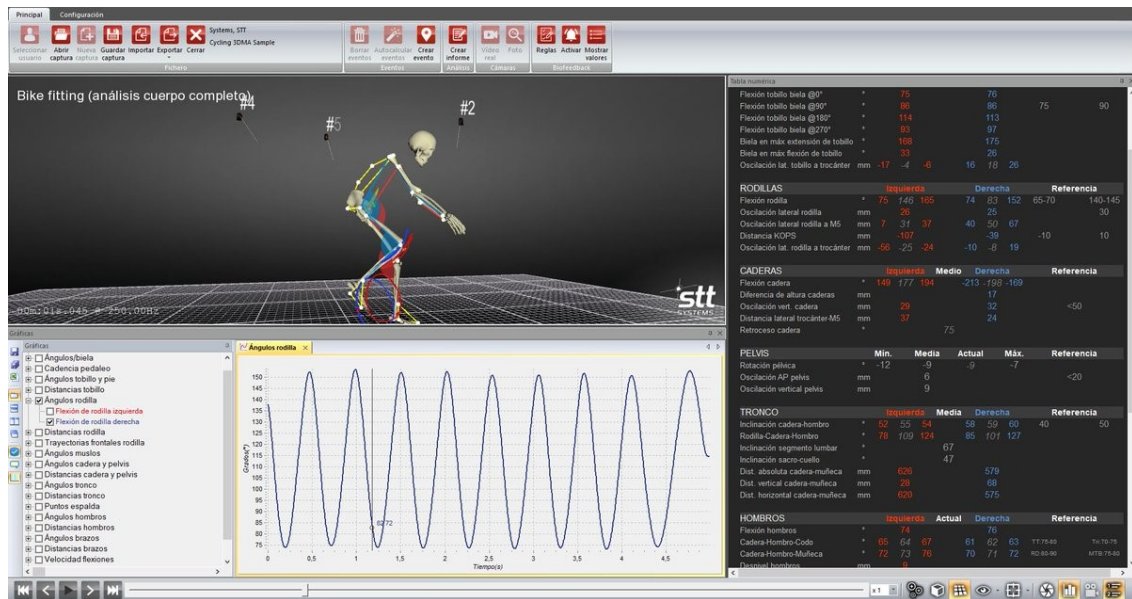


Figura 3.4 - Interfaccia del software STT InSight

I report e i dati ricavati dal software STT InSight, come mostra la Figura 3.5, sono d'interesse dal punto di vista ergonomico, in quanto comprendono i valori degli angoli articolari dell'intero corpo umano, e il loro andamento nel tempo di acquisizione, che possono essere utilizzati per un'analisi posturale. Perciò, nel caso studio presentato, è stato necessario l'impiego di tale software per poter usufruire di dati confrontabili con Xsens. Di seguito sono elencati gli angoli articolari che STT InSight fornisce in output, in diversi formati:

- *Neck angles*, che contiene i valori degli angoli di rotazione, flessione frontale e laterale relativi al collo;
- *Trunk angles*, che contiene i valori degli angoli di rotazione, di flessione frontale e laterale relativi alla schiena

- *Shoulder angles*, che contiene i valori degli angoli di flessione/estensione e abduzione/adduzione di entrambe le spalle. I dati sono suddivisi rispettivamente per la spalla sinistra e per la spalla destra;
- *Elbow angles*, che contiene i valori degli angoli di flessione/estensione di entrambi i gomiti. I dati sono suddivisi rispettivamente per il gomito sinistro e per il gomito destro;
- *Hip angles*, che contiene i valori degli angoli di flessione/estensione e abduzione/adduzione di entrambe le anche (fianchi). I dati sono suddivisi rispettivamente per l'anca sinistra e per l'anca destra;
- *Knee angles*, che contiene i valori degli angoli di flessione/estensione di entrambe le ginocchia. I dati sono suddivisi rispettivamente per il ginocchio sinistro e per il ginocchio destro;
- *Ankle angles*, che contiene i valori degli angoli di dorsiflessione/plantarflessione di entrambe le caviglie. I dati sono suddivisi rispettivamente per la caviglia sinistra e per la caviglia destra.

Full-body analysis (19p)

STT InSight 2023.0 (Motive) Version 2023.0 | Powered by STT SYSTEMS

STT SYSTEMS

Full-body analysis (19p)

STT InSight 2023.0 (Motive) Version 2023.0 | Powered by STT SYSTEMS

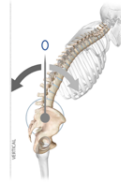
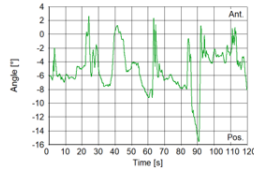
STT SYSTEMS

FULL NAME SOSPETTI, SIMONE	BIRTHDAY	STUDY PERFORMED BY: 
TESTER DETAILS	REPORT DATE 8/11/2023	

1. TRUNK

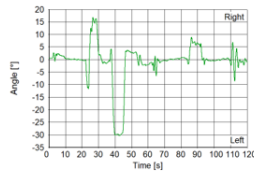
Tilt
Anterior(+)/Posterior(-)

Min -16°
Max 2°
Range 18°



Lateral Flexion
Right(+)/Left(-)

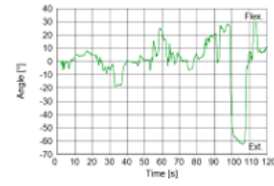
Min -31°
Max 16°
Range 47°



2. NECK

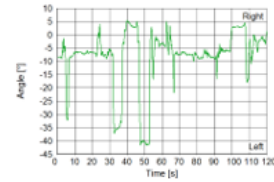
Flexion
Flexion(+)/Extension(-)

Min -63°
Max 31°
Range 95°



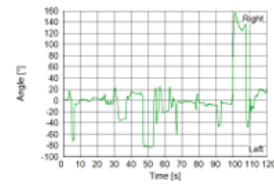
Lateral Flexion
Right(+)/Left(-)

Min -42°
Max 5°
Range 46°



Rotation
Right(+)/Left(-)

Min -83°
Max 157°
Range 240°



Full-body analysis (19p)

STT InSight 2023.0 (Motive) Version 2023.0 | Powered by STT SYSTEMS

STT SYSTEMS

Full-body analysis (19p)

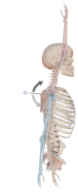
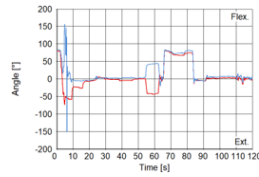
STT InSight 2023.0 (Motive) Version 2023.0 | Powered by STT SYSTEMS

STT SYSTEMS

3. SHOULDERS

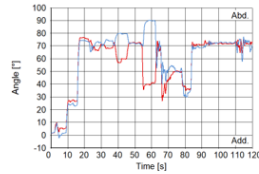
Flexion
Flexion(+)/Extension(-)

LEFT	RIGHT
Min -73°	-151°
Max 81°	156°
Range 154°	307°



Abduction
Abduction(+)/Adduction(-)

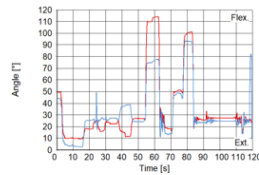
LEFT	RIGHT
Min 27°	-3°
Max 76°	90°
Range 49°	92°



4. ELBOWS

Flexion
Flexion(+)/Extension(-)

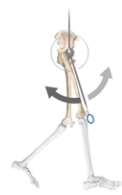
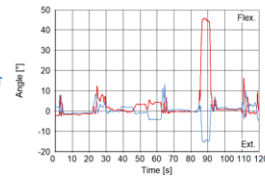
LEFT	RIGHT
Min 9°	2°
Max 114°	93°
Range 104°	91°



5. HIPS

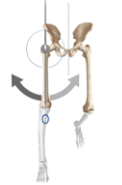
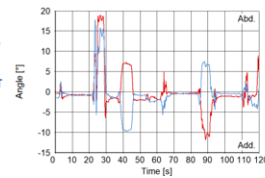
Flexion
Flexion(+)/Extension(-)

LEFT	RIGHT
Min -3°	-16°
Max 45°	13°
Range 48°	28°



Abduction
Abduction(+)/Adduction(-)

LEFT	RIGHT
Min -12°	-10°
Max 19°	17°
Range 30°	27°



6. KNEES

Flexion
Flexion(+)/Extension(-)

LEFT	RIGHT
Min 1°	-4°
Max 43°	20°
Range 42°	24°

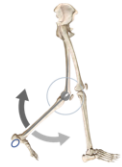
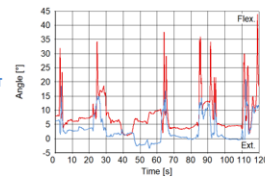


Figura 3.5 - Esempio di report estratto in formato Word da STT InSight

3.1.2 Sistema inerziale: Xsens

Xsens Technologies, leader nell'innovazione della tecnologia di rilevamento del movimento 3D e fornitore di sistemi Motion Capture, ha recentemente fatto il suo ingresso in Movella, un'azienda dedicata a fornire soluzioni avanzate nel mondo della digitalizzazione del movimento. La tecnologia di tracciamento del movimento 3D, sviluppata da Xsens, è rinomata per le prestazioni best-in-class, la qualità eccezionale e l'alta facilità d'uso. Con oltre dieci anni di ricerca e sviluppo sui sensori, queste tecnologie offrono una perfetta integrazione tra il mondo fisico e quello digitale. Catturando e analizzando con precisione il movimento umano in condizioni di lavoro reali, la soluzione Xsens Motion Capture di Movella rende disponibili informazioni preziose per ottimizzare l'efficienza, la sicurezza e il benessere sul posto di lavoro. Nello specifico, vengono offerti da Xsens tre opzioni differenti di hardware MoCap: MVN Link, MVN Awinda e MVN Awinda Starter.

In questo paragrafo verrà trattato il sistema Xsens MVN Awinda, il quale è utilizzato nell'analisi stessa. È dotato di 17 sensori wireless posizionabili sul corpo tramite cinghie indossabili e regolabili, appartenenti alla categoria delle Unità di Misurazione Magnetica Inerziale (IMMU). Per effettuare il tracciamento, i motion tracker comprendono dei sensori di tipo inerziale, in particolare un giroscopio 3D e un accelerometro 3D, oltre ad un magnetometro 3D, un termometro e un barometro, che sono combinati in un unico pacchetto per mezzo di complessi algoritmi di “sensor fusion” [35]:

- *Giroscopio tridimensionale*, è un sensore inerziale che misura la velocità angolare che, per integrazione temporale, fornisce una stima della variazione dell'orientamento. L'operazione di integrazione temporale causa un incremento

dell'errore nel tempo, causando l'effetto della deriva che viene compensato però dai contributi dell'accelerometro e del magnetometro;

- *Accelerometro tridimensionale*, è un sensore inerziale che misura la accelerazione lineare, pertanto se il sensore non è in movimento l'accelerazione misurata coincide con l'accelerazione gravitazionale;
- *Magnetometro tridimensionale*, è in grado di misurare forza e direzione del campo magnetico circostante. Se non vi sono interferenze magnetiche nell'ambiente, esso misura il campo magnetico terrestre;
- *Termometro*, utilizzato come sensore di supporto per compensare le dipendenze di temperatura tra gli altri sensori;
- *Barometro*, permette di misurare la pressione atmosferica, successivamente utilizzata per stimare le informazioni riguardanti l'altezza del sensore.

I micro-sensori, nella configurazione descritta, interagiscono con una stazione di registrazione e un "Dongle USB" mediante connessione wireless al fine di raccogliere dati sincronizzati da ciascun motion tracker attivo. Infine, l'output del sistema inerziale può essere visualizzato attraverso un software dedicato che recupera i dati dalla stazione mediante un collegamento USB.

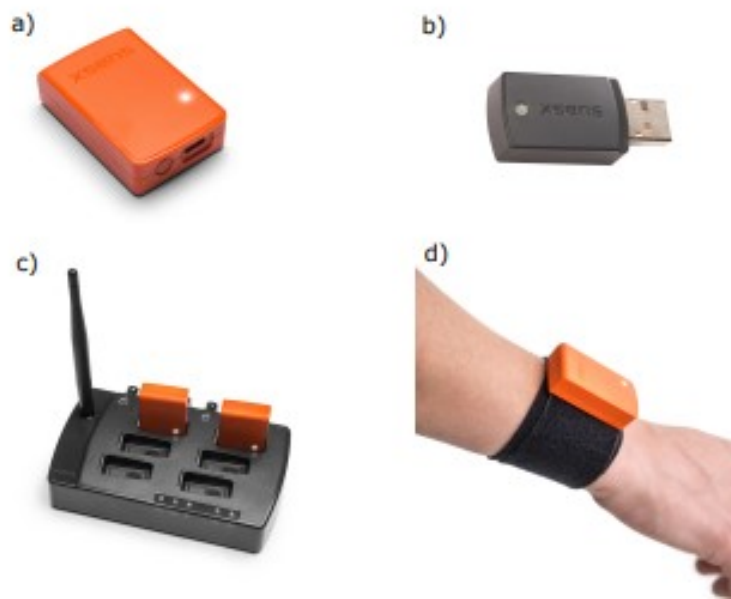


Figura 3.6 - Hardware del sistema Xsens MVN Awinda: a) Sensore Xsens MVN; b) Dongle USB; c) Recording station; d) Sensore posizionato sulla cinghia in velcro

Prima di iniziare le registrazioni, vengono misurate le dimensioni corporee del soggetto e applicate nel software di riferimento. In particolare, sono richieste l'altezza in posizione eretta e la lunghezza del piede, per stimare le lunghezze dei segmenti con equazioni di regressione. È possibile poi posizionare i sensori sulle varie parti del corpo, secondo il protocollo, ed effettuare la calibrazione, al termine della quale il software può iniziare la registrazione: elabora le informazioni ricevute dai sensori e modifica in tempo reale le pose del manichino virtuale in maniera coerente con i movimenti dell'attore che indossa i sensori. Vengono acquisite tutte le grandezze cinematiche (posizioni, angoli, velocità ecc.) per ciascuno dei 23 segmenti in cui viene suddiviso il modello biomeccanico virtuale.

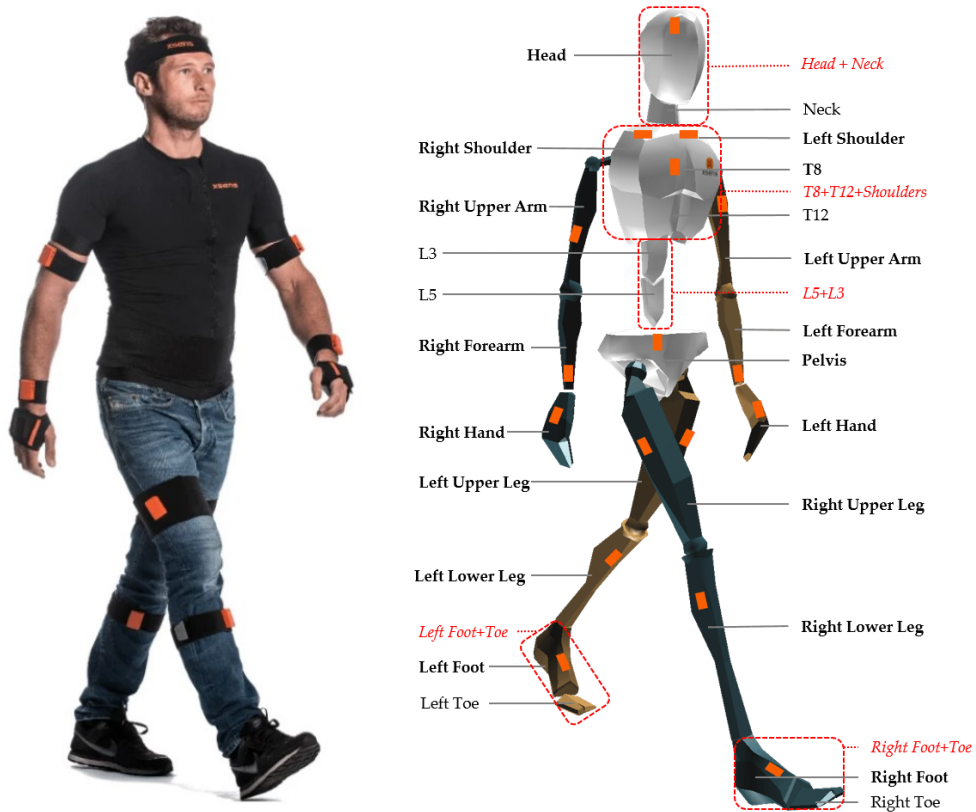


Figura 3.7 - Definizione dei 23 segmenti nel modello cinematico di Xsens MVN. Su ciascuno dei 17 segmenti indicati in grassetto è montata un'unità di misura inerziale [36]

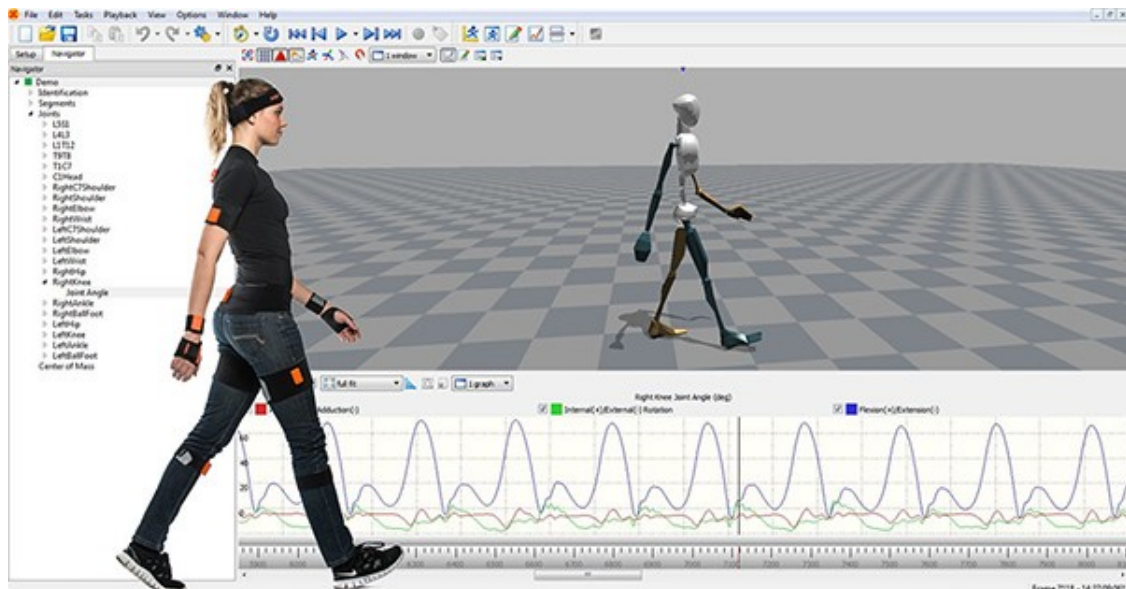


Figura 3.8 - Interfaccia del software di controllo Xsens MVN Analyze

Il sistema Xsens MVN Awindo è gestito attraverso il software Xsens MVN Analyze, progettato per la visualizzazione e la registrazione in tempo reale delle informazioni acquisite. Questo software non solo consente la riproduzione offline, l'analisi e la modifica di sessioni precedentemente registrate, ma offre anche un modello biomeccanico scalabile. Supporta fino a quattro configurazioni hardware e diverse routine di calibrazione.

Xsens MVN Analyze facilita la visualizzazione di animazioni 3D e grafici in tempo reale durante le sessioni di registrazione. Tra le sue funzionalità, si possono avere plug-in integrati per il time code e il telecomando, la gestione di velocità di dati fino a 158 Mb/min e l'esportazione in vari formati come ASCII (HTML), C3D, BVH, MVNX, BX, AVI e M4V.

Questo software permette di catturare dati in tempo reale, con la possibilità di registrare ed esportare le informazioni dettagliate riportate e descritte nella Tabella 3.1 seguente, offrendo così un'ampia flessibilità nelle analisi biomeccaniche e nella documentazione dei risultati ottenuti con il sistema Xsens MVN Awindo.

Tabella 3.1 - Output del software Xsens MVN Analyze

Funzione	Descrizione
${}^{GB}q_{seg}$	[1x4] Vettore del quaternione (q0, q1, q2, q3) che descrive l'orientamento del segmento rispetto al sistema di riferimento globale
${}^Gp_{seg}$	[1x3] Vettore posizione (x, y, z) dell'origine del segmento nel sistema di riferimento globale in [m]
${}^Gv_{seg}$	[1x3] Vettore velocità (x, y, z) dell'origine del segmento nel sistema di riferimento globale in [m/s]
${}^Ga_{seg}$	[1x3] Vettore accelerazione (x, y, z) dell'origine del segmento nel sistema di riferimento globale in [m/s ²]
${}^Gw_{seg}$	[1x3] Vettore velocità angolare (x, y, z) del segmento nel sistema di riferimento globale in [rad/s]
${}^Gaw_{seg}$	[1x3] Vettore accelerazione angolare (x, y, z) dell'origine del segmento nel sistema di riferimento globale in [rad/s ²]
${}^Gq_{sen}$	[1x3] Vettore di accelerazione (x, y, z) del sensore in [m/s ²]
${}^Sm_{sen}$	[1x3] Vettore del campo magnetico (x, y, z) del sensore in [au]
${}^{GS}q_{sen}$	[1x4] Quaternione orientamento (q0, q1, q2, q3) del sensore nel sistema di riferimento globale
\dot{j}_{jnt}	[1x3] Rappresentazione di Eulero del vettore dell'angolo articolare (x, y, z) in [gradi], calcolato usando la sequenza di Eulero ZXY usando il sistema di coordinate basato su ISB (International Society of Biomechanics)
\dot{j}_{jntx}	[1x3] Rappresentazione di Eulero del vettore dell'angolo articolare (x, y, z) in [gradi], calcolata usando la sequenza di Eulero XZY usando il sistema di coordinate basato su ISB. Nota: l'angolo articolare usando la sequenza di Eulero XZY viene calcolato ed esportato per tutte le articolazioni, ma comunemente usato solo per le articolazioni della spalla e può dipendere dal movimento della spalla se è opportuno utilizzarlo.
${}^Gc_{seg}$	[1x3] Posizione del centro di massa del corpo (x, y, z) nel sistema di riferimento globale [m]

Di seguito sono elencati gli angoli articolari che Xsens MVN Analyze fornisce in output, in diversi formati:

- *L5-S1* (Lombare 5 - Spinale 1), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *L4-L3* (Lombare 5 – Lombare 3), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *L1-T12* (Lombare 1 – Toracica 12), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *T9T8* (Toracica 9 - Toracica 8), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *T1C7* (Toracica 1 – Collo 7), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *C1 Head* (Collo), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *T4 Shoulder* (Toracica 4 - Spalla), angoli di flessione/estensione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna;
- *Shoulder* (Spalla), angoli di flessione/estensione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna;
- *Elbow* (Gomito), angoli di flessione/estensione, deviazione ulnare/radiale, pronazione/supinazione;
- *Wrist* (Polso), angoli di flessione/estensione, deviazione ulnare/radiale, pronazione/supinazione;
- *Hip* (Anca), angoli di flessione/estensione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna;

- *Knee* (Ginocchio), angoli di flessione/estensione, rotazione interna/esterna;
- *Ankle* (Caviglia), angoli di dorsiflessione/plantarflessione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna;
- *Ball foot* (Piede), angoli di flessione/estensione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna.

Inoltre, nelle ultime versioni del software sono stati aggiunti cinque angoli articolari ergonomici generalmente utilizzati nelle analisi ergonomiche:

- *T8_Head* (Torace– Collo), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *T8_UpperArm* (Torace - Braccio), angoli di flessione/estensione, abduzione/adduzione, rotazione interna/esterna;
- *Pelvis_T8* (Bacino – Torace), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *Vertical_Pelvis* (Verticale - Bacino), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra;
- *Vertical_T8* (Verticale - Torace), angoli di flessione/estensione, inclinazione laterale destra/sinistra, rotazione destra/sinistra.

Questi ultimi angoli sono individuati nella modalità raffigurata nelle Figure 3.1.

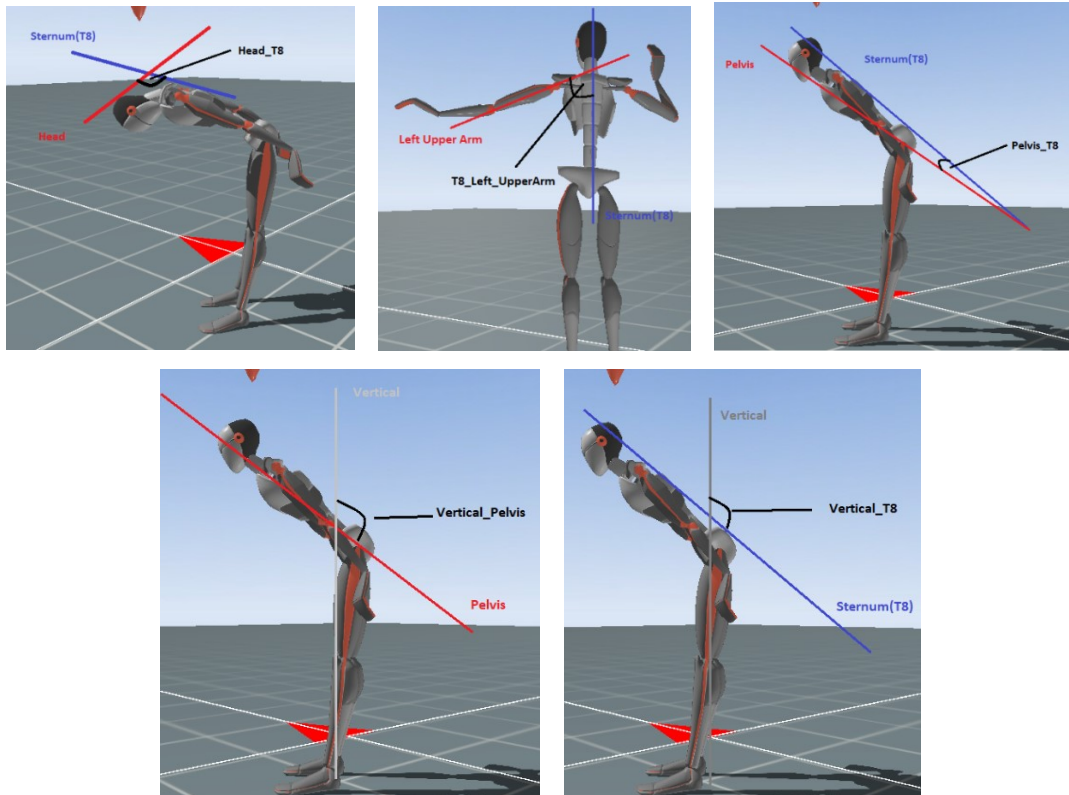


Figure 3.1 - Riferimenti e direttrici degli angoli articolari ergonomici misurati da Xsens MVN

3.1.3 Metodo e protocollo sperimentale

All'indagine hanno preso parte tre partecipanti (due uomini e una donna) al fine di massimizzare la diversità dei dati acquisiti e la variabilità nei casi analizzati. Per ciascun soggetto è stata misurata altezza e lunghezza del piede, informazioni successivamente inserite nei database dei software prima di procedere con le acquisizioni.

In previsione di un'analisi comparativa tra OptiTrack e Xsens MVN Awinda, è stata condotta una verifica preliminare della possibilità di impiegare simultaneamente entrambi i sistemi. Tale valutazione ha incluso l'analisi della compatibilità e dell'applicabilità contemporanea dei diversi componenti dei sistemi, come le cinghie in velcro Xsens, la tuta OptiTrack, i marcatori e i sensori, al fine di evitare interferenze reciproche tra le due tecnologie. Durante questa fase iniziale, i motion tracker di Xsens, privi di limitazioni nella visibilità e nella misurazione (ad eccezione della portata massima wireless), sono stati inizialmente posizionati sui soggetti. Successivamente, è stata indossata la tuta OptiTrack, sulla quale sono stati applicati i marcatori riflettenti, garantendo così un'adeguata esposizione al campo visivo delle telecamere.

Le acquisizioni sono state condotte in modalità *Full Body* al fine di avere una panoramica ergonomica completa sui sistemi. Sono stati adottati protocolli specifici per ciascun sistema:

- Per OptiTrack, la configurazione a 19 marcatori (secondo il protocollo di STT InSight *Full body analysis - 19p*);
- Per Xsens MVN Awinda, la configurazione completa a 17 sensori.

È importante sottolineare il piazzamento strategico dei marker e dei sensori, concepito per essere posizionati superiormente alle ossa anziché sui muscoli, al fine di minimizzare

la comparsa di artefatti nei tessuti molli [37]. Allo stesso modo risulta fondamentale per il sistema optoelettronico, l'allestimento dell'ambiente in cui si opera. È essenziale escludere dal campo visivo delle telecamere qualsiasi oggetto o superficie riflettente, ridurre al minimo le fonti luminose che potrebbero interferire con i sensori di immagine e gestire eventuali riflessi attraverso il software di elaborazione dati mediante la funzione *mask*, in fase di calibrazione del sistema. Parallelamente alle acquisizioni attraverso i sistemi MoCap, è stata inclusa nell'indagine l'analisi di video al fine di convalidare e verificare la precisione degli angoli e delle posture rilevate dalle tecnologie impiegate.



Figura 3.9 - Configurazione dei tre soggetti durante le acquisizioni

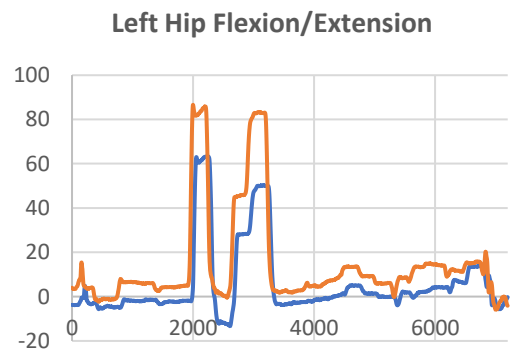
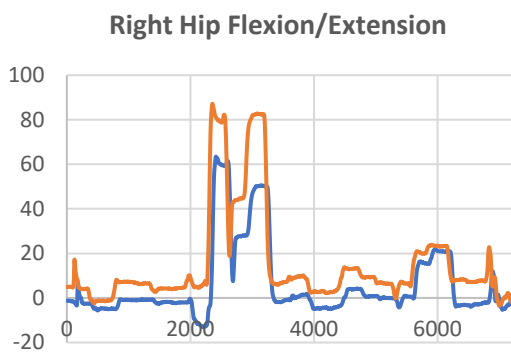
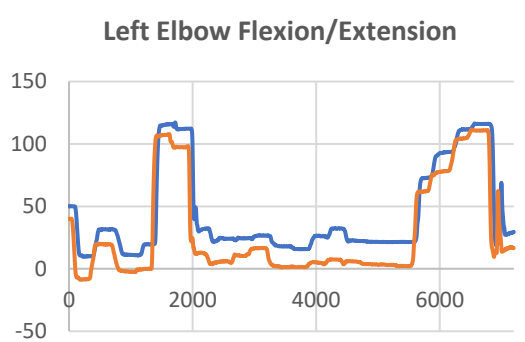
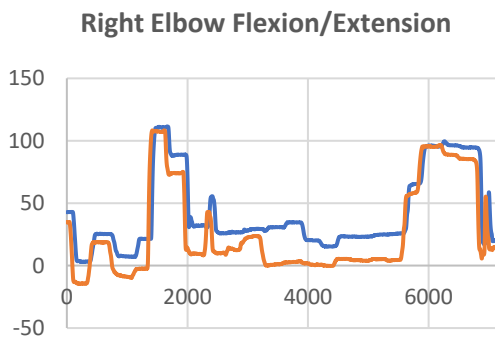
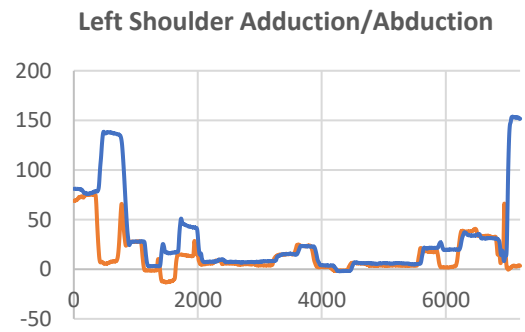
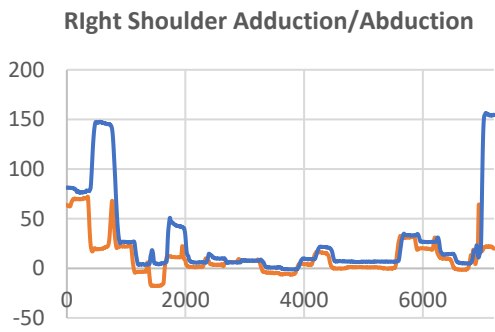
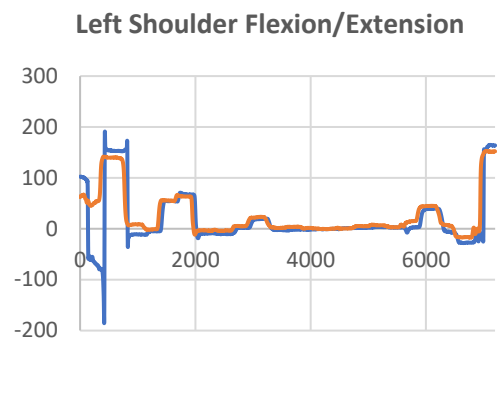
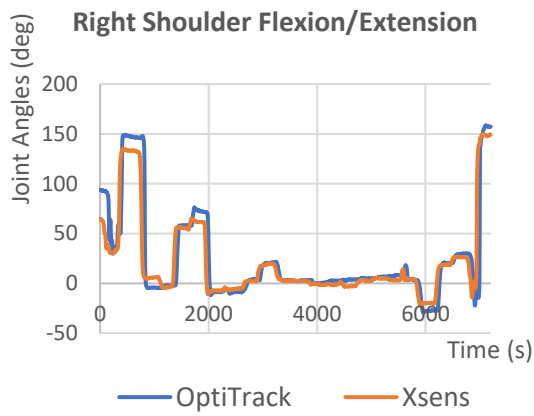
3.1.4 Raccolta dati ed analisi

Dopo aver eseguito la calibrazione individuale di ciascun sistema mediante i relativi software dedicati, abbiamo potuto avviare le acquisizioni in modo simultaneo. Questa sincronizzazione è resa possibile dal fatto che STT InSight attiva automaticamente la registrazione del movimento al rilevamento, da parte delle telecamere, della posizione del soggetto in una configurazione di riferimento nota come *T-pose*. Durante le acquisizioni, i soggetti hanno eseguito più ripetizioni di semplici movimenti funzionali, di breve durata, per ciascuna articolazione. Flessione/estensione, abduzione/adduzione e rotazioni sono state eseguite separatamente per testa, tronco, spalle, gomiti e ginocchia.

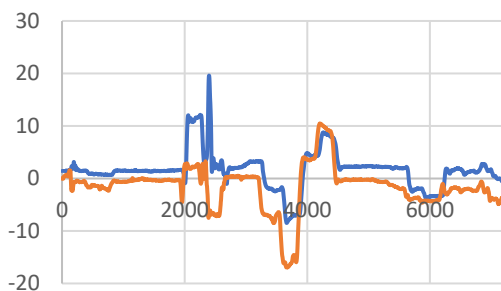
Al termine di ciascuna acquisizione sono stati esportati i valori degli angoli articolari rilevati, in formato .csv, successivamente sottoposti ad analisi e confronto sul foglio di calcolo di Microsoft Excel. Prima di valutare i dati estratti, è stato necessario un rifasamento dei valori: ciò è dovuto al fatto che si hanno due frequenze di campionamento differenti tra i sistemi OptiTrack e Xsens, che sono rispettivamente di 120 Hz e di 60 Hz.

3.1.5 Risultati e discussione

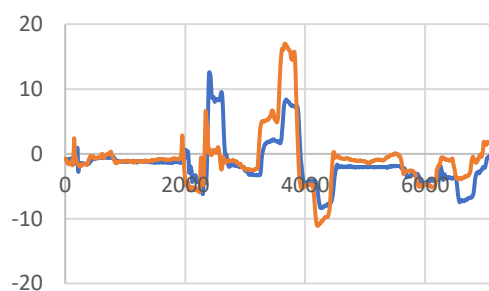
Gli angoli articolari misurati dal sistema ottico sono stati confrontati, mediante grafici, con quelli tracciati dagli IMMU del sistema inerziale, come è possibile visualizzare nella Figura 3.10. Non è stato possibile considerare tutte le acquisizioni, poiché in alcune di esse sono stati individuati errori nelle calibrazioni del sistema Xsens, confrontando, per determinati frame, gli angoli rilevati con i fermo immagine dei video registrati.



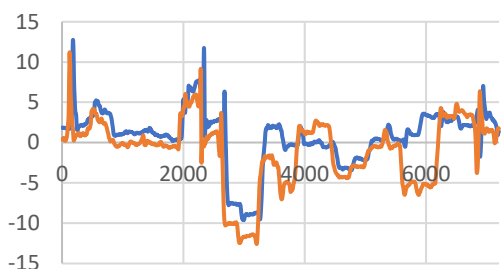
Right Hip Adduction/Abduction



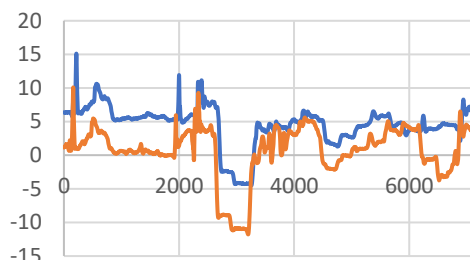
Left Hip Adduction/Abduction



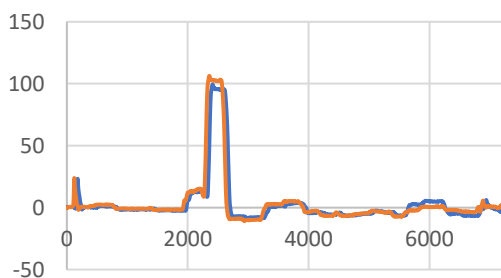
Right Ankle Dorsal/Plantar Flexion



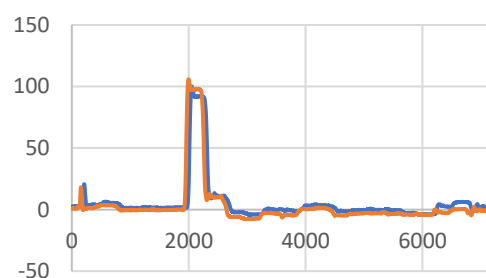
Left Ankle Dorsal/Plantar Flexion



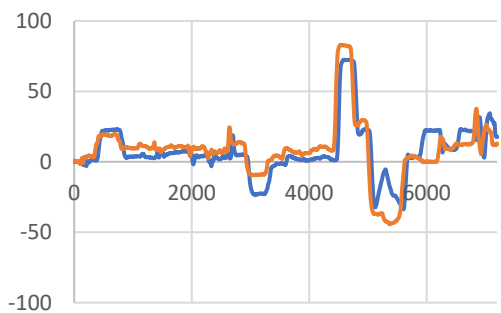
Right Knee Flexion/Extension



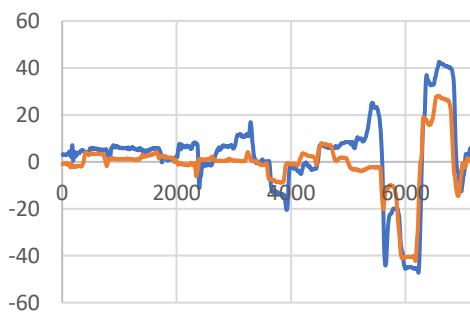
Left Knee Flexion/Extension



Neck Flexion/Extension



Neck Rotation



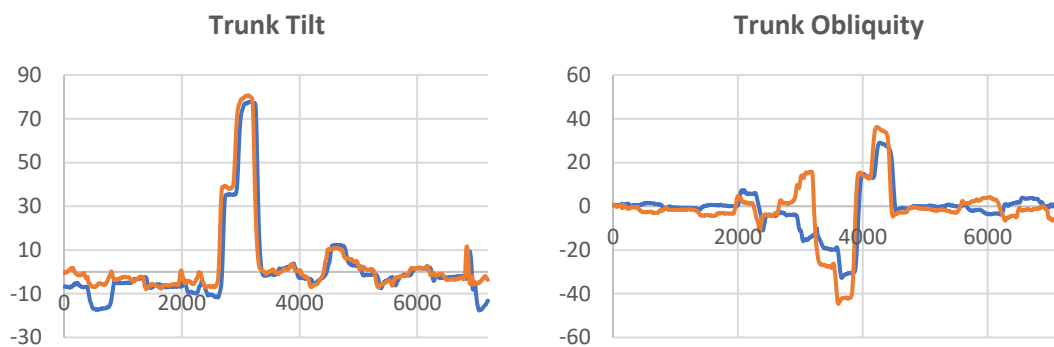


Figura 3.10 - Andamenti nel tempo degli angoli articolari

Nel contesto dello studio, è stato essenziale apportare un adattamento agli andamenti dei valori degli angoli articolari rilevati dai sistemi OptiTrack e Xsens. Tale adattamento è stato necessario in quanto i valori angolari registrati dai due sistemi presentano modalità di rilevamento differenti. In particolare, dalle prime acquisizioni era stata individuata una notevole differenza per l'angolo di abduzione/adduzione della spalla, poiché gli andamenti in grafico erano completamente differenti: in tal caso sono state eseguite brevi acquisizioni dedicate solamente a movimenti della spalla per poi visualizzare sui software, in tempo reale, come venissero determinati tali valori. Seguendo questa modalità, sono stati verificati i restanti angoli, adattando di conseguenza i grafici nei casi in cui i riferimenti per l'acquisizione degli angoli sono differenti tra i due sistemi.

Come è possibile osservare dal grafico di ciascun angolo articolare rilevato, i dati prelevati da STT InSight seguono molto bene gli andamenti estratti da Xsens MVN seppur con differenze di valore marcate in casi come flessione dorso-plantare della caviglia, flessione/estensione e abduzione/adduzione dell'anca ecc.

Per determinati angoli si riscontrano valori quasi analoghi:

- Per *Right/Left Shoulder Flexion/Extension* (Flessione/Estensione Spalla Destra/Sinistra), si hanno andamenti OptiTrack – Xsens molto simili, determinando una media delle differenze tra i valori pari a 2.475 e 8.868, rispettivamente per la spalla destra e per la spalla sinistra;
- Per *Right/Left Knee Flexion/Extension* (Flessione/Estensione Ginocchio Destro/Sinistro), si hanno andamenti OptiTrack – Xsens sovrapponibili, avendo una media delle differenze tra tutti i valori pari a 0.371 e 2.339, rispettivamente per il ginocchio destro e per il ginocchio sinistro;
- Per *Neck Flexion/Extension* (Flessione/Estensione Collo), andamenti analoghi OptiTrack – Xsens, con media di differenze tra i valori di 1.142;
- Per *Trunk Tilt* (Flessione/Estensione della schiena), l'andamento di OptiTrack segue molto bene quello di Xsens, con una media di differenze tra i valori di 2.319.

La presente analisi conferma l'elevata precisione ed accuratezza dei sistemi visivi, come nel caso attuale OptiTrack, anche in contesti ergonomici. Tuttavia, è importante sottolineare che tali punti di forza sono strettamente correlati alla corretta calibrazione e disposizione dei marker. La precisione di rilevamento è dovuta alla capacità di catturare dati attraverso l'utilizzo di telecamere ad alta risoluzione e marker passivi posizionati strategicamente sul corpo, fornendo punti di riferimento chiari e precisi per il sistema di tracciamento ottico. La tecnologia ottica permette anche una misurazione diretta e istantanea della posizione dei marker nel campo visivo delle telecamere. Questo elimina problemi associati alla propagazione degli errori nei sistemi inerziali, in cui i dati sono ottenuti attraverso l'integrazione dei segnali provenienti dai sensori inerziali. L'assenza di derivazioni e la misurazione diretta contribuiscono a una maggiore precisione nel

tracciamento del movimento. Ma proprio l'accurato posizionamento dei marker, considerato il numero limitato di punti di riferimento forniti da una singola tuta, rappresenta una sfida significativa. Difatti, è stato evidente che le acquisizioni per diversi soggetti indossando una sola ed unica tuta ha di per sé generato differenze nel posizionare i marker in corrispondenza delle articolazioni, non avendo precisi riferimenti come per il sistema Xsens. L'instabilità o la dislocazione dei marker può influire notevolmente sulla precisione del risultato ottenuto, rendendo indispensabile una cura meticolosa durante la fase di preparazione. Inoltre, l'utilizzo ottimale dei sistemi ottici richiede un ambiente controllato, privo di riflessi e interferenze, al fine di garantire la massima precisione nella rilevazione dei marker. Questa delicatezza e sofisticatezza operativa conferiscono ai sistemi ottici una specificità che li rende particolarmente adatti a contesti sperimentali ben strutturati, ma potenzialmente limita la loro applicazione in ambienti industriali lavorativi, dove le condizioni operative possono essere più sfidanti. Su queste basi sono state effettuate delle valutazioni sui due sistemi, prendendo in considerazione altri aspetti come, ad esempio, l'economicità dei sensori rispetto alle telecamere, oltre a non avere limiti nel campo di misura e, soprattutto, possono essere utilizzati in qualsiasi ambiente a differenza dei sistemi optoelettronici, vincolati ad attività di laboratorio con apparecchiature fisse. In Tabella 3.2 confronta, per l'appunto, i due sistemi di monitoraggio del movimento evidenziandone vantaggi e svantaggi di ognuno.

Tabella 3.2 - Confronto caratteristiche dei due sistemi

SISTEMI OTTICI	SISTEMI INERZIALI
Campo di misura limitato	Campo di misura illimitato
Necessita di un ambiente di laboratorio	Utilizzabile in qualsiasi ambiente
Ingombro eccessivo	Ingombro minimo
Problemi di calibrazione	Problemi di calibrazione
Estremamente accurato	Buona accuratezza
Ottima risoluzione	Buona risoluzione

L'impiego di questi due sistemi nella presente analisi ha messo in risalto che, in contesti di valutazione ergonomica, i sistemi inerziali emergono come soluzione preferibile rispetto ai sistemi ottici. Questa preferenza è supportata da vantaggi chiave che influiscono positivamente sulla qualità e sull'affidabilità delle misurazioni. La maggiore versatilità e praticabilità dei sistemi inerziali si traducono in una maggiore adattabilità alle diverse condizioni operative e ambientali, offrendo una flessibilità ineguagliabile. Inoltre, la minore sensibilità a condizioni di illuminazione ambientale migliora ulteriormente la coerenza e l'affidabilità delle acquisizioni, eliminando potenziali fonti di errore. L'insieme di questi fattori non solo consente risultati più affidabili e consistenti, ma offre anche un vantaggio cruciale in termini di ripetibilità delle misurazioni, fondamentale per il monitoraggio nel tempo e il confronto tra diverse sessioni di analisi.

In conclusione, pur vantando una maggiore precisione, l'impiego di sistemi ottici richiede una gestione peculiare e attenzione costante alle variabili coinvolte per garantire risultati affidabili e coerenti. Al contrario, l'adozione dei sistemi inerziali nelle valutazioni ergonomiche non solo si traduce in una migliore praticità operativa, ma rappresenta anche una scelta valida dal punto di vista della qualità e dell'affidabilità delle misurazioni. Queste conclusioni rafforzano la potenza degli strumenti Motion Capture di tipo inerziale nello studio delle posture dei lavoratori e, quindi, nella prevenzione di possibili disturbi muscoloscheletrici, in ambito industriale.

4 Metodi e strumenti per il calcolo dell'indice di rischio ergonomico

Nel secondo capitolo della presente trattazione sono stati introdotti i vari metodi di osservazione per la valutazione dei carichi muscoloscheletrici, necessari per l'implementazione dei programmi di intervento per ridurre l'esposizione ai fattori di rischio correlati ai disturbi muscoloscheletrici. Questi metodi si basano principalmente sulla determinazione di un indice che rappresenta il rischio o lo sforzo a cui sono sottoposte le varie parti del corpo trattate. Nello specifico i professionisti dell'ergonomia, datori di lavoro, autorità sanitarie e di sicurezza hanno a disposizione:

- Indici per la valutazione rapida della postura:
 - *OWAS*, suddivide i disordini legati al lavoro in quattro porzioni del corpo, verificando la frequenza e il tempo necessario per ogni postura;
 - *RULA*, valuta velocemente la postura della parte superiore del corpo;
 - *REBA*, valuta in modo veloce l'intero corpo considerando anche i cambiamenti veloci di postura.
- Indici per la valutazione di movimenti ripetitivi:
 - *OCRA*, checklist semplificata che permette di ricavare un indice sintetico che definisce un livello di rischio;
 - *Strain Index*, valuta i movimenti ripetitivi della parte superiore del corpo.
- Indici per la valutazione dei sollevamenti e spostamenti di carichi manuali:
 - *NIOSH*, equazione di sollevamento che definisce il RWL (limite di peso raccomandato);
 - *Snook e Ciriello*, tabelle di valutazione dei massimi limiti accettabili per i pesi e forze nelle attività di movimentazione manuale in piano.

Ci apprestiamo a esaminare nei paragrafi a seguire gli studi condotti per l'implementazione di algoritmi specifici mirati ad automatizzare il calcolo degli indici OCRA e REBA. L'obiettivo principale di tali ricerche è facilitare la compilazione automatica di questi metodi, contribuendo così a migliorare l'efficienza e la precisione delle valutazioni ergonomiche, oltre a rendere l'applicazione di tali tecniche più veloce e ripetibile. Fondamentale per la creazione di tali algoritmi è l'utilizzo di dati provenienti da sistemi di acquisizione di motion-capture (MoCap), a prescindere dalla tipologia o dalla natura.

4.1 Rapid Entire Body Assessment (REBA)

Nell'ambito delle analisi ergonomiche, il Rapid Entire Body Assessment (REBA) emerge come uno strumento di fondamentale importanza, specialmente nel contesto delle posture lavorative imprevedibili tipiche del settore sanitario e di altri settori dei servizi. Progettato con una sensibilità mirata a cogliere le sfide posturali peculiari di professioni ad alta complessità, come l'assistenza sanitaria, il REBA costituisce un pilastro metodologico avanzato per valutare le implicazioni ergonomiche nelle attività quotidiane dei lavoratori. L'applicazione del metodo comincia con l'osservazione dell'attività del lavoratore durante vari cicli di lavoro. A partire da questa fase di osservazione si devono selezionare le attività e le posture più significative, sia per la durata, sia perché presentano a priori un maggiore carico posturale. Queste saranno le posture che si valuteranno.

Il sistema di classificazione della postura adottato dal REBA, basato sui principi dei diagrammi delle parti del corpo della Rapid Upper Limb Assessment (RULA), offre un approccio dettagliato e completo. Esso abbraccia la valutazione di diverse regioni anatomiche, quali la parte superiore delle braccia, gli avambracci, il polso, il tronco, il collo e le gambe. Fondamentale è il suo focus sull'analisi di carichi e forze esterne, l'attività muscolare derivante da posture statiche, dinamiche, instabili o in rapido cambiamento e l'effetto di accoppiamento.

A differenza di metodologie precedenti, come l'Ovako Working Posture Analysis System (OWAS) e il RULA, il REBA introduce un raffinato sistema di valutazione mediante cinque distinti livelli di azione correttiva (Hignett e McAtamney, 2000, [15]). Questi livelli, da 0 a 4, delineano chiaramente la necessità e l'urgenza delle azioni correttive, fornendo un quadro gerarchico per l'intervento ergonomico. Come mostra la Figura 4.1, il livello di azione 0 indica una situazione in cui l'azione correttiva è inclusa e ulteriori

valutazioni non sono richieste, mentre il livello di azione 4 evidenzia l'urgenza di un'azione correttiva immediata, richiedente ulteriori valutazioni dettagliate [38].

Action level	REBA score	Risk level	Action (including further assessment)
0	1	Negligible	None necessary
1	2-3	Low	May be necessary
2	4-7	Medium	Necessary
3	8-10	High	Necessary soon
④	11-15	Very high	Necessary NOW

Figura 4.1 - Livelli di azione REBA [15]

Il *REBA Score* costituisce la metrica cruciale per quantificare e valutare il livello di rischio ergonomico associato a una determinata attività lavorativa. Questo punteggio complessivo è il risultato della combinazione di valutazioni dettagliate relative alle diverse parti del corpo, suddivise nei gruppi A e B. Anche qui si notano analogie con il metodo RULA, dividendo il corpo in due parti: il gruppo A, che comprende collo, tronco e gambe; il gruppo B, comprende invece gli arti superiori (braccia, avambracci e polsi). Utilizzando le apposite tabelle si assegna un punteggio a ogni zona del corpo e in seguito si assegna un punteggio globale a ciascuna delle due parti A e B; i punteggi vengono assegnati in base all'angolo formato dalla parte del corpo interessata con l'asse di riferimento. Inoltre, il gruppo A prevede una scissione nella valutazione degli arti superiori, poiché viene richiesto di applicare il metodo separatamente per la parte destra e per la parte sinistra. Per cui si avranno due punteggi che saranno poi uniti per trovare il punteggio relativo al gruppo A. Il valutatore può selezionare a priori il lato che apparentemente sarà soggetto a maggior carico posturale, ma nel caso di dubbio è preferibile analizzare entrambi i lati.

Gruppo A:

- Tronco (Figura 4.2), si assegna punteggio 1 se la schiena è in posizione eretta e bilanciata, punteggio 2 se si ha un angolo di flessione/estensione compreso tra 0° e 20° , punteggio 3 se la flessione è compresa tra 20° e 60° o se l'estensione è superiore a 20° , punteggio 4 se la flessione supera il valore di 60° . Inoltre, si ha +1, a prescindere dal punteggio assegnato, se si ha una torsione o flessione laterale;

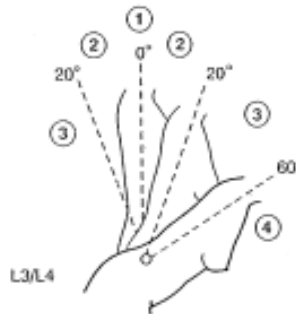


Figura 4.2 – Punteggi tronco in REBA [15]

- Collo (Figura 4.3), si assegna punteggio 1 se il collo ha un angolo di flessione compreso tra 0° e 20° , punteggio 2 se in flessione/estensione con un angolo superiore a 20° . Inoltre, si ha +1, a prescindere dal punteggio assegnato, se si ha una torsione o flessione laterale;



Figura 4.3 – Punteggi collo in REBA

- Gambe (Figura 4.4), si assegna punteggio 1 se il peso è ben distribuito su entrambe le gambe, se si sta camminando o se si è seduti, punteggio 2 se il peso è distribuito in modo incongruo su una gamba o se si ha una postura instabile. Inoltre, a prescindere dal punteggio assegnato, si ha +1 se si ha un angolo di flessione del ginocchio/delle ginocchia compreso tra 30° e 60° o +2 se tale angolo supera 60° (ad esclusione della posizione seduta).

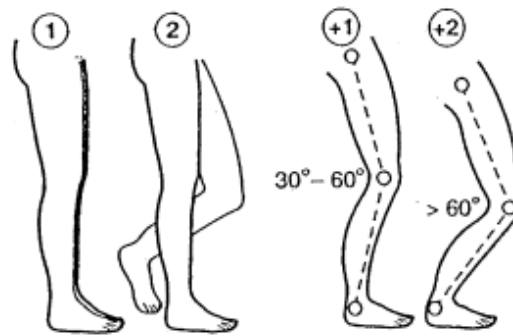


Figura 4.4 – Punteggi gambe in REBA

Gruppo B:

- Braccio (Figura 4.5), si assegna punteggio 1 se l'angolo di flessione/estensione non è maggiore di 20° , punteggio 2 se la flessione è tra 20° e 45° mentre l'estensione è maggiore di 20° , punteggio 3 se la flessione è tra 45° e 90° , punteggio 4 se la flessione è maggiore di 90° . Inoltre, si ha +1, a prescindere dal punteggio assegnato, se il braccio è in abduzione o ruotato o se la spalla è sollevata, mentre si ha -1 se il braccio è pendente, se sostenuto o se la postura è sostenuta dalla gravità;

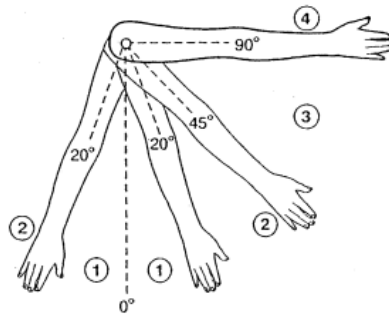


Figura 4.5 - Punteggi braccio in REBA

- Avambraccio (Figura 4.6), si assegna punteggio 1 se l'angolo di flessione è compreso tra 60° e 100°, punteggio 2 se la flessione è inferiore a 60° o maggiore a 100°;

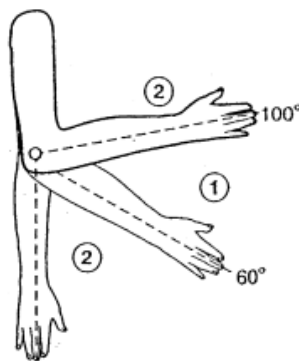


Figura 4.6 - Punteggi avambraccio in REBA

- Polso (Figura 4.7), si assegna punteggio 1 se l'angolo di flessione /estensione è compreso tra 0° e 15°, punteggio 2 se flessione/estensione è maggiore di 15°. Inoltre, si ha +1, a prescindere dal punteggio assegnato, se si ha una deviazione o torsione del polso.

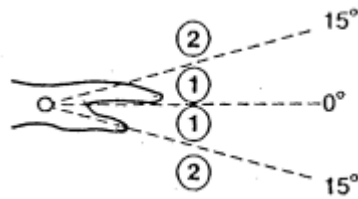


Figura 4.7 - Punteggi polso in REBA

Una volta noti i valori di rischio associati ad ogni posizione, è possibile assegnare un punteggio complessivo al gruppo A (Tabella 4.1) e due punteggi (per la parte destra e sinistra) al gruppo B (Tabella 4.2). Verranno definiti *Score A* e *Score B*.

Tabella 4.1 - Punteggio complessivo gruppo A in REBA

Table A	Neck												
		1				2				3			
	Legs												
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Trunk Posture Score	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tabella 4.2 - Punteggio complessivo gruppo B in REBA

Table B	Lower Arm						
		1			2		
	Wrist	1	2	3	1	2	3
Upper Arm Score	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

I punteggi ottenuti in questo modo devono poi essere modificati in questo modo:

- Aggiungi punteggio forza/carico allo *Score A*, assegnando punteggio 0 quando il carico (o la forza) è < 5 kg, punteggio 1 quando il carico (o la forza) è compreso tra 5 e 10 kg, punteggio 2 quando il carico (o la forza) è superiore a 10 kg;
- Aggiungi punteggio accoppiamento allo *Score B*, assegnando punteggio 0 se la presa è buona e la forza di presa è di fascia media, punteggio 1 se la presa è accettabile ma non ideale oppure la presa è accettabile utilizzando altre parti del corpo, punteggio 2 se la presa è possibile ma non accettabile, punteggio 3 se la presa è goffa e insicura, la presa manuale non è possibile o la presa non è accettabile utilizzando altre parti del corpo.

Inserendo poi entrambi i punteggi in un'unica tabella (Tabella 4.3) si determina lo *Score C*, uno per la parte sinistra e uno per la parte destra del corpo. Da questo punteggio, se viene infine aggiunto il punteggio di attività, si ottengono i REBA Score. Maggiore sarà questo punteggio finale, maggiore sarà il livello di rischio.

Tabella 4.3 - Punteggio finale (*Score C*) dato da *Score A* e *Score B* in REBA

Score A	Table C											
	Score B											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Rapid Entire Body Assessment

Evaluator: _____ Date: _____ Company: _____
 Date: _____ Site: _____ Workstation / Task: _____
 Date: _____ Site: _____ Worker: _____

A. Neck, Trunk and Leg Analysis

Step 1. Locate Neck Position:
 +1 0° -20° +2 0° Add +1

Step 2a: Adjust...
 If neck is twisted or is side bending: +1

Neck Score

Step 2. Locate Trunk Position:
 +1 +2 +3 +4 Add +1

Step 2a: Adjust...
 If trunk is twisted or is side bending: +1

Trunk Score

Step 3. Legs:
 Adjust: 30,60° +1 +2 Add +1 Add +2

Step 3a: Adjust...
 If knee(s) between 30° and 60°: +1
 If knee(s) are >60° flexion (sh. Not for sitting): +2

Leg Score

Step 4. Look-up Posture Score in Table A:
 Using values from steps 1-4 above, locate scores in Table A.

Posture Score A

Step 5. Add Force/Load Score
 If load < 5 kg: -1
 If load 5 to 10 kg: -1
 If load > 10 kg: +2
 Adjust: If shock or rapid build up of force, add +1

Force/Load Score

Step 6. Score A. Find Row in Table C:
 Add values from steps 4 & 5 to obtain Score A.
 Find row in Table C.

Score A

Scoring
 1 = Negligible Risk
 2-3 = Low Risk. Change may be needed
 4-7 = Medium Risk. Further Investigation. Change Soon
 8-10 = High Risk. Investigate and Implement Change
 11+ = Very High Risk. Implement Change

Table A

	Neck												
	1				2				3				
Legs	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Trunk Posture Score	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8
Force/Load Score	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
Score A	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	10

Table B

	Lower Arm						
	1			2			
Wrist	1	2	3	1	2	3	
Upper Arm Score	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	2	3	4	3	4	5
	4	4	5	5	6	7	
	5	6	7	8	7	8	
	6	7	8	9	8	9	

Table C

Score A	Score B											
	1			2			3			4		
1	1	1	1	1	2	3	3	3	10	11	12	
2	1	1	1	2	3	3	4	4	5	6	7	
3	2	3	3	4	4	5	6	6	7	7	8	
4	3	4	4	4	4	5	6	7	8	8	9	
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	10	
6	5	6	6	7	8	9	9	9	10	10	10	
7	6	7	7	8	9	9	10	10	10	11	11	
8	7	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	
9	8	9	9	10	10	10	11	11	11	11	11	
10	9	10	10	11	11	11	11	11	11	12	12	
11	10	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12	
12	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	

Table D

	Left						Right					
	able C			Score			able C			Score		
Activity Score												
Left REBA Score												
Right REBA Score												

B. Arm and Wrist Analysis

Step 7. Locate Upper Arm Position:
 +1 +2 +3 +4 Add +1 Add +1

Step 7a: Adjust...
 If shoulder is raised: -1
 If upper arm is abducted: +1
 If arm is supported or passes in floating: -1

Upper Arm Score

Step 8. Locate Lower Arm Position:
 +1 +2 +3 +4 Add +1

Step 8a: Adjust...
 If wrist is bent from midline or twisted: Add +1

Lower Arm Score

Step 9. Locate Wrist Position:
 +1 +2 +3 +4 Add +1

Step 9a: Adjust...
 If wrist is bent from midline or twisted: Add +1

Wrist Score

Step 10. Look-up Posture Score in Table B:
 Using values from steps 7-9 above, locate scores in Table B.

Posture Score B

Step 11. Add Coupling Score
 Vchitting handle and mid-range power grip: **Good: +0**
 Hand held acceptably, but not ideal, or coupling acceptable
 no number part of the body: **Fair: +1**
 Hand held not acceptably, but possible, **Poor: +2**
 Awkward, unsafe grip, no handles. Coupling unacceptable
 with any body part. **Unacceptable: +3**

Coupling

Step 12. Score B. Find Column in Table C:
 Add values from steps 10 & 11 to obtain Score B.
 Find column in Table C and match with Score A
 in row from step 6 to obtain Table C Score.

Score B

Step 13. Activity Score
 Add 1:
 For more body parts are held for longer than 1 minute (static)
 Repeated small range motions (more than 4x per minute)
 Action causes rapid large range changes in posture or notable bias

Activity Score

Figura 4.8 - Template completo del metodo REBA realizzato in Excel.

Al fine di ottimizzare il processo di valutazione ergonomica mediante il metodo REBA, è stato sviluppato un template personalizzato utilizzando il software Microsoft Excel, visibile in Figura 4.8. Questo template consente l'automatizzazione del calcolo dei punteggi, semplificando significativamente la compilazione manuale dei dati. Il template è progettato per gestire automaticamente i punteggi degli step, richiedendo solo l'inserimento dei dati pertinenti da parte dell'utente. In questo modo, si riduce il rischio di errori umani nella valutazione e si accelera il processo complessivo. Nel paragrafo che segue saranno spiegati nel dettaglio i passaggi che sono stati necessari per automatizzare i calcoli richiesti dal metodo REBA al fine di ottenere i vari punteggi d'interesse.

4.1.1 Automattizzazione calcolo indice REBA

Il metodo REBA può essere basato sull'osservazione diretta da parte di un esperto, o su dati oggettivi misurati da dispositivi MoCap. Nel secondo caso, il metodo è stato automatizzato attraverso specifici algoritmi che permettono di elaborare i dati raccolti dai sensori, calcolare i punteggi dei vari step e ottenere il punteggio finale come combinazione di essi.

Come dati di input si prendono i file di output del dispositivo Xsens MVN, sistema per il motion capture, che registra tutti i movimenti dell'uomo e permette di esportare angoli articolari. In particolare, per la compilazione del REBA sono necessari due fogli excel:

- Il foglio excel in cui sono riportati tutti gli angoli articolari registrati dai sensori (“Joint Angle ZXY”);
- Il foglio excel in cui sono riportati gli angoli articolari ergonomici (“Ergonomic Joint Angles ZXY”).

Tipicamente, mediante l'utilizzo del sistema Xsens MVN, si effettua la registrazione del movimento e della postura adottata da un lavoratore durante l'intero ciclo di attività presso la sua postazione di lavoro. L'algoritmo incorporato elabora questi dati, calcolando automaticamente, per ciascun frame dell'acquisizione, punteggi parziali e un punteggio complessivo. Ciò permette di suddividere la durata totale delle attività compiute dal lavoratore, in fasce temporali (%) di rischio. Questo è un grande beneficio che si traduce in una notevole semplificazione nel processo di valutazione del rischio ergonomico, rispetto alle tradizionali compilazioni manuali, garantendo una maggiore efficienza e precisione nell'identificazione delle potenziali problematiche legate alla postura e al movimento durante l'esecuzione delle mansioni lavorative.

Nello specifico, l'automatizzazione si rivolge al calcolo dei vari *Step Score*, per il gruppo A e per il gruppo B. Poi tali valori vengono automaticamente ricercati nelle varie tabelle tipiche del metodo per poi ottenere i punteggi complessivi. L'algoritmo si sviluppa nella seguente modalità:

Step 1. LOCATE NECK POSITION

➤ FLESSIONE DEL COLLO

Prendere il valore dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione del collo (*T8_Head Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore 1: $(-5^\circ) \leq x \leq 20^\circ$
- Moltiplicatore 2: $x > 20^\circ \vee x < (-5^\circ)$

Nel contesto del metodo, la scelta di utilizzare il valore (-5°) come soglia anziché 0° nella formula di calcolo automatico richiede una considerazione significativa. Questa decisione è stata motivata dai dati accurati ottenuti da Xsens MVN, i quali rivelano che in posizione di riposo alcuni soggetti non mantengono un collo perfettamente dritto, ma mostrano spesso un angolo di flessione o estensione, generalmente pari a $\pm 5^\circ$. Dopo attenti test, è stato determinato che l'introduzione di un margine di 5° alla soglia è fondamentale per riflettere in modo più accurato la varietà di posizioni anatomiche naturali. Pertanto, se l'angolo si colloca tra (-5°) e 20° , viene assegnato il punteggio +1; altrimenti, se l'estensione scende sotto i (-5°) , il punteggio diventa +2.

Questa scelta mira a considerare la diversità biomeccanica individuale, garantendo al contempo una valutazione più precisa e aderente alle reali dinamiche di movimento del collo.

➤ **ROTAZIONE DEL COLLO e FLESSIONE LATERALE DEL COLLO**

Prendere valore assoluto dell'ergonomic joint angle relativo alla rotazione del collo (*T8_Head Axial Bending* che indichiamo con “x”) e dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione laterale del collo (*T8_Head Lateral Bending* che indichiamo con “y”)

Assegnare il punteggio in base al valore degli angoli:

- Moltiplicatore +1: $x \geq 10^\circ \vee y \geq 10^\circ$

In tal caso, il metodo REBA non definisce esplicitamente i valori specifici per la rotazione del collo e la flessione laterale che agiscono come soglie per l'attivazione del moltiplicatore. Pertanto, basandosi su informazioni tratte dalla letteratura e test empirici, è stato determinato il valore di 10° per l'attivazione di entrambi i moltiplicatori.

Calcolare NECK SCORE come somma dei punteggi assegnati negli step precedenti (a, b):

$$NECK\ SCORE = score_step1a + score_step1b$$

Step 2. LOCATE TRUNK POSITION

➤ FLESSIONE DELLA SCHIENA

Prendere il valore dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione della schiena (*Vertical_T8 Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore 1: $(-5^\circ) \leq x \leq 5^\circ$
- Moltiplicatore 2: $5^\circ < x \leq 20^\circ \vee (-20^\circ) \leq x < (-5^\circ)$
- Moltiplicatore 3: $20^\circ < x \leq 60^\circ \vee x < (-20^\circ)$
- Moltiplicatore 4: $x > 60^\circ$

Anche in questo caso, l'utilizzo della soglia (-5°) anziché 0° non segue il metodo REBA ma riprende le considerazioni formulate nello *Step 1. Locate Neck Position – Flessione del collo*.

➤ ROTAZIONE DELLA SCHIENA e FLESSIONE LATERALE DELLA SCHIENA

Prendere il valore dell'ergonomic joint angle relativo alla rotazione della schiena (*Vertical_T8 Axial Bending* che indichiamo con “x”) e dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione laterale della schiena (*Vertical_T8 Lateral Bending* che indichiamo con “y”).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore +1: $x \geq 10^\circ \vee y \geq 10^\circ$

In tal caso, il metodo REBA non definisce esplicitamente i valori specifici per la rotazione della schiena e la flessione laterale che agiscono come soglie per l'attivazione del moltiplicatore. Pertanto, basandosi su informazioni tratte dalla

letteratura e test empirici, è stato determinato il valore di 10° per l'attivazione di entrambi i moltiplicatori.

Calcolare TRUNK SCORE come somma dei punteggi assegnati negli step precedenti (a, b).

$$TRUNK\ SCORE = score_step2a + score_step2b$$

Step 3. LEGS

➤ POSIZIONE

Il moltiplicatore viene assegnato nel seguente modo:

- Moltiplicatore +1: se si sta seduti, se si cammina o in piedi con il peso corporeo distribuito uniformemente su entrambi i piedi (appoggio simmetrico bilaterale)
- Moltiplicatore +2: viene assegnato manualmente quando si è in piedi con il peso corporeo non distribuito uniformemente su entrambi i piedi (appoggio unilaterale), appoggio leggero o postura instabile

➤ FLESSIONE DELLE GINOCCHIA

Prendere il valore del joint angle relativo alla flessione delle ginocchia (*Right Knee Flexion/Extension* e *Left Knee Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore degli angoli:

- Moltiplicatore 1: flessione di una o entrambe le ginocchia tra 30° e 60° (eccetto quando si verifica la posizione seduta)
- Moltiplicatore 2: flessione di una o entrambe le ginocchia superiore a 60° (eccetto quando si verifica la posizione seduta)

Calcolare LEGS SCORE come somma dei punteggi assegnati negli step precedenti (a, b).

$$LEGS\ SCORE = score_step3a + score_step3b$$

Step 4. LOOK-UP POSTURE SCORE IN TABLE A

Attraverso i valori degli step 1, 2, 3, è possibile determinare il POSTURE SCORE A nella tabella A (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Anche questo calcolo è stato automatizzato.

Table A	Neck												
		1				2				3			
	Legs												
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Trunk Posture Score	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Step 5. ADD FORCE/LOAD SCORE

Il punteggio relativo all'uso di forza e/o al mantenimento di carichi viene inserito manualmente.

Il moltiplicatore viene assegnato nel seguente modo:

- Moltiplicatore +0: quando il carico (o la forza) è < 5 kg
- Moltiplicatore +1: quando il carico (o la forza) è compreso tra 5 e 10 kg
- Moltiplicatore +2: quando il carico (o la forza) è superiore a 10 kg.

Al moltiplicatore assegnato si aggiunge +1 se c'è uno shock o un rapido accumulo di forza durante l'attività.

Step 6. FIND ROW IN TABLE C

Sommare i valori degli step 4, 5, per ottenere SCORE A:

$$SCORE A = score_step4 + score_step5$$

Step 7. LOCATE UPPER ARM POSITION

➤ FLESSIONE DEL BRACCIO

Prendere il valore dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione del braccio (*T8_UpperArm Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore +1: $(-20^\circ) \leq x \leq 20^\circ$
- Moltiplicatore +2: $x < (-20^\circ) \vee 20^\circ < x \leq 45^\circ$
- Moltiplicatore +3: $45^\circ < x \leq 90^\circ$:
- Moltiplicatore +4: $x > 90^\circ$

➤ SOLLEVAMENTO DELLE SPALLE

Prendere il valore del joint angle relativo all'abduzione della spalla (*T4 Shoulder Abduction/Adduction*)

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore +1: $x \geq 10^\circ$

➤ ABDUZIONE DEL BRACCIO

Prendere il valore del joint angle relativo all'abduzione del braccio (*T8_UpperArm Lateral Bending*)

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo:

- Moltiplicatore +1: $x \geq 30^\circ$

Sia per il moltiplicatore relativo al *Sollevamento delle spalle* che per quello dell'*Abduzione del braccio*, il metodo REBA non definisce esplicitamente i valori specifici per questi due movimenti che agiscono come soglie per l'attivazione del moltiplicatore. Pertanto, basandosi su informazioni tratte dalla letteratura e test empirici, è stato determinato il valore di 10° e di 30° per l'attivazione dei rispettivi moltiplicatori.

➤ BRACCIO SUPPORTATO O PENDENTE

Il punteggio relativo al braccio supportato viene inserito manualmente. Si assegna il moltiplicatore -1 se il braccio dell'operatore è supportato o l'operatore è inclinato in avanti.

Calcolare UPPER ARM SCORE come somma dei punteggi assegnati negli step precedenti (a, b, c, d). Si calcolano due punteggi dell'Upper Arm, uno per la destra e uno per la sinistra (questo vale per ogni step relativo agli arti superiori).

$$UPPER\ ARM\ SCORE = score_step7a + score_step7b + score_step7c + score_step7d$$

Step 8. LOCATE LOWER ARM POSITION

➤ FLESSIONE DEL GOMITO

Prendere il valore del joint angle relativo alla flessione del gomito (*Elbow Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo.

- Moltiplicatore +1: $60^\circ \leq x \leq 100^\circ$:
- Moltiplicatore +2: $0^\circ \leq x < 60^\circ \vee x > 100^\circ$

Step 9. LOCATE WRIST POSITION

➤ FLESSIONE o ESTENSIONE DEL POLSO

Prendere il valore del joint angle relativo alla flessione del polso (*Wrist Flexion/Extension*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo.

- Moltiplicatore +1: $(-15^\circ) \leq x < (-5^\circ) \vee 5^\circ < x \leq 15^\circ$
- Moltiplicatore +2: $x < (-15^\circ) \vee x > 15^\circ$

➤ DEVIAZIONE DEL POLSO

Prendere il valore del joint angle relativo alla deviazione del polso (*Wrist Ulnar Deviation/Radial Deviation*).

Assegnare il punteggio in base al valore dell'angolo.

- Moltiplicatore +1: $x \leq (-5^\circ) \vee x \geq 10^\circ$

In tal caso, il metodo REBA non definisce esplicitamente i valori specifici per la deviazione del polso che agiscono come soglie per l'attivazione del moltiplicatore. Pertanto, basandosi su informazioni tratte dalla letteratura e test empirici, è stato determinato il valore di 10° come limite massimo e (-5°) come limite minimo per l'attivazione del moltiplicatore.

Calcolare WRIST SCORE come somma dei punteggi assegnati negli step precedenti (a, b):

$$WRIST\ SCORE = score_step3a + score_step3b$$

Step 10. LOOK-UP POSTURE SCORE IN TABLE B

Attraverso i valori degli step 7, 8, 9, è possibile determinare il POSTURE SCORE B nella tabella B. Anche questo calcolo è stato automatizzato.

Table B	Lower Arm						
		1			2		
	Wrist	1	2	3	1	2	3
Upper Arm Score	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

Step 11. ADD COUPLING SCORE

Il punteggio relativo in base alla qualità di presa con la mano degli oggetti viene inserito manualmente.

- Moltiplicatore +0: la presa è buona e la forza di presa è di fascia media
- Moltiplicatore +1: la presa è accettabile ma non ideale oppure la presa è accettabile utilizzando altre parti del corpo
- Moltiplicatore +2: la presa è possibile ma non accettabile
- Moltiplicatore +3: la presa è goffa e insicura, la presa manuale non è possibile o la presa non è accettabile utilizzando altre parti del corpo

Step 12. FIND COLUMN IN TABLE C

Sommare i valori degli step 10, 11, per ottenere SCORE B:

$$SCORE B = score_step10 + score_step11$$

Step 13. TABLE C SCORE

Attraverso i valori del SCORE A (riga) e del SCORE B (colonna), è possibile determinare il Table C SCORE nella tabella C. Anche questo calcolo è stato automatizzato.

Score A	Table C											
	Score B											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Infine, il REBA SCORE viene calcolato sommando lo SCORE C all'Activity Score. In base al tipo di attività muscolare sviluppata nel compito, si assegna il moltiplicatore +1 se si verifica una di queste condizioni:

- una o più parti del corpo rimangono statiche, ad esempio supportate per più di 1 minuto
- movimenti ripetitivi, ad esempio ripetuti più di 4 volte al minuto (escluso camminare)
- cambiamenti significativi nella postura o vengono adottate posture instabili.

Il punteggio finale del REBA è dato quindi da:

$$REBA\ SCORE = SCORE\ C + ACTIVITY\ SCORE$$

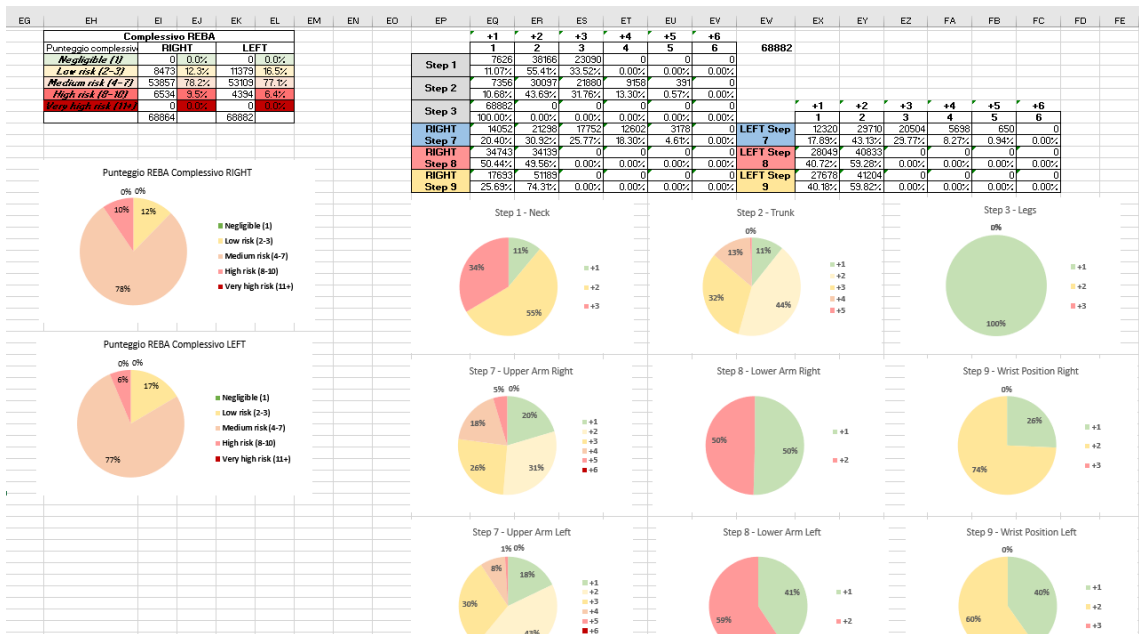
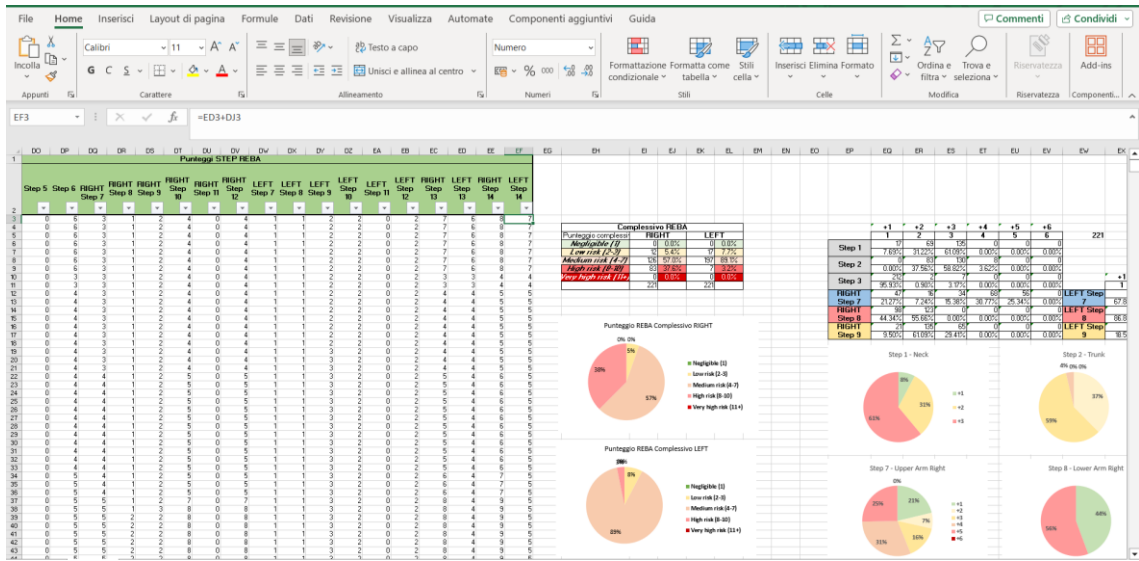


Figure 4.1 - Esempio foglio di calcolo Excel con algoritmo di compilazione automatica del REBA

4.2 Checklist OCRA

La checklist OCRA (Occupational Repetitive Actions) è una versione semplificata del metodo OCRA index, illustrato nella norma UNI ISO 11228-3 citata nel D.Lgs. 81/08 quale uno dei riferimenti per la valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico causato dallo svolgimento di un compito lavorativo comportante movimenti ripetitivi degli arti superiori. La sua applicazione è particolarmente cruciale nelle fasi iniziali di stima del rischio all'interno di un'azienda e successivamente nella gestione attiva di tale rischio.

È suddivisa in cinque parti, ciascuna dedicata allo studio approfondito dei quattro principali fattori di rischio: periodi di recupero, frequenza delle attività, forza esercitata e posture incongrue. Oltre a questi, sono considerati anche fattori complementari come vibrazioni, temperature fredde, lavori di precisione, contraccolpi, ecc. Il processo di analisi prevede l'assegnazione di valori numerici predefiniti per ciascuno dei fattori di rischio, con valori crescenti in funzione dell'aumento del rischio associato. La somma di questi valori parziali genera un valore numerico complessivo, che viene quindi correlato con l'indice OCRA. L'indice OCRA, suddiviso in fasce differenziate (verde, gialla, rossa) a diversi livelli di intensità, consente una stima del livello di esposizione al rischio biomeccanico.

Prima di avviare la compilazione della checklist, si consiglia vivamente di effettuare filmati delle postazioni da analizzare. Questa procedura mira a facilitare il processo di valutazione, consentendo una visione dettagliata delle attività svolte e delle posture assunte dai lavoratori. È di particolare rilevanza concentrarsi su quei lavori caratterizzati da cicli ripetitivi, in cui le azioni si ripetono in modo uniforme per più della metà del tempo di lavorazione analizzato. L'identificazione accurata delle stazioni di lavoro con

attività ripetitive costituisce il passo preliminare per la corretta applicazione della checklist OCRA. Solo dopo aver individuato tali stazioni si procede alla compilazione dettagliata della checklist stessa per l'individuazione e la quantificazione del rischio presente. Per effettuare la valutazione del rischio si deve procedere alla compilazione delle cinque schede che compongono la checklist. Tale suddivisione viene effettuata per analizzare i principali fattori di rischio presenti nonché i fattori complementari individuabili. Infine, per una valutazione complessiva, si va a considerare la durata netta del lavoro ripetitivo.

- *Scheda I* (Figura 4.9), la prima parte della checklist per l'individuazione del rischio da sovraccarico degli arti superiori da lavoro ripetitivo, mira in prima istanza ad una breve descrizione generale del posto di lavoro e del lavoro svolto sulla postazione in esame compresa la durata del turno ufficiale, le pause effettive (ufficiali e non) e la pausa mensa per poi passare all'individuazione del numero di ore senza adeguato recupero. Tale numero permette di giungere al punteggio finale del moltiplicatore recupero che dovrà essere usato per il calcolo finale dell'indice e l'individuazione della fascia di rischio corrispondente.

CHECKLIST OCRA

PROCEDURA BREVE PER L'IDENTIFICAZIONE DEL RISCHIO DA SOVRACCARICO DEGLI ARTI SUPERIORI DA LAVORO RIPETITIVO

COMPILATORE/I Data di compilazione.....

SCHEDA 1

• DENOMINAZIONE E BREVE DESCRIZIONE DEL POSTO DI LAVORO

- quanti posti di lavoro sono presenti identici a quello descritto e quanti posti sono, anche se non identici, molto simili tali da poter essere assimilati a quello analizzato.....
- su quanti turni è utilizzato il posto/i di lavoro.....
- quanti lavoratori in totale (considerando il numero di postazioni identiche o molto simili e i turni di lavoro) e di che sesso (n.maschi e n. femmine) operano sul posto di lavoro analizzato.....
- % temporale di reale utilizzo del posto di lavoro in un turno di lavoro. Può infatti succedere che una postazione sia utilizzata sol parzialmente in un turno di lavoro

	DESCRIZIONE	MINUTI
DURATA TURNO	ufficiale	
	effettivo	
PAUSE UFFICIALI	da contratto	
ALTRE PAUSE (oltre alle ufficiali)		
PAUSA MENSA	ufficiale	
	effettiva	
LAVORI NON RIPETITIVI (es: pulizia, rifornimento, ecc)	ufficiale	
	effettiva	
TEMPO NETTO DI LAVORO RIPETITIVO		
N. PEZZI (o cicli)	programmati	
	effettivi	
TEMPO NETTO DI CICLO (sec.)		
TEMPO DI CICLO OSSERVATO o PERIODO DI OSSERVAZIONE (sec)		

• MODALITA' DI INTERRUZIONE DEL LAVORO A CICLI CON PAUSE O CON ALTRI LAVORI DI CONTROLLO VISIVO
scegliere una sola risposta: è possibile scegliere valori intermedi

- 0 - esiste una interruzione di almeno 8/10 min. ogni ora (contare la mensa); oppure il tempo di recupero è interno al ciclo.
- 2 - esistono due interruzioni al mattino e due al pomeriggio (oltre alla pausa mensa) di almeno 8-10 minuti in turno di 7-8 ore o comunque 4 interruzioni oltre la pausa mensa in turno di 7-8 ore; o 4 interruzioni di 8-10 minuti in turno di 6 ore.
- 3 - esistono 2 pause di almeno 8-10 minuti l'una in turno di 6 ore circa (senza pausa mensa); oppure 3 pause oltre la pausa mensa in turno di 7-8 ore.
- 4 - esistono 2 interruzioni oltre la pausa mensa di almeno 8-10 minuti in turno di 7-8 ore (o 3 interruzioni senza mensa); oppure in turno di 6 ore, una pausa di almeno 8-10 minuti.
- 6 - in un turno di 7 ore circa senza pausa mensa e' presente una sola pausa di almeno 10 minuti; oppure in un turno di 8 ore e' presente solo la pausa mensa (mensa non conteggiata nell'orario di lavoro).
- 10 - non esistono di fatto interruzioni se non di pochi minuti (meno di 5) in turno di 7-8 ore.

Ora inizio	Ora fine

Indicare la durata del turno in minuti..... e disegnare la distribuzione delle pause nel turno



Figura 4.9 - Scheda I della checklist OCRA relativa al recupero nelle attività

- *Scheda II* (Figura 4.10), relativo al punteggio finale del fattore di frequenza, ovvero il secondo fattore di rischio utile per la valutazione finale, individuando le azioni tecniche eseguite nell'unità di tempo. Occorre, per ottenere tale valore, una meticolosa concentrazione sull'attività delle braccia dell'operatore. Si pone particolare attenzione sia alle azioni "dinamiche", ovvero i movimenti attivi compiuti durante il ciclo lavorativo, sia alle azioni "statiche", che comprendono le posizioni mantenute per un certo periodo. In particolare, questa valutazione dovrà essere eseguita sia sul lato destro che su quello sinistro dell'operatore.

La seconda parte di questa scheda (Figura 4.11) si focalizza invece sul fattore relativo alla forza, ricorrendo ad interviste di lavoratori per descrivere lo sforzo muscolare soggettivamente percepito a carico di un determinato segmento corporeo. Questa sezione comprende la descrizione di alcuni delle più comuni attività lavorative che prevedono rispettivamente l'uso di forza "intensa quasi massimale" con valori di 8 e oltre nella scala di Borg, (primo blocco), l'uso di forza "forte" con valori di 5, 6 e 7 nella scala di Borg (secondo blocco) e l'uso di forza "moderata" con valori di 3, 4 nella scala di Borg, (terzo blocco). Le attività da descrivere rispetto all'uso dei 3 differenti gradi di forza sono: tirare o spingere leva, schiacciare pulsanti, chiudere o aprire, premere o maneggiare componenti, usare attrezzi. È possibile aggiungere altre voci a rappresentare altre azioni individuate in cui sia necessario l'uso di forza.

• L'ATTIVITA' DELLE BRACCIA E LA FREQUENZA DI AZIONE NELLO SVOLGERE I CICLI

E' prevista una sola risposta per i due blocchi (AZIONI DINAMICHE o AZIONI STATICHE) e prevale il punteggio più alto; è possibile scegliere valori intermedi. Descrivere l'arto dominante: citare se il lavoro è simmetrico. Può essere talora necessario descrivere entrambi gli arti: in questo caso utilizzare la due caselle, una per il destro e una per il sinistro.

AZIONI TECNICHE DINAMICHE

- 0 - i movimenti delle braccia sono lenti con possibilità di frequenti interruzioni (20 azioni/minuto);
- 1 - i movimenti delle braccia non sono troppo veloci (30 az/min o un'azione ogni 2 secondi) con possibilità di brevi interruzioni;
- 3 - i movimenti delle braccia sono più rapidi (circa 40 az/min) ma con possibilità di brevi interruzioni;
- 4 - i movimenti delle braccia sono abbastanza rapidi (circa 40 az/min), la possibilità di interruzioni è più scarsa e non regolare;
- 6 - i movimenti delle braccia sono rapidi e costanti (circa 50 az/min) sono possibili solo occasionali e brevi pause;
- 8 - i movimenti delle braccia sono molto rapidi e costanti. la carenza di interruzioni rende difficile tenere il ritmo (60 az/min);
- 10 - frequenze elevatissime (70 e oltre al minuto), non sono possibili interruzioni;

AZIONI TECNICHE STATICHE

- 2,5 - è mantenuto un oggetto in presa statica per una durata di almeno 5sec., che occupa 2/3 del tempo ciclo o del periodo di osservazione;
- 4,5 - è mantenuto un oggetto in presa statica per una durata di almeno 5sec., che occupa 3/3 del tempo ciclo o del periodo di osservazione.

	dx	sx
numero azioni tecniche conteggiate nel ciclo		
frequenza di azione al minuto		
presenza di possibilità di brevi interruzioni		

DX SX

FREQUENZA

Figura 4.10 – Prima parte della Scheda II della checklist OCRA relativa alla frequenza []

• PRESENZA DI ATTIVITA' LAVORATIVE CON USO RIPETUTO DI FORZA DELLE MANI/BRACCIA (ALMENO UNA VOLTA OGNI POCHI CICLI DURANTE TUTTA L'OPERAZIONE O COMPITO ANALIZZATO) : SI NO

Possono essere barrate più risposte: sommare i punteggi parziali ottenuti. Scegliere se necessario anche più punteggi intermedi e sommarli (descrivere l'arto più interessato, lo stesso di cui si descriverà la postura). Può essere talora necessario descrivere entrambi gli arti: in questo caso utilizzare la due caselle, una per il destro e una per il sinistro

SE SI:

L'ATTIVITA' LAVORATIVA COMPORTA USO DI FORZA QUASI MASSIMALE (punt. di 8 e oltre della scala di Borg) NEL:

- tirare o spingere leve
- chiudere o aprire
- premere o maneggiare componenti
- uso attrezzi
- si usa il peso del corpo per compiere una azione lavorativa
- vengono maneggiati o sollevati oggetti

L'ATTIVITA' LAVORATIVA COMPORTA USO DI FORZA FORTE O MOLTO FORTE (punt. 5-6-7 della scala di Borg) NEL:

- tirare o spingere leve
- schiacciare pulsanti
- chiudere o aprire
- premere o maneggiare componenti
- uso attrezzi
- vengono maneggiati o sollevati oggetti

L'ATTIVITA' LAVORATIVA COMPORTA USO DI FORZA DI GRADO MODERATO (punt. 3-4 della scala di Borg) NEL:

- TIRARE O SPINGERE LEVE
- SCHIACCIARE PULSANTI
- CHIUDERE O APRIRE
- PREMERE O MANEGGIARE COMPONENTI
- USO ATTREZZI
- vengono maneggiati o sollevati oggetti

6	- 2 secondi ogni 10 minuti
12	- 1 % del tempo
24	- 5 % del tempo
32	-OLTRE IL 10% DEL TEMPO (*)
4	- 2 secondi ogni 10 minuti
8	- 1 % del tempo
16	- 5 % del tempo
24	-OLTRE IL 10% DEL TEMPO (*)
2	- 1/3 DEL TEMPO
4	- CIRCA META' DEL TEMPO
6	- PIU' DELLA META' DEL TEMPO
8	- PRESSOCHE' TUTTO IL TEMPO

(*) N.B.: Le due condizioni segnalate non possono essere ritenute accettabili.

FORZA

Figura 4.11 - Seconda parte della Scheda II della checklist OCRA relativa alla forza

- *Scheda III* (Figura 3.22), dedicata ad una accurata descrizione della postura e dei movimenti può essere considerata un elemento di predizione; specifiche patologie dell'arto superiore, in presenza degli altri elementi di rischio (frequenza, forza, durata), possono essere previste a carico degli operatori esposti. Nella valutazione del rischio posturale vanno descritte e quantizzate temporalmente solo le posture incongrue e i movimenti estremi laddove si definisce incongrua una postura o un movimento laddove l'articolazione opera in area superiore al 50% della sua massima escursione angolare.

La valutazione del rischio posturale prevede tre principali momenti operativi:

- la descrizione delle posture e/o dei movimenti incongrui separatamente per le articolazioni scapolo-omerale, del gomito, del polso e della mano (tipo di presa e movimenti delle dita) rispettivamente a dx e sx.
- se l'articolazione sta operando in area ad alto impegno, procedere alla temporizzazione del fenomeno all'interno del ciclo (1/2, 2/3, 3/3 del tempo di ciclo o di un periodo di osservazione o comunque del tempo di lavoro ripetitivo).

Si evidenzia che i punteggi per l'articolazione della spalla sono particolarmente severi in quanto sono stati creati per evidenziare la presenza di un angolo del braccio rispetto alla spalla in flessione o in abduzione superiori a 80° (braccia quasi ad altezza spalle) o estensioni estreme (più di 40°). Se si volesse segnalare la presenza di escursioni inferiori ma ancora significative usare punteggi intermedi a quelli indicati.

- l'evidenziazione della presenza di stereotipia di movimenti o mantenimenti e cioè di gesti lavorativi dello stesso tipo (indipendentemente dall'operare

in area a rischio) individuabili attraverso l'osservazione di azioni tecniche o gruppi di azioni tecniche uguali a sé stesse che si ripetono per più 50% del tempo di ciclo o per quasi tutto il ciclo; posizioni statiche mantenute uguali a se stesse per più 50% del tempo di ciclo o pressoché tutto il ciclo (ad es.: mantenimento in presa prolungata di coltelli o avvitatori ecc.); cicli di durata brevissima, inferiore ai 15 secondi o addirittura inferiori agli 8 secondi, ovviamente caratterizzati dalla presenza di azioni degli arti superiori.

- *Scheda IV* (Figura 4.13), per la classificazione dei fattori complementari che vengono suddivisi in due blocchi di cui il primo dedicato a scenari con fattori complementari fisico-meccanici (uso di strumenti vibranti, esposizione a raffreddamento da ambiente o da contatto con superfici fredde, esecuzione di azioni con contraccolpi ecc.), il secondo con fattori organizzativi. In tal caso possono essere utilizzati tutti i punteggi intermedi o addirittura possono essere inseriti punteggi differenti (inferiori ma mai superiori a quelli indicati) soprattutto per quei fattori che possono presentarsi a differente livello di rischio.

La restante parte di questa sezione, rappresenta la fase conclusiva della compilazione della checklist OCRA dove si vanno a sommare i punteggi determinati nelle parti precedenti per ricavare un “punteggio intrinseco della postazione” sottoposta ad analisi. È possibile correggere il valore di punteggio finale ottenuto rispetto alla effettiva durata del compito: questo consente di ottenere il “valore reale del punteggio di esposizione”, ponderandolo per il tempo effettivo di lavoro ripetitivo nella postazione. Il punteggio finale complessivo permetterà di individuare il livello di rischio da associare al lato destro e al lato

sinistro dell'operatore. I valori per la classificazione del rischio sono riportati in Tabella 4.4.

▪ PRESENZA DI POSTURE INADEGUATE DELLE BRACCIA DURANTE LO SVOLGIMENTO DEL COMPITO RIPETITIVO

DESTRO; SINISTRO; ENTRAMBI (descrivere il più interessato o entrambi se necessario)



A) SPALLA

DX SX

<p>flessione</p> 	<p>abduzione</p> 	<p>estensione</p> 	
<p>1 - il braccio /le braccia non sono appoggiate sul piano di lavoro ma sono sollevate di poco per più di metà del tempo</p> <p>2 - le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per circa il 10% del tempo</p> <p>6 - le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per circa 1/3 del tempo</p> <p>12 - le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per più della metà del tempo</p> <p>24 - le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) circa per tutto il tempo</p> <p>NB= SE LE MANI OPERANO SOPRA L'ALTEZZA DEL CAPO, RADDOPPIARE I VALORI.</p>			


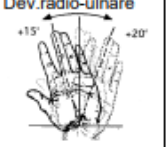
B) GOMITO

DX SX

<p>Estensione-flessione</p> 	<p>Prono-supinazione</p> 	<p>2 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per circa 1/3 del tempo.</p> <p>4 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per più di metà del tempo.</p> <p>8 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per circa tutto il tempo</p>
---	--	---



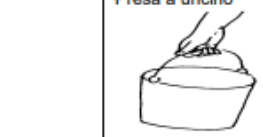

C) POLSO

DX SX

<p>Estensione-flessione</p> 	<p>Dev. radio-ulnare</p> 	<p>2 - il polso deve fare piegamenti estremi o assumere posizioni fastidiose (ampie flessioni o estensioni o ampie deviazioni laterali) per almeno 1/3 del tempo.</p> <p>4 - il polso deve fare piegamenti estremi o assumere posizioni fastidiose per più di metà del tempo</p> <p>8 - il polso deve fare piegamenti estremi per circa tutto il tempo</p>
---	--	--

D) MANO-DITA

DX SX

<p>Pinch</p> 	<p>pinch</p> 	<p>Preso a uncino</p> 	<p>Preso palmare</p> 
<p>La mano afferra oggetti o pezzi o strumenti con le dita</p> <p><input type="checkbox"/> a dita strette (pinch);</p> <p><input type="checkbox"/> a mano quasi completamente allargata (presa palmare);</p> <p><input type="checkbox"/> tenendo le dita a forma di uncino</p> <p><input type="checkbox"/> con altri tipi di presa assimilabili alle precedenti indicate</p>			<p>2 per circa 1/3 del tempo.</p> <p>4 per più di metà del tempo.</p> <p>8 per circa tutto il tempo</p>

PRESENZA DI GESTI LAVORATIVI DELLA SPALLA E/O DEL GOMITO E/O DEL POLSO E/O MANI IDENTICI, RIPETUTI PER OLTRE METÀ DEL TEMPO. (o tempo di ciclo tra 8 e 15 sec. a contenuto prevalente di azione tecniche, anche diverse tra di loro, degli arti superiori)

1,5 E

PRESENZA DI GESTI LAVORATIVI DELLA SPALLA E/O DEL GOMITO E/O DEL POLSO E/O MANI IDENTICI, RIPETUTI QUASI TUTTO IL TEMPO (o tempo di ciclo inf. a 8 sec. a contenuto prevalente di azione tecniche, anche diverse tra di loro, degli arti superiori)

3 E.

E) STEREOTIPIA

DX SX

N. B. : usare il valore più alto ottenuto tra i 4 blocchi di domande (A,B,C,D) preso una sola volta e sommarlo eventualmente a E

SCHEDA 3

POSTURA

DX

SX

Figura 4.12 - Scheda III della checklist OCRA relativa alla postura

•PRESENZA DI FATTORI DI RISCHIO COMPLEMENTARI: scegliere una sola risposta per blocco. Descrivere l'arto più interessato (lo stesso di cui si descriverà la postura). Può essere talora necessario descrivere entrambi gli arti: in questo caso utilizzare la due caselle, una per il destro e una per il sinistro

2 - vengono usati per più della metà del tempo guanti inadeguati alla presa richiesta dal lavoro da svolgere (fastidiosi, troppo spessi, di taglia sbagliata,).

2 - sono presenti movimenti bruschi o a strappo o contraccolpi con frequenze di 2 al minuto o più

2 - sono presenti impatti ripetuti (uso delle mani per dare colpi) con frequenze di almeno 10 volte/ora

2 - sono presenti contatti con superfici fredde (inf.a 0 gradi) o si svolgono lavori in celle frigorifere per più della metà del tempo.

2 - vengono usati strumenti vibranti o avvitatori con contraccolpo per almeno 1/3 del tempo. Attribuire un valore 4 in caso di uso di strumenti con elevato contenuto di vibrazioni (es.: martello pneumatico; mole flessibili ecc.) quando utilizzati per almeno 1/3 del tempo

2 - vengono usati attrezzi che provocano compressioni sulle strutture muscolo tendinee (verificare la presenza di arrossamenti, calli , ecc.. sulla pelle).

2 - vengono svolti lavori di precisione per più della metà del tempo (lavori in aree inferiori ai 2 -3 mm.) che richiedono distanza visiva ravvicinata.

2 - sono presenti più fattori complementari (quali:.....) che considerati complessivamente occupano più della metà del tempo

3 - sono presenti uno o più fattori complementari che occupano quasi tutto il tempo (quali.....)

.....

1 - i ritmi di lavoro sono determinati dalla macchina ma esistono zone "polmone" per cui si può accelerare o decelerare il ritmo di lavoro.

2 - i ritmi di lavoro sono completamente determinati dalla macchina

COMPLEMENTARI

DX

SX

CALCOLO DEL PUNTEGGIO CHECKLIST PER COMPITO/LAVORAZIONE

A) PUNTEGGIO INTRINSECO DELLA POSTAZIONE . Per calcolare l'indice di compito, sommare i valori riportati nelle 5 caselle con la dicitura: Recupero + Frequenza + Forza + Postura + Complementari.

DX

SX

PUNTEGGIO INTRINSECO POSTAZIONE

B) INDIVIDUAZIONE DEI MOLTIPLICATORI RELATIVI ALLA DURATA TOTALE GIORNALIERA DEI COMPITI RIPETITIVI. Per lavori part-time o per tempi di lavoro ripetitivo inferiori a 7 ore o superiori a 8 moltiplicare il valore finale ottenuto per gli indicati fattori moltiplicativi:

60-120 min : Fattore moltiplicativo = 0,5	241-300 min: Fattore moltiplicativo= 0,85	421-480 min: Fattore moltiplicativo= 1
121-180 min: Fattore moltiplicativo= 0,65	301-360 min: Fattore moltiplicativo= 0,925	sup.480 min: Fattore moltiplicativo= 1,5
181-240 min: Fattore moltiplicativo= 0,75	361-420 min: Fattore moltiplicativo= 0,95	

C) PUNTEGGIO REALE DELLA POSTAZIONE PONDERATO PER LA EFFETTIVA DURATA DEL COMPITO RIPETITIVO . Per calcolare l'indice di compito, moltiplicare il valore di "PUNTEGGIO INTRINSECO DELLA POSTAZIONE" A per il fattore moltiplicativo relativo alla durata del compito ripetitivo B)

DX

SX

PUNTEGGIO REALE POSTAZIONE

D) PUNTEGGIO DI ESPOSIZIONE PER PIU' COMPITI RIPETITIVI. Se esistono più compiti ripetitivi svolti nel turno eseguire la seguente operazione per ottenere il punteggio complessivo di lavoro ripetitivo nel turno (% PZ =% di tempo del compito Z nel turno).

(punt a. x % Pa) + (punt b. x % Pb) +... (punt z. x % Pz).....x fattore moltiplicativo per durata totale di tali compiti ripetitivi nel turno

	COMPITI SVOLTI NEL TURNO E/O DENOMINAZIONE DELLA POSTAZIONE :			
	DENOMINAZIONE	DURATA (min)	PREVALENZA DEL TURNO	(P)
a				(Pa)
b				(Pb)
c				(Pc)

Figura 4.13 - Scheda IV della checklist OCRA relativa ai fattori complementari e al calcolo del punteggio finale

Tabella 4.4- Corrispondenza di punteggi fra OCRA e punteggi della checklist

CHECK LIST	INDICE OCRA	FASCE	RISCHIO
fino a 7,5	fino a 2,2	Verde	Rischio accettabile
7,6 – 11,0	2,3 – 3,5	Gialla	Borderline o rischio molto lieve
11,1 – 14,0	3,6 – 4,5	Rosso leggero	Rischio lieve
14,1 – 22,5	4,6 – 9,0	Rosso medio	Rischio medio
≥ 22,5	≥ 9,1	Viola	Rischio elevato

4.2.1 Automatizzazione calcolo posturale per la checklist OCRA

L'accurata descrizione delle principali posture e movimenti incongrui va considerata un elemento di predizione della localizzazione articolare delle patologie muscolo-tendinee lavoro-correlate. Nella valutazione del rischio posturale si ricorda che vanno descritte e quantizzate temporalmente solo le posture e i movimenti incongrui.

La valutazione del rischio posturale prevede la descrizione delle posture e/o dei movimenti incongrui separatamente per le articolazioni scapolo-omerale, del gomito, del polso e della mano (tipo di presa e movimenti delle dita) rispettivamente a destra e a sinistra. Le condizioni di postura per ciascuna articolazione sono semplici. Da un punto di vista pratico, vengono utilizzati i seguenti criteri:

- per il *braccio*: indicare quanto tempo è mantenuto circa ad altezza spalle o in altre posture estreme (estensione o abduzione del braccio);
- per il *polso*: indicare quanto tempo assume posizioni incongrue (flessioni-estensioni superiori a 45° e/o deviazioni radio-ulnari ben evidenti);

- per il *gomito*: indicare quanto tempo vengono eseguiti movimenti molto ampi in flessione-estensione (60° o un percorso, fra il prendere e il posizionare un oggetto, di almeno 40 cm) o in prono-supinazione con angolo maggiore di 60° (rotazione quasi completa di oggetti);
- per la *mano*: indicare quanto tempo la presa non è comoda, come per esempio in pinch, in presa palmare o in presa a uncino.

Come detto, la checklist OCRA viene compilata sulla base dell'osservazione diretta da parte di un esperto ma per questa determinata sezione possono essere integrati i dati oggettivi misurati da dispositivi MoCap. In questo modo è stato automatizzato attraverso specifici algoritmi che permettono di elaborare i dati raccolti dai sensori, calcolare i tempi di permanenza in posture incongrue e ottenere il punteggio relativo a tale step da integrare nel punteggio finale.

Come dati di input si prendono i file di output del dispositivo Xsens MVN, sistema per il motion capture, che registra tutti i movimenti dell'uomo e permette di esportare angoli articolari. In particolare, per la compilazione dell'OCRA sono necessari due fogli excel:

- Il foglio excel in cui sono riportati tutti gli angoli articolari registrati dai sensori (“Joint Angle ZXY”);
- Il foglio excel in cui sono riportati gli angoli articolari ergonomici (“Ergonomic Joint Angles ZXY”).

Tipicamente, mediante l'utilizzo del sistema Xsens MVN, si effettua la registrazione del movimento e della postura adottata da un lavoratore durante l'intero ciclo di attività presso la sua postazione di lavoro. L'algoritmo incorporato elabora questi dati, valutando il valore degli angoli articolari e definendo, per ciascun frame dell'acquisizione, quando si

manifesta una posizione lavorativa incongrua. Tale algoritmo integra poi una temporizzazione automatica di tali posture incongrue rispetto all'intero tempo ciclo. L'algoritmo si sviluppa nella seguente modalità.

A. SPALLA

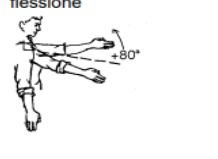
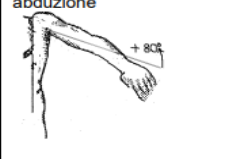
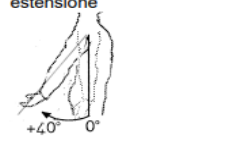
flessione	abduzione	estensione	
			
1	- il braccio /le braccia non sono appoggiate sul piano di lavoro ma sono sollevate di poco per piu' di meta' del tempo		
2	- le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per circa il 10% del tempo		
6	- le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per circa 1/3 del tempo		
12	- le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) per più della metà del tempo		
24	- le braccia sono mantenute senza appoggio quasi ad altezza spalle (o in altre posture estreme) circa per tutto il tempo		
NB= SE LE MANI OPERANO SOPRA L'ALTEZZA DEL CAPO, RADDOPPIARE I VALORI.			

Figura 4.14 - Punteggi predefiniti relativi alle posture incongrue della spalla

Prendere il valore assoluto dell'ergonomic joint angle relativo alla flessione della spalla ($T8_UpperArm Flexion/Extension$ indicato con "x") e dell'ergonomic joint relativo all'abduzione della spalla ($T8_UpperArm Lateral Bending$ indicato con "y"). Sarà assegnato "Incongruo" quando il valore degli angoli risultano:

$$x < (-20^\circ) \vee x > 80^\circ \vee y > 80^\circ$$

B. GOMITO

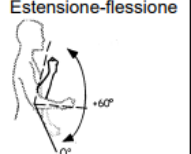
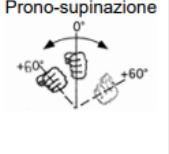
Estensione-flessione	Prono-supinazione	
		
		2 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per circa 1/3 del tempo.
		4 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per più di metà del tempo.
		8 il gomito deve eseguire ampi movimenti di flesso-estensioni o prono-supinazioni per circa tutto il tempo

Figura 4.15 - Punteggi relativi alle posture incongrue del gomito

Prendere il valore assoluto del joint angle relativo alla flessione del gomito ($Elbow Flexion/Extension$ indicato con "x") e del joint angle relativo alla prono-supinazione del gomito ($Elbow Pronation/Supination$ indicato con "y"). In particolare, nel contesto della

pronazione e supinazione del gomito, la posizione neutra stabilita dal metodo OCRA (pari a 0°) corrisponde ad un valore differente rispetto a quello che viene stabilito dal protocollo del sistema di rilevamento di movimento Xsens: il valore corrispondente a 0° per l'angolo relativo alla prono-supinazione del gomito si ha nella posizione anatomica del corpo umano, riportata nella Figura 4.16. Questa discrepanza implica che per automatizzare il calcolo di tale angolo per la checklist OCRA, dovremmo utilizzare un dato iniziale, fornito da Xsens, che vale circa 90° per definire la posizione neutra e quindi per la pronazione, arriviamo a un valore limite di 150° circa mentre per la supinazione fino a un valore limite di 30°.

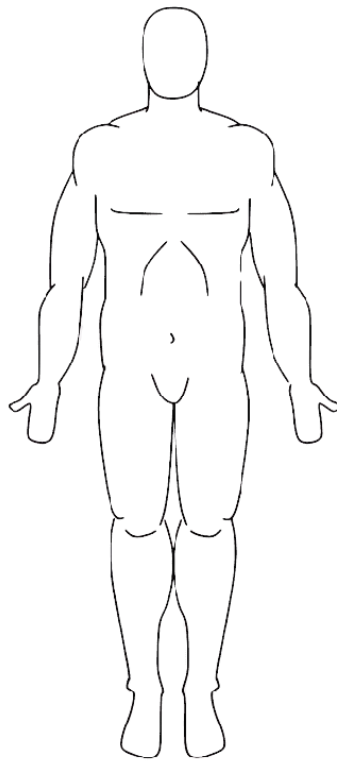


Figura 4.16 - Posizione anatomica del corpo umano

Sarà assegnato “Incongruo” quando il valore degli angoli risultano:

$$x < 0^\circ \vee x > 60^\circ \vee y < 30^\circ \vee y > 150^\circ$$

C. POLSO

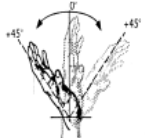
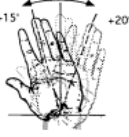
<p>Estensione-flessione</p> 	<p>Dev.radio-ulnare</p> 	<p>2 - il polso deve fare piegamenti estremi o assumere posizioni fastidiose (ampie flessioni o estensioni o ampie deviazioni laterali) per almeno 1/3 del tempo.</p> <p>4 - il polso deve fare piegamenti estremi o assumere posizioni fastidiose per più di metà del tempo</p> <p>8 - il polso deve fare piegamenti estremi per circa tutto il tempo</p>
---	---	---

Figura 4.17 - Punteggi relativi alle posture incongrue del polso

Prendere il valore assoluto del joint angle relativo alla flessione del polso (*Wrist Flexion/Extension* indicato con “x”) e del joint angle relativo alla deviazione radio-ulnare del polso (*Elbow Ulnar Deviation/Radial Deviation* indicato con “y”). Sarà assegnato “Incongruo” quando il valore degli angoli risultano:

$$x < (-45^\circ) \vee x > 45^\circ \vee y < (-20^\circ) \vee y > 15^\circ$$

Il punteggio parziale per la valutazione del rischio posturale da assumere per ognuno dei punti A-B-C visti (rispettivamente per il *gomito*, *spalla* e *polso*) fa riferimento ai tempi durante la lavorazione nei quali si assumono posizioni/movimenti incongrui; perciò, viene automatizzata anche la temporizzazione dei fenomeni all’interno del ciclo.

Tabella 4.5 - Calcolo dei tempi e % rispetto al ciclo

TEMPO posizione incongrua	ARTO DESTRO			ARTO SINISTRO		
	SPALLA flex > 80° ext < -20° abd/add > 80°	GOMITO flex/ext > 60° pron/sup > 60°	POLSO flex/ext > 45° rad dev > 15° uln dev > 20°	SPALLA flex > 80° ext < -20° abd/add > 80°	GOMITO flex/ext > 60° pron/sup > 60°	POLSO flex/ext > 45° rad dev > 15° uln dev > 20°
sec	10.67	34.23	0.00	5.67	40.32	3.97
%	8.7	28.0	0.0	4.6	33.0	3.3

D. MANO

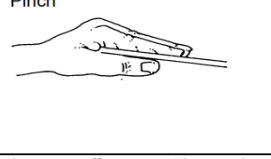
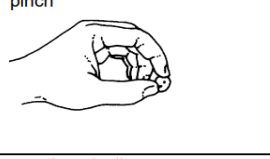

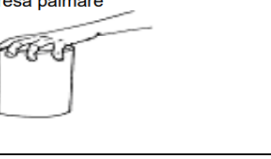
									
<p>La mano afferra oggetti o pezzi o strumenti con le dita</p> <input type="checkbox"/> a dita strette (pinch); <input type="checkbox"/> a mano quasi completamente allargata (presa palmare); <input type="checkbox"/> tenendo le dita a forma di uncino <input type="checkbox"/> con altri tipi di presa assimilabili alle precedenti indicate			<table border="1"> <tr> <td>2</td> <td>per circa 1/3 del tempo.</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>per più di metà del tempo.</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>per circa tutto il tempo</td> </tr> </table>	2	per circa 1/3 del tempo.	4	per più di metà del tempo.	8	per circa tutto il tempo
2	per circa 1/3 del tempo.								
4	per più di metà del tempo.								
8	per circa tutto il tempo								

Figura 4.18 - Punteggi relativi alle prese della mano

Differente la valutazione della *mano*, poiché ci si affida all'osservazione diretta per poter rilevare le prese riportate in Figura 4.18 e i relativi tempi. L'output dei sensori Xsens non presentano angoli o dati in grado di poter analizzare questo fattore.

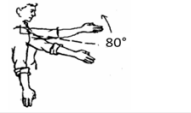
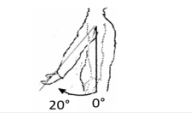

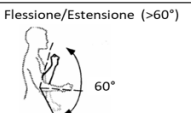

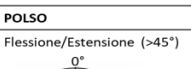
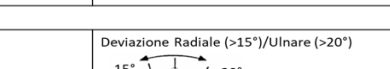
CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW			
ARTO DESTRO			ARTO SINISTRO					ARTO DESTRO			ARTO SINISTRO						
SPALLA flex > 80° ext < -20° abd/add > 80°			GOMITO flex/ext > 60° pron/sup > 60°			POLSO flex/ext > 45° rad dev > 15° uln dev > 20°			SPALLA flex > 80° ext < -20° abd/add > 80°			GOMITO flex/ext > 60° pron/sup > 60°			POLSO flex/ext > 45° rad dev > 15° uln dev > 20°		
Incongruo							TEMPO										
Incongruo							posizione										
Incongruo							Incongrua										
Incongruo							sec	10.67	34.23	0.00	5.67	40.32	3.97				
Incongruo							%	8.74%	28.05%	0.00%	4.64%	33.03%	3.25%				
Incongruo							SPALLA Flessione (>80°) Estensione (>20°) Abduzione/Adduzione (>80°)										
Incongruo							  										
Incongruo							GOMITO Flessione/Estensione (>60°) Supinazione/Pronazione (>60°)										
Incongruo							 										
Incongruo							POLSO Flessione/Estensione (>45°) Deviazione Radiale (>15°)/Ulnare (>20°)										
Incongruo							 										

Figura 4.19 - Esempio foglio di calcolo Excel con algoritmo di compilazione automatica della sezione posturale per la checklist OCRA

5 Sperimentazione in “Nuova Simonelli”

Uno studio che ha permesso di testare e validare l’efficacia dei metodi e strumenti per la valutazione ergonomica appena trattati, è stato condotto all’interno di un reale ambiente industriale. ‘Nuova Simonelli’ è uno dei due marchi di prestigio che rappresentano Simonelli Group nel mercato internazionale delle macchine da caffè espresso d’eccellenza. Quest’azienda di grande tradizione ed esperienza, si occupa dal 1936 della produzione di macchine per caffè espresso e macinacaffè professionali, esportandoli in tutto il mondo.



Figura 5.1 - Logo Nuova Simonelli, (MC)

Il progetto, sviluppato in parte all’interno di tale azienda, consiste in un’analisi ergonomica condotta su n.5 stazioni delle linee produttive per individuare eventuali posture incongrue assunte dai lavoratori o il rischio da movimenti ripetuti degli arti superiori; in particolare per quest’ultimo è stato predisposto l’applicativo “Sovraccarico biomeccanico arti superiori”, che facilita l’individuazione dei principali fattori di rischio che possono caratterizzare le attività lavorative e causare patologie muscolo-scheletriche molto diffuse. Per i seguenti motivi, in accordo con l’azienda, si è deciso di utilizzare il metodo RULA per valutare il sovraccarico biomeccanico a danno degli arti superiori attraverso l’assegnazione di un indice numerico sintetico che prende in considerazione la tipologia di movimenti eseguiti, la staticità o meno dell’attività e la forza applicata

durante le lavorazioni riferite a tutti i distretti corporei. Il risultato di questa valutazione è un indice numerico che esprime il livello di rischio e quindi la priorità di intervento. Per monitorare la variazione degli angoli ergonomici rispetto agli assi di riferimento, sono stati utilizzati i sensori Xsens che, attraverso il software di riferimento, consentono di riprodurre ciascun movimento rilevato, su un avatar in tempo reale ed al termine dell'acquisizione è possibile estrapolare, in diversi formati, gli angoli in relazione a ciascun frame. In linea con il metodo RULA che esclude un'analisi degli inferiori, i sensori inerziali sono stati posti nella parte superiore del corpo seguendo il protocollo *Upper Body* fornito da Xsens che prevede l'impiego di 11 sensori.

L'analisi ergonomica effettuata per Nuova Simonelli consiste nella valutazione di n.2 linee produttive, rispettivamente *Linea 1* e *Linea 4*: nella *Linea 1* sono state valutate le prime due stazioni (telaio ed idraulica) mentre, nella *Linea 4* sono state esaminate tre stazioni (telaio, idraulica ed elettrica), per un totale di n.5 stazioni. Per ogni stazione, quindi, attraverso i sensori e la registrazione di video, sono stati monitorate le mansioni svolte da ciascun operatore per poterne individuare eventuali criticità.

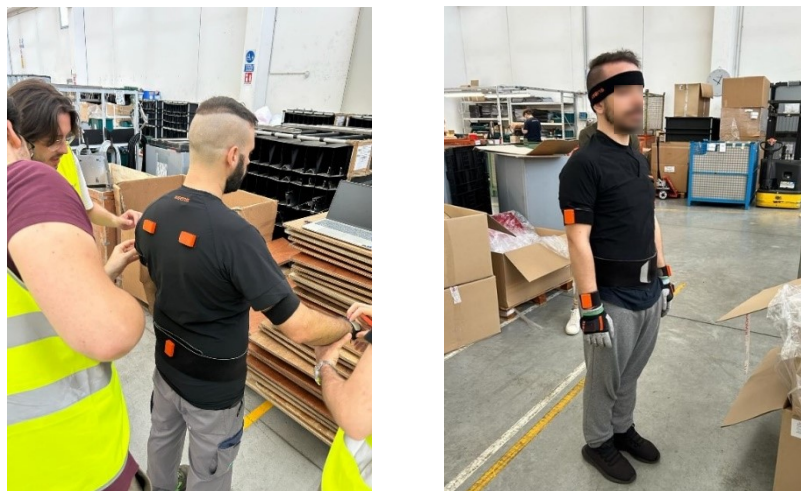


Figura 5.2 - Preparazione e allestimento del sistema Xsens per acquisizioni ergonomiche sugli operatori di Nuova Simonelli

5.1 Raccolta e analisi dati

Per ottimizzare il monitoraggio dell'ergonomia e delle criticità relative a ciascun operatore, sottoposto ad analisi in Nuova Simonelli, attraverso il metodo RULA, è stato automatizzato il calcolo dei punteggi aggregati, rappresentativi dell'intero processo operativo, e dei punteggi specifici associati a ciascun singolo step della tecnica. Questa automazione è stata resa possibile grazie all'implementazione dell'algoritmo di compilazione automatica all'interno di un foglio di calcolo Excel. Sono stati utilizzati gli output dei sensori e del software Xsens, convertiti in formato .xlsx, organizzati in un insieme di dati divisi in "Joint Angles ZXY" e "Ergonomic Joint Angles ZXY" per ciascun frame. Attraverso l'applicazione di questa procedura, siamo stati in grado di acquisire, in relazione al tempo complessivo, che comprende l'intero arco di attività dalla prima mansione al completamento del ciclo di lavorazione, i livelli di rischio associati a ciascuna stazione di lavoro. Tale approccio ha fornito una panoramica dettagliata e temporale dei rischi ergonomici che caratterizzano le diverse fasi delle attività svolte in ciascuna postazione. Nei paragrafi successivi, viene esaminata dettagliatamente ciascuna stazione di lavoro, presentando i risultati ottenuti e le relative considerazioni.

5.1.1 Linea 1 – Stazione A: Operatore 1

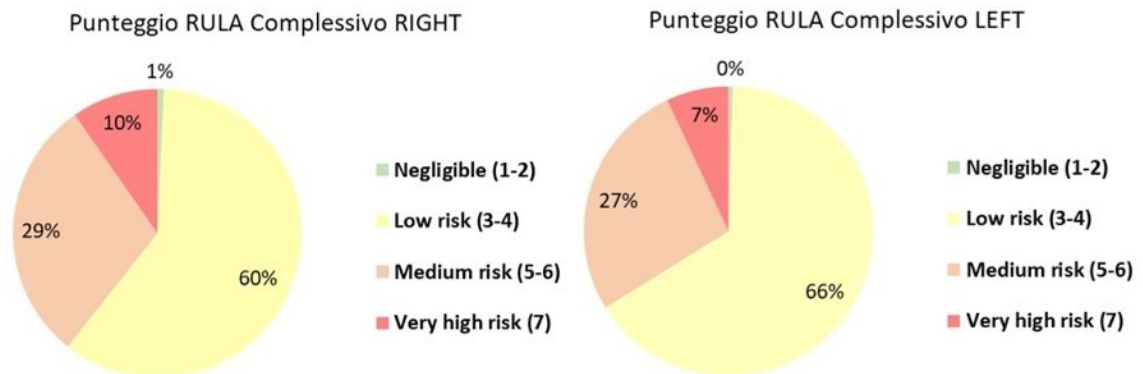


Figura 5.3 – Grafici che riportano i livelli di rischio della stazione A della Linea 1

Nella Figura 5.3 possiamo osservare i grafici “a torta” dei punteggi RULA complessivi rispettivamente della parte destra e della parte sinistra del corpo (Upper Body): da questi è possibile visualizzare quale sia il valore del rischio medio-alto, che risulta più alto e massimo per la parte destra del corpo. Ciò è strettamente correlato al fatto che l’operatore coinvolto è destrorso.

Spostando l’attenzione sullo Step 9, corrispondente al collo (*Neck*), è evidente dalla Figura 5.4 che si tratta di una parte del corpo sottoposta a un rischio rilevante e significativo: il punteggio del collo va ad influire molto sul punteggio RULA complessivo in quanto, come visibile dalla procedura di valutazione del metodo stesso, una leggera estensione verso l’alto comporta un elevato incremento (+4). Vedremo in generale come in ogni stazione si verifica lo stesso elevato rischio rilevato dal metodo RULA, in quanto ciascun operatore deve visualizzare le fasi di assemblaggio su uno schermo posizionato al di sopra della postazione di lavoro. Inoltre, alcuni valori relativi al collo sono stati corretti in quegli istanti di ciclo in cui l’operatore si distraeva e quindi compieva movimenti non correlati alle operazioni lavorative

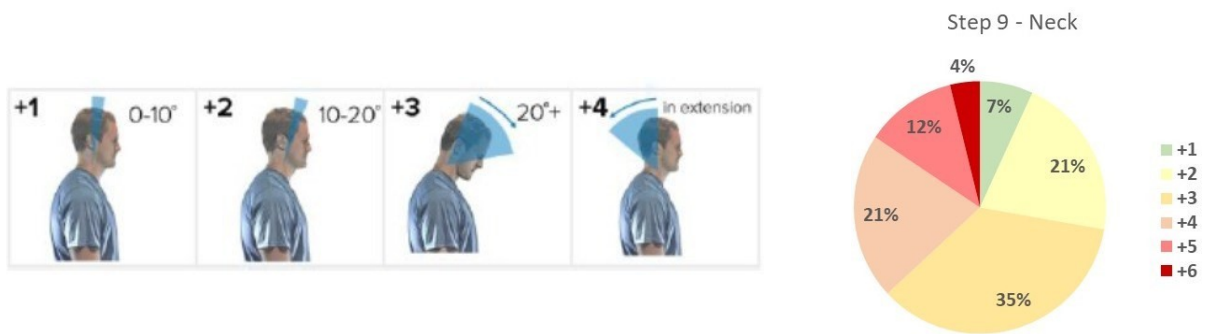


Figura 5.4 - Punteggi parziali relativi allo Step 9 - Neck, con relativo grafico dei livelli di rischio per il collo nella stazione A della Linea 1

È stato possibile effettuare ulteriori correzioni dei dati, poiché durante questa fase, in parallelo, sono stati visionati i video realizzati in azienda, che permettono di osservare ciò che effettivamente l'operatore esegue durante il tempo ciclo.

In particolare, ciascuna stazione delle due linee analizzate ha richiesto nello specifico la necessità di integrare i valori di:

- *Muscle Use*, facente riferimento ad attività ripetitive come avvitamamenti;
- *Force Load*, attività che richiedono sollevamento di componenti con peso superiore a 2 kg.

Stazione	Operazione	Inizio (minuti)	Fine (minuti)	Step 6 Muscle Use		Step 7 Force Load	
				+0	+1	+0	+1
A	Sollevamento parete portagruppi	4,04	4,2				+1
	Sollevamento telaio	6,37	6,41				+1
	Avvitamento base manuale	8,09	8,35	dx	+1		
	Avvitamento base manuale	9,01	9,29	dx	+1		
	Sollevamento telaio	9,29	9,35				+1
	Sollevamento telaio	9,45	9,51				+1
	Prelievo componente pesante (motore)	15,48	15,54				+1
	Spostamento componente pesante (motore)	16,38	16,42				+1
	Avvitamento manuale	17,49	18,55	dx	+1		

Figura 5.5 - Operazioni rilevate nella stazione A della Linea 1 da includere nei valori di "Muscle Use" e "Force Load"

Individuando ogni frame da correggere, si è entrati all'interno dei punteggi standard ricavati automaticamente dal foglio Excel RULA e sono stati corretti assegnando +1 dove necessario. In questo modo si è tenuto conto di carichi pesanti e di attività ripetitive che incidono in un'analisi ergonomica.

Un ulteriore aspetto riguardante l'analisi dati è stato quello di correggere, in questa ed altre stazioni, la calibrazione effettuata poiché non sempre riuscita correttamente. Per fare ciò è stato necessario individuare frame in cui l'operatore si trovava in posizione di riposo (*N-pose*) e visualizzando i relativi angoli in tale posizione, effettuare un eventuale off-set degli stessi.

Infine, sono stati realizzati dei grafici Punteggio-Tempo per poter visionare picchi di valore per un certo intervallo di tempo, segnale che mette in luce un'operazione critica: in questa stazione e per questo operatore della Linea 1 è possibile identificare un'anomalia nella parte finale in comune a tutti e tre i grafici. È possibile notare nei tre grafici (Figura 5.6) un andamento nella parte finale in cui i punteggi si mantengono elevati per tutta la durata dell'operazione di avvitamento manuale pari a circa due minuti (Figura 5.7).

Ciò che è stato appena descritto è stato effettuato per ciascuna stazione allo stesso modo.

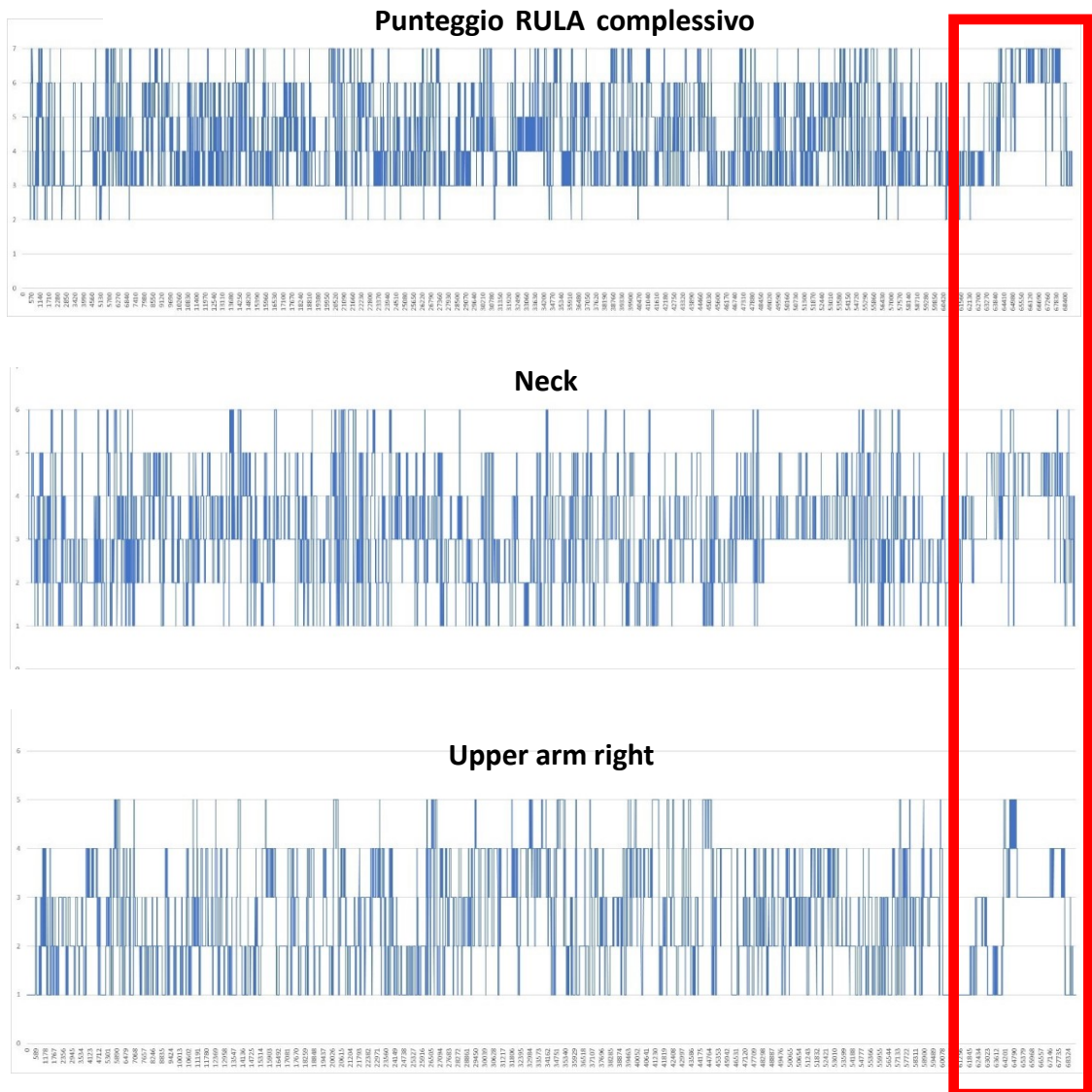


Figura 5.6 - Grafici di alcuni punteggi RULA d'interesse, in funzione del tempo

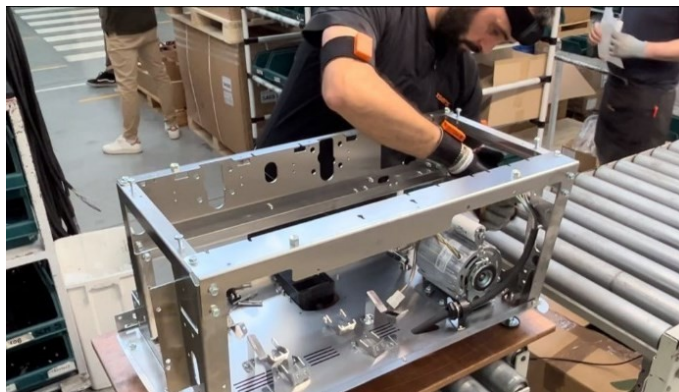


Figura 5.7 - Operazione di avvvitamento manuale nella stazione A della Linea

5.1.2 Linea 1 – Stazione B: Operatore 1

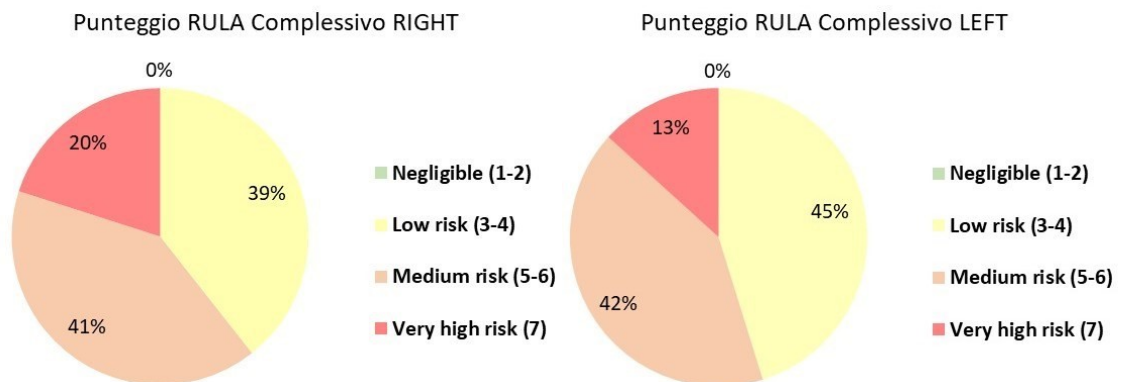


Figura 5.8 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione B della Linea 1

All'interno della stessa linea ma nella stazione successiva e mantenendo lo stesso operatore, si è notato un innalzamento per il valore del rischio medio-alto delle attività complessive raggiungendo il 61%. Analogamente a quanto visto nella stazione A, incide in maniera altrettanto significativa il valore relativo al collo per le medesime considerazioni fatte in relazione ai movimenti frequenti compiuti per visionare lo schermo presente al di sopra della stazione.

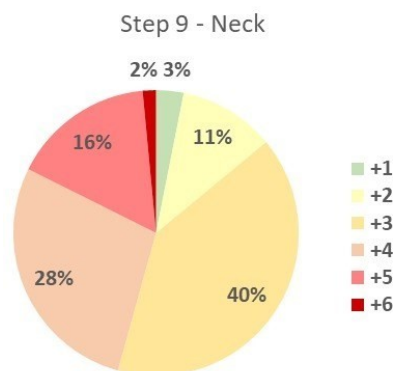


Figura 5.9 – Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione B della Linea 1



Figura 5.10 - Operazione di sollevamento manuale e conseguente spostamento di componenti pesanti nella stazione B della Linea 1

Un ulteriore grafico utile ai fini dell'analisi di questa postazione è quello relativo allo Step 10 in Figura 5.11, che considera il dorso (*Trunk*). Dai grafici è evidente il momento in cui l'operatore compie l'operazione di prelievo e di spostamento dei due componenti con peso superiore a 2 kg, come visibile dalla Figura 5.10. Anche questo fattore incide sul livello di rischio totale che caratterizza tale stazione in esame.

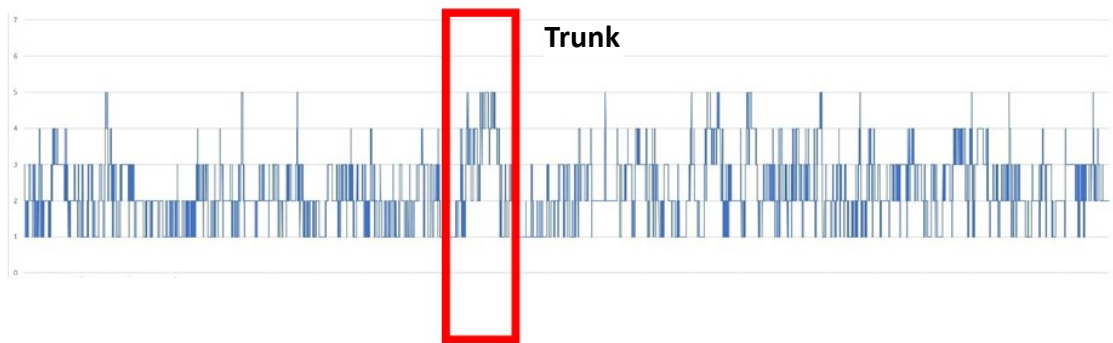


Figura 5.11 -Grafico del punteggio RULA relativo al dorso in funzione del tempo

Nel concludere la valutazione ergonomica di questa stazione sono state individuate allo stesso modo le operazioni che includono l'utilizzo della forza per il sollevamento di carico (*Force Load*) e le attività ripetitive a livello muscolare (*Muscle Use*), per poi correggere i punteggi.

Stazione	Operazione	Inizio (minuti)	Fine (minuti)	Step 6 Muscle Use		Step 7 Force Load	
				+0	+1	+0	+1
B	Avitamento manuale	1,51	2,38	dx	+1		
	Avitamento manuale	4,1	6,1	dx	+1		
	Prelievo n.2 componenti pesanti (ASS. GR. ERO	8	8,21				+1
	Spostamento n.2 componenti pesanti (ASS. GR	8,22	8,3				+1
	Sollevamento componenti pesanti (ASS. GR. Et	8,4	9,14				+1
	Avitamento manuale	9,5	10,42	dx	+1		
	Spostamento componente pesante (CALDAIA S	14,45	14,56				+1
	Avitamento manuale	15	15,4	dx	+1		
	Avitamento manuale	16	17,1	dx	+1		
	Avitamento manuale	18,57	19,1	dx	+1		

Figura 5.12 - Operazioni rilevate nella stazione B della Linea 1 da includere nei valori di "Muscle Use" e "Force Load"

5.1.3 Linea 4 – Stazione A: Operatore 2

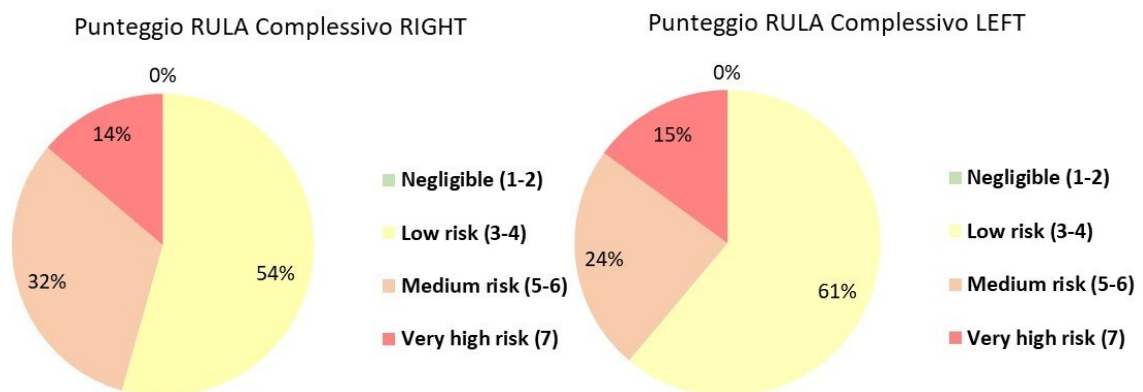


Figura 5.13 – Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione A della Linea 2

Per la prima stazione della *Linea 2*, in cui opera un diverso soggetto rispetto alle precedenti postazioni esaminate, il livello di rischio medio-alto si attesta ad un valore pari al 48% sulla durata complessiva delle mansioni. Il tempo ciclo per ciascuna stazione di questa linea sono molto ridotti rispetto alle prime due della *Linea 1*.

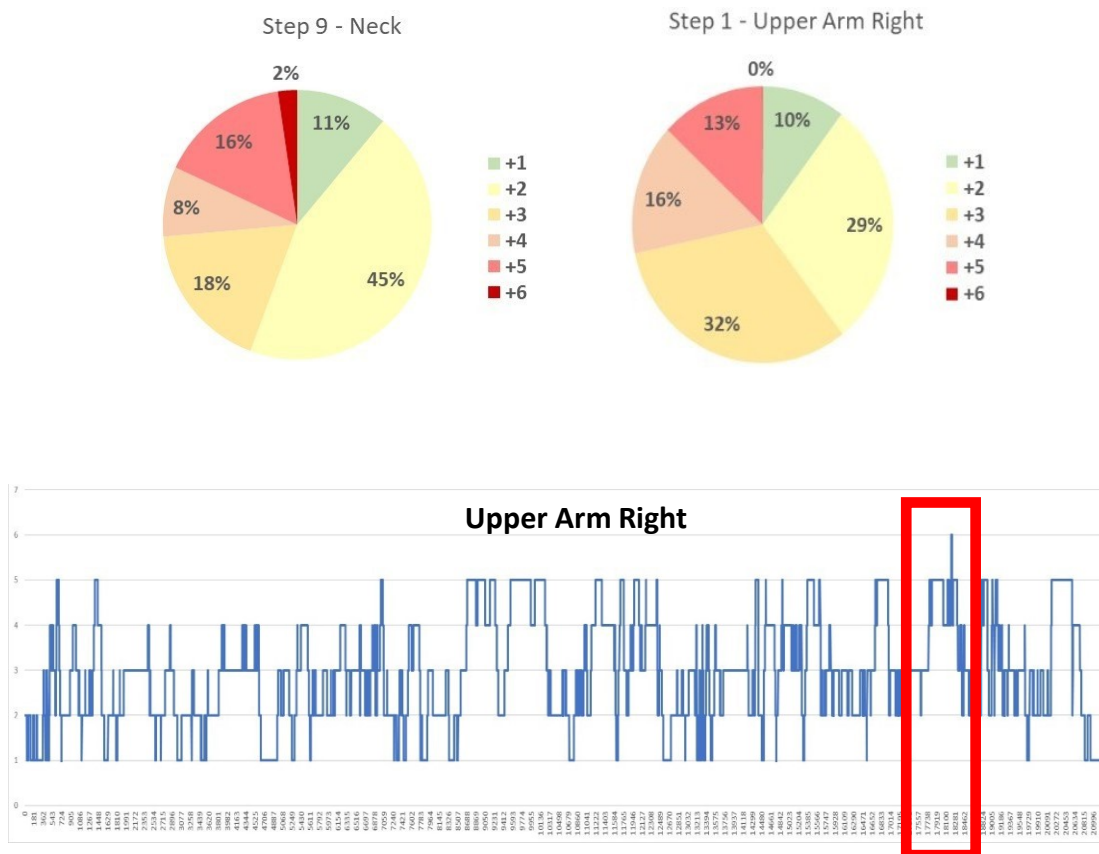


Figure 5.1 - Grafici estratti dall' algoritmo di compilazione automatica del metodo RULA

In questo caso, oltre al collo è da notificare un livello di rischio relativo alla parte superiore delle braccia, soprattutto in quei momenti di avvvitamento in cui si assume un angolo di flessione molto elevato, come in Figura 5.14. Questa operazione è stata evidenziata nel grafico *Upper Arm Right* dove si rileva il punteggio più elevato per tale stazione.



Figure 5.14 - Operazione di avvvitamento nella stazione A della Linea 1

Stazione	Operazione	Inizio (minuti)	Fine (minuti)	Step 6 Muscle Use		Step 7 Force Load	
				+0	+1	+0	+1
A	Sollevamento componenti	3	3,09				+1

Figura 5.15 - Operazioni rilevate nella stazione A della Linea 4 da includere nei valori di “Muscle Use” e “Force Load”

5.1.4 Linea 4 – Stazione B: Operatore 3

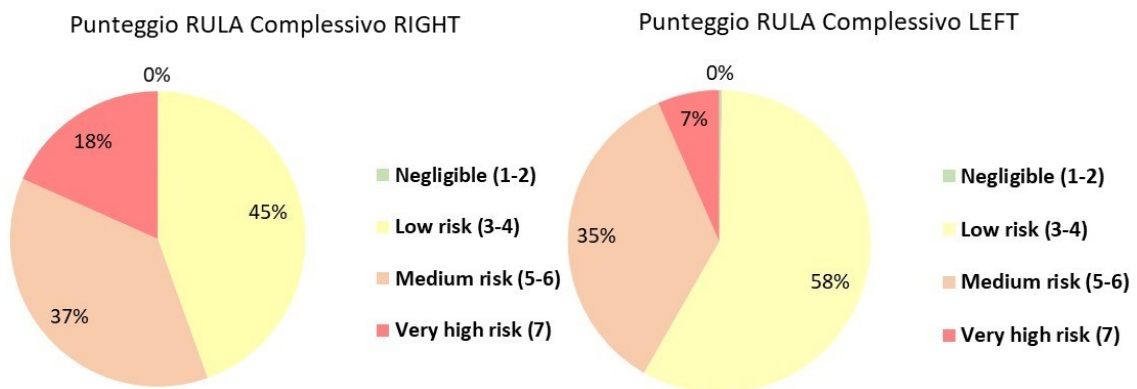


Figura 5.16 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione B della Linea 4

La stazione B della Linea 4 è caratterizzata da un rischio medio-alto presente nel 55% delle attività complessive. Ma in questa postazione è stato importante concentrarsi sulla fisionomia dell’operatore, poiché il più alto tra gli operatori sottoposti all’analisi. Questo fattore spesso costringe l’operatore ad assumere posture anomale e pericolose per parti del corpo come collo e schiena. Per lo Step 9 – Neck, sono quasi assenti istanti in cui il collo non è a rischio da sovraccarico muscoloscheletrico, come evidente in Figura 4.17.

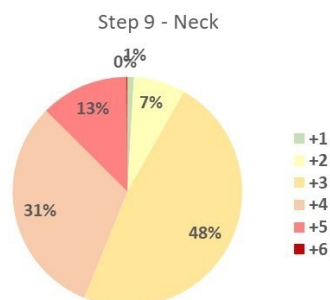


Figura 5.17 - Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione B della Linea 4

Punteggio RULA complessivo

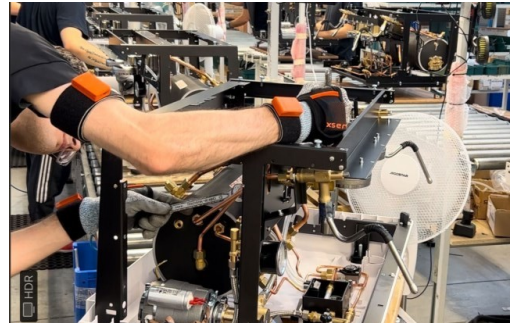
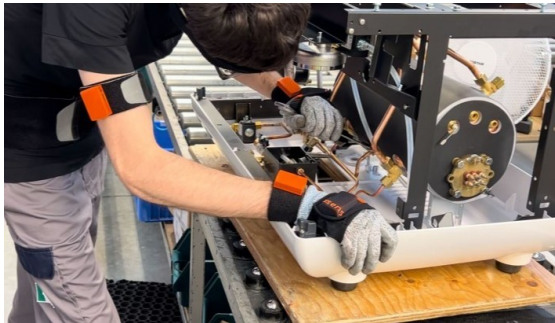
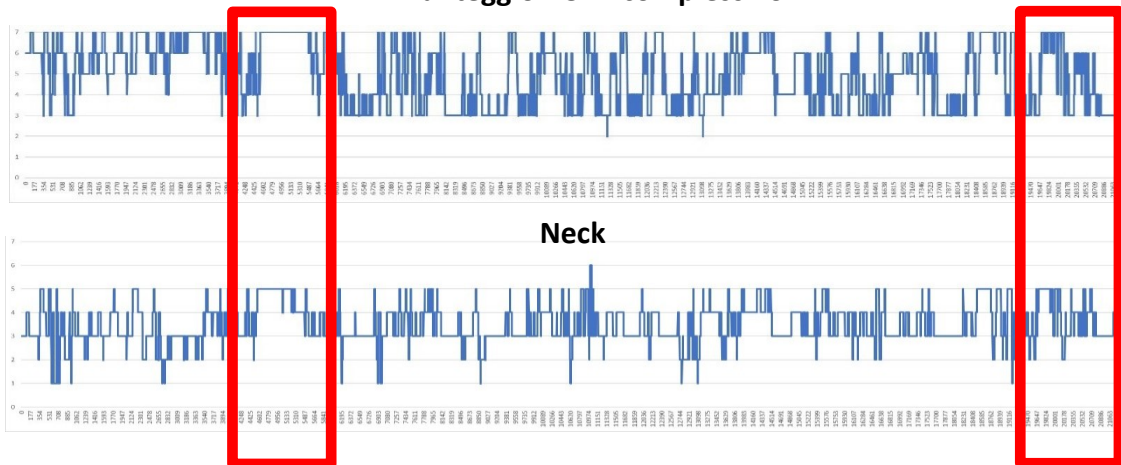


Figure 5.2 - Grafici di alcuni punteggi RULA d'interesse, in funzione del tempo, dove sono evidenziati particolari picchi in relazione a posture incongrue da parte dell'operatore 3

Stazione	Operazione	Inizio (minuti)	Fine (minuti)	Step 6 Muscle Use		Step 7 Force Load	
				+0	+1	+0	+1
B	Avvitamento manuale	0	1,02	dx	+1		+1
	Avvitamento con chiave inglese	1,16	1,4	dx	+1		
	Avvitamento con chiave inglese	2,36	2,54	dx	+1		
	Avvitamento manuale	3,08	3,35	dx	+1		
	Avvitamento con chiave inglese	3,44	4,13	dx	+1		
	Avvitamento manuale	4,4	4,51	dx	+1		
	Avvitamento con chiave inglese	4,53	5,16	dx	+1		
	Avvitamento manuale	5,28	5,35	dx	+1		
	Avvitamento con chiave inglese	5,39	5,45	dx	+1		
	Avvitamento con chiave inglese	6,29	6,35	dx	+1		

Figura 5.18 - Operazioni rilevate nella stazione B della Linea 4 da includere nei valori di "Muscle Use" e "Force Load"

5.1.5 Linea 4 – Stazione C: Operatore 4

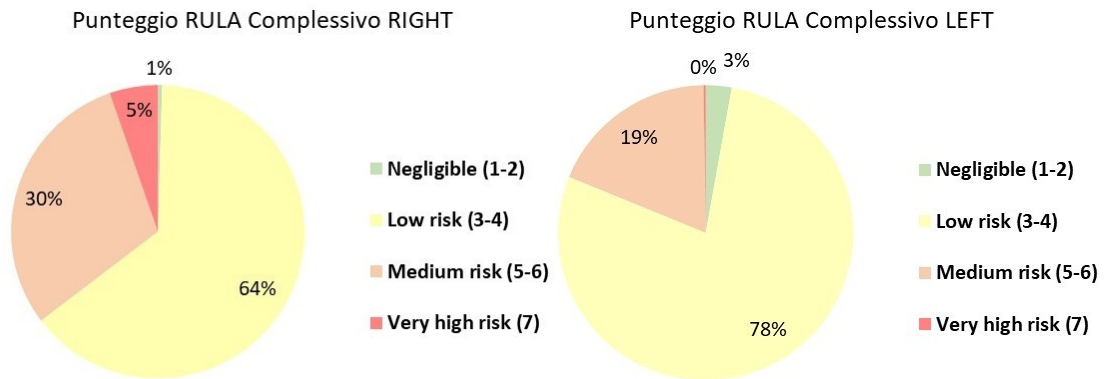


Figura 5.19 - Grafici che riportano i diversi livelli di rischio della stazione C della Linea 4

Infine, per l'ultima postazione esaminata nella Linea 4, si riscontra un rischio medio-alto presente nel 35% delle attività complessive. Risulta essere il valore più basso tra le cinque stazioni che sono state valutate dal punto di vista ergonomico, senza particolari criticità da evidenziare.

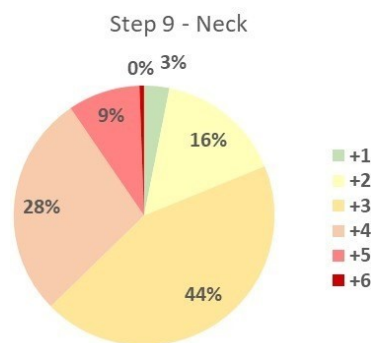


Figura 5.20 - Grafico che riporta i livelli di rischio per il collo nella stazione C della Linea 4

Stazione	Operazione	Inizio (minuti)	Fine (minuti)	Step 6 Muscle Use		Step 7 Force Load	
				+0	+1	+0	+1
C	Avvitamento manuale	3,21	4,01	dx	+1		

Figura 5.21 - Operazioni rilevate nella stazione C della Linea 4 da includere nei valori di "Muscle Use" e "Force Load"

5.2 Risultati e discussione

Dall'analisi risulta che la *Linea 4* sia migliore rispetto alla linea 1 dal punto di vista ergonomico: nella stazione B della *Linea 1*, infatti, abbiamo il valore più elevato sul rischio medio-alto complessivo. Ciò è dettato anche dalla complessità della linea oltre che da tempi ciclo maggiori rispetto all'altra linea analizzata:

- Nella *Linea 1*, le attività critiche si concentrano nella stazione B (idraulica) per la presenza di sollevamento e trasporto di componenti pesanti, oltre a numerosi avvitamenti manuali;
- Nella *Linea 4*, definiamo come critica la stazione B (idraulica), anche in questo caso per le molteplici attività di avvvitamento.

Un fattore da non sottovalutare sono le caratteristiche fisiche dell'operatore. A parità di linea e di prodotto realizzato infatti, si nota come l'operatore di altezza inferiore ha maggiori criticità relative al collo, mentre l'operatore di altezza maggiore ha maggiori criticità sulla schiena, in particolare in alcune mansioni specifiche in cui assume una posizione scorretta nel punto di esecuzione della mansione. Sono stati quindi pensati e proposti all'azienda degli accorgimenti e possibili soluzioni, come output di questo studio:

- Per ogni stazione di lavoro, un eventuale impiego di schermi regolabili in altezza per evitare estensioni del collo ripetute durante le operazioni, potendo posizionarlo nella giusta posizione al variare dell'operatore;
- Facilitare prelievo dei componenti per gli operatori lungo la linea, soprattutto se pesanti;
- Considerare le caratteristiche fisiche degli operatori in ciascuna linea.

6 Sperimentazione in “COSMARI”

L'Università Politecnica delle Marche è stata protagonista nel realizzare valutazioni ergonomiche mirate a migliorare le condizioni di lavoro nella realtà lavorativa della raccolta dei rifiuti. In particolare questa analisi nasce da una collaborazione con Cosmari, una società pubblica, le cui attività sono ad oggi distinte secondo le seguenti direttrici: servizi di raccolta differenziata e indifferenziata dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU), gestione dell'impianto smaltimento e recupero RSU, gestione dell'impianto di compostaggio, gestione dell'impianto di selezione manuale del multimateriale leggero e di carta e cartone, gestione delle discariche di appoggio, gestione dei centri di conferimento comunale, piattaforma provinciale per Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) e ingombranti. Quasi tutti i Comuni soci, attualmente 56, hanno avviato la raccolta differenziata spinta “Porta a Porta”. La raccolta differenziata è in costante crescita tanto che si attesta, su scala provinciale, su valori superiori al 75% con molti Comuni che stabilmente hanno percentuali superiori all'80%. In virtù di questi risultati la provincia di Macerata è al primo posto nella raccolta differenziata nelle Marche [39].



Figura 6.1 - Logo Gruppo COSMARI, (MC)

Il Gruppo Cosmari orienta da sempre la sua missione aziendale verso servizi che, oltre alla qualità e all'economicità, promuovono la sostenibilità dei sistemi adottati e dei comportamenti responsabili dei cittadini nella raccolta differenziata dei rifiuti, sia attraverso il sistema "Porta a Porta" che il tradizionale sistema dei cassonetti stradali. Un impegno che va oltre, abbracciando qualità, ricerca e innovazione. L'attenzione alla sostenibilità si concretizza anche nei dettagli operativi, grazie alla collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche per valutazioni ergonomiche specifiche durante gli step della raccolta e del lancio nel sistema "Porta a Porta". Seppur si trattino di movimenti circoscritti dal punto di vista temporale sia nell'azione di raccolta che in quella di lancio, gli individui addetti a queste attività di movimentazione manuale di carichi (MMC) sono coinvolti comunque in posizioni e posture che, nel lungo periodo, possono portare all'insorgenza di disturbi e malattie muscoloscheletriche. L'INAIL ha stimato che nel quinquennio 2004-2008 sono emersi 55mila infortuni nel campo dell'industria dei rifiuti solidi urbani [40]. Tra le cause di tali infortuni rientra la raccolta manuale, dove i fattori di rischio legato alla MMC sono carichi troppo pesanti, la necessità di torsioni del busto e di movimenti di strappo (ad esempio il lancio del sacco nel mezzo di raccolta, sollevamento in ambienti ristretti ecc.).

Tabella 6.1- Rischi da MMC in funzione delle attività svolte secondo INAIL

Attività	Classe di rischio da MMC
Raccolta rifiuti indifferenziati	<i>moderato fino a elevato per peso e frequenza delle azioni</i>
Raccolta da cestini	<i>limitato-assente</i>
Raccolta da cestoni	<i>moderato per il peso del sacco da movimentare</i>
Raccolta rifiuti ingombranti	<i>moderato controllabile con corretta movimentazione</i>
Spazzamento manuale	<i>rischio moderato per torsioni del tronco e movimenti ripetitivi</i>
Utilizzo di strumenti a spalla (soffione, pompa da diserbo)	<i>moderato per lunghi tempi di adibizione</i>

6.1 Valutazione ergonomica: RULA e REBA

Nel caso del gruppo Cosmari, gli operatori ecologici sono incaricati della raccolta di vari tipi di rifiuti, tra cui carta, plastica e rifiuti residui. Le attività predominanti coinvolgono la manipolazione manuale di carichi, con pesi che vanno da meno di 1 kg fino a 10 kg. Per garantire un'analisi appropriata, sono state utilizzate due metodologie molto utilizzate per valutare i rischi relativi al carico posturale e biomeccanico durante le attività di sollevamento e lancio del sacchetto: RULA e REBA. Inizialmente considerata una valutazione molto complessa poiché in ambienti diversi dalle classiche postazioni di lavoro industriali e da laboratorio; l'identificazione delle posture e dei movimenti di ciascun arto del corpo per ciascuna operazione di sollevamento attraverso l'analisi video risulta intrinsecamente complessa. Questa complessità deriva dalla visibilità non sempre chiara dell'attività, rendendo difficile una stima accurata a occhio nudo degli angoli anatomici. Questi inconvenienti sono stati superati per mezzo del sistema inerziale Xsens MVN, con il quale è stato possibile registrare ed acquisire i movimenti degli addetti alla raccolta porta a porta. I dati così ottenuti, oltre ad essere più affidabili e precisi rispetto a quelli derivati dall'analisi visiva costituiscono una solida base per avviare un'approfondita analisi ergonomica. Va evidenziato che le acquisizioni sono state condotte in ottemperanza al protocollo *Full Body* di Xsens, coinvolgendo tutti i 17 sensori inerziali per garantire una copertura completa e una totale cattura degli angoli anatomici delle varie parti del corpo coinvolte durante le fasi di raccolta e lancio (Figura 6.2 e Figura 6.3). Infine, questi dati sono stati fondamentali per verificare l'efficacia degli algoritmi sviluppati per la compilazione automatica dei punteggi RULA e REBA.

In particolare, gli operatori hanno indossato sensori a corpo intero per circa 30 minuti durante i loro turni di lavoro all'aperto, che comprendevano le attività di raccolta dei

rifiuti (Figure 6.1). Ciò ha permesso la valutazione delle posture degli operatori durante le fasi di raccolta e smaltimento. Diverse acquisizioni di dati sono state effettuate in diverse aree, coinvolgendo operatori e tipi di rifiuti differenti. A titolo esemplificativo, viene presentata l'analisi RULA e REBA di un operatore durante la raccolta della Carta nella zona di Civitanova Marche. Nello specifico, si riportano i risultati di una raccolta e di un lancio.





Figure 6.1 – Acquisizioni attraverso il sistema inerziale Xsens sugli operatori del gruppo Cosmari impegnati nella raccolta porta a porta

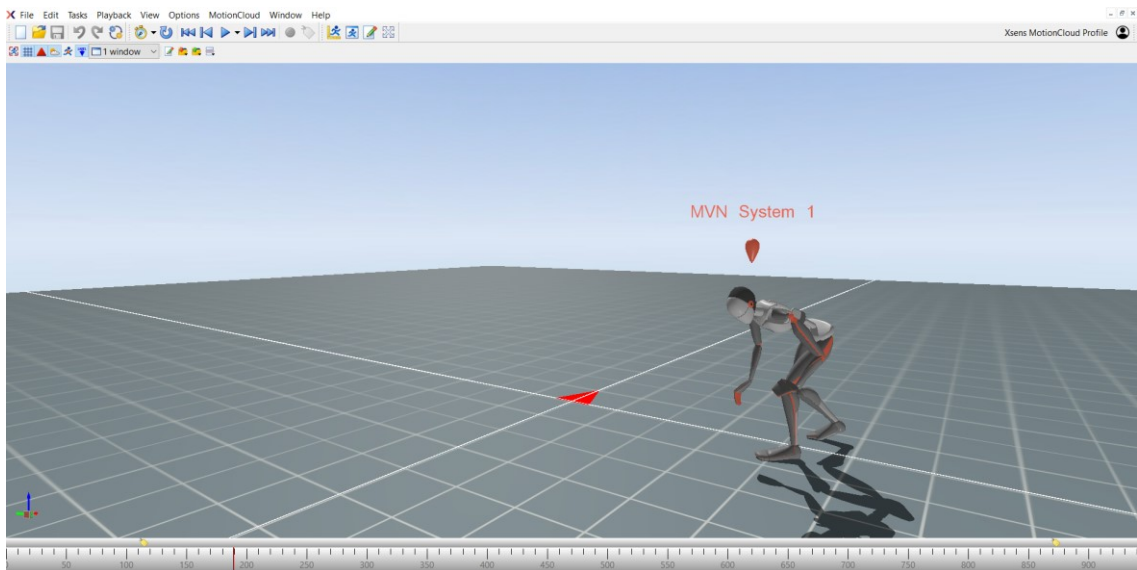


Figura 6.2 – Elaborazione del movimento nella fase di raccolta all'interno del software MVN di Xsens

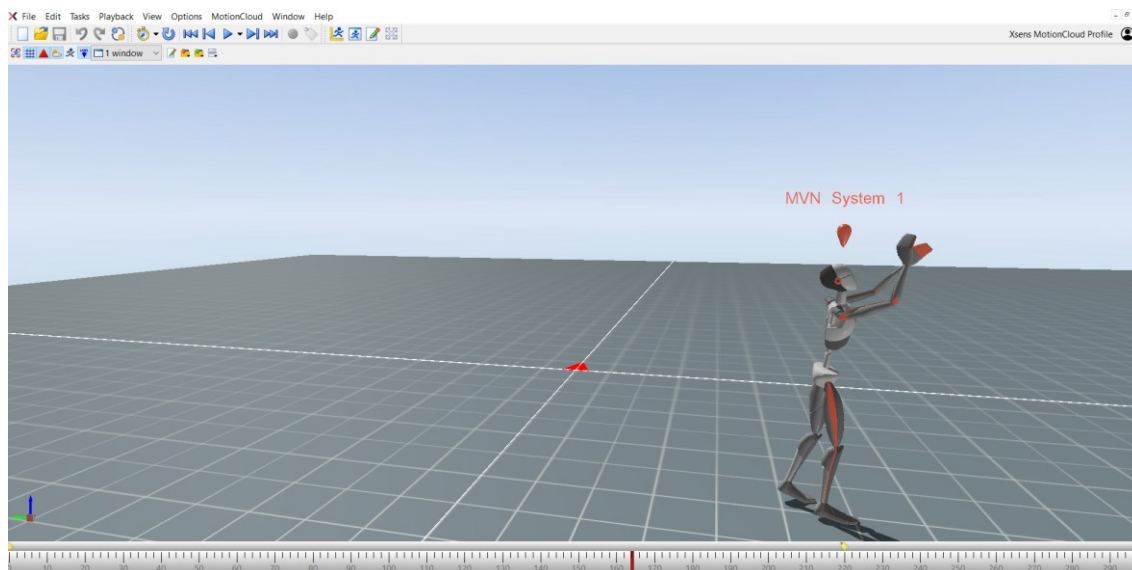


Figura 6.3 – Elaborazione del movimento nella fase di lancio all'interno del software MVN di Xsens

6.1.1 Fase di raccolta

In tal contesto, l'operatore addetto al prelievo di rifiuti dapprima si concentra nella raccolta per poi successivamente terminare l'operazione con il deposito dei RSU nell'apposito veicolo di trasporto. In questo paragrafo saranno prese in esame le posture acquisite dall'operatore durante questa prima fase, grazie all'acquisizione dei valori degli angoli articolari effettuata dal sistema Xsens MVN. Questi dati sono stati prelevati ed esportati nei fogli di calcolo Excel per sottoporli agli algoritmi in grado di calcolare in maniera automatizzata, gli indici RULA e REBA per ciascun frame in cui è suddivisa la durata totale dell'acquisizione, utili a determinare il livello di rischio.

Per l'intera durata dell'attività si riscontra un rischio medio-alto, ma se si osserva il rischio alto/molto alto rilevato per l'attività di raccolta risulta :

- Per il 55% della durata dell'attività (RULA), visualizzabile nella Tabella 6.2;

Tabella 6.2 - % temporale dei livelli di rischio RULA per la fase di raccolta

Complessivo RULA				
Punteggio complessivo	RIGHT		LEFT	
Negligible (1-2)	0	0.0%	0	0.0%
Low risk (3-4)	0	0.0%	0	0.0%
Medium risk (5-6)	5.68	44.9%	8.95	70.8%
Very high risk (7)	6.97	55.1%	3.7	29.2%
Tempo acquisizione (sec)	12.65		12.65	

- Per l'86% della durata delle attività (REBA), visualizzabile nella Tabella 4.3.

Tabella 6.3 - % temporale dei livelli di rischio REBA per la fase di raccolta

Complessivo REBA				
Punteggio complessivo	RIGHT		LEFT	
Negligible (1)	0	0.0%	0	0.0%
Low risk (2-3)	0	0.0%	0	0.0%
Medium risk (4-7)	1.77	14.0%	1.77	14.0%
High risk (8-10)	7.85	62.1%	7.53	59.6%
Very high risk (11+)	3.03	24.0%	3.35	26.5%
Tempo acquisizione (sec)	12.65		12.65	

La differenza chiave nel simultaneo utilizzo dei metodi RULA e REBA emerge dall'analisi specifica della postura delle gambe, un aspetto distintivo presente nel metodo REBA ma notevolmente assente nel metodo RULA. In Figura 6.4 è visibile chiaramente come per circa metà della durata dell'attività si ha il massimo punteggio di rischio, che andrà di conseguenza ad innalzare il punteggio REBA complessivo.

Step 3 - Legs

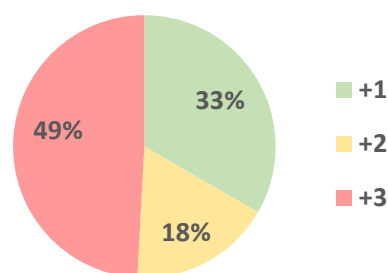


Figura 6.4 – Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio per le gambe durante l'attività di raccolta

Questi valori di rischio elevati si correlano direttamente alla necessità operativa di doversi piegare sulle gambe e flettere le ginocchia, un movimento cruciale per eseguire la raccolta dei rifiuti da appositi contenitori, come chiaramente illustrato in Figura 4.5. Tale postura, sebbene necessaria per la corretta esecuzione dell'attività, introduce un carico biomeccanico specifico sulle articolazioni delle gambe. La mancanza di considerazione di questo aspetto nel metodo RULA può sottostimare il rischio ergonomico associato a queste particolari fasi dell'attività lavorativa.

L'analisi dettagliata della postura delle gambe mediante il metodo REBA diventa, quindi, fondamentale per valutare in modo accurato e completo il rischio ergonomico. La presenza di punteggi di rischio significativamente elevati riflette la complessità biomeccanica e la richiesta di movimenti specifici durante la fase di raccolta dei rifiuti.

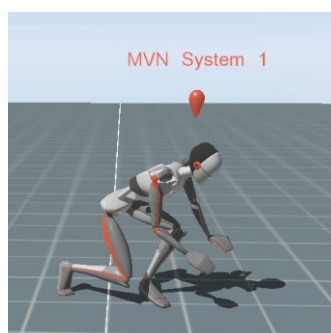


Figura 6.5 – Postura durante la raccolta

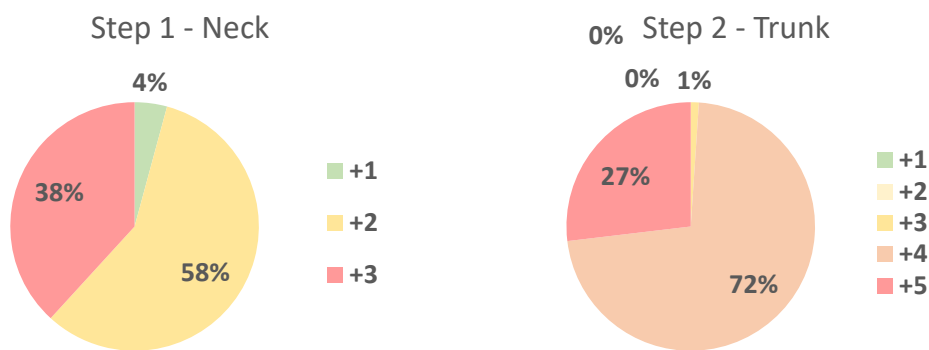


Figura 6.6 – Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio REBA per collo e dorso durante l'attività di raccolta

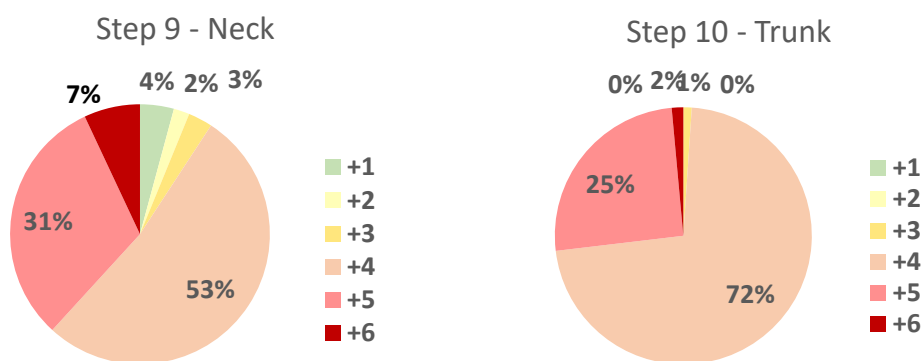


Figura 6.7 – Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio RULA per collo e schiena durante l'attività di raccolta

Sia per il collo (rischio elevato per il 38% della durata dell'attività) che per il dorso (rischio elevato per il 27% della durata dell'attività) i metodi RULA e REBA individuano un identico punteggio poiché si trattano i medesimi fattori di rischio nella trattazione di queste parti del corpo, con una differenza nelle scale di rischio e nei punteggi parziali. In Figura 6.6 e Figura 6.7 è possibile visualizzare questi risultati. Ciò vale anche per la parte superiore delle braccia e per le posizioni assunte dal polso, seppur il RULA approfondisce il punteggio del polso, rispetto al REBA, considerando anche la torsione.

Queste diverse considerazioni permettono di definire tale attività rischiosa per la salute degli operatori addetti, portando nel lungo termine la possibile insorgenza di problemi muscoloscheletrici.

6.1.2 Fase di lancio

Analogamente a quanto visto per l'attività precedente, in questo paragrafo saranno prese in esame le posture acquisite dall'operatore durante la fase di lancio dei RSU nel veicolo di trasporto, grazie all'acquisizione dei valori degli angoli articolari effettuata dal sistema Xsens MVN. Questi dati sono stati prelevati ed esportati nei fogli di calcolo Excel per sottoporli agli algoritmi in grado di calcolare in maniera automatizzata, gli indici RULA e REBA per ciascun frame in cui è suddivisa la durata totale dell'acquisizione, utili a determinare il livello di rischio.

Per l'intera durata dell'attività si riscontra un rischio medio-alto, ma se si osserva il rischio alto/molto alto rilevato per l'attività di raccolta risulta :

- Per il 42% della durata dell'attività (RULA), visualizzabile nella Tabella 6.4;

Tabella 6.4- % temporale dei livelli di rischio RULA per la fase di lancio

Complessivo RULA				
Punteggio complessivo	RIGHT		LEFT	
Negligible (1-2)	0	0.0%	0	0.0%
Low risk (3-4)	0.47	12.7%	0.47	12.7%
Medium risk (5-6)	1.67	45.2%	2.6	70.6%
Very high risk (7)	1.55	42.1%	0.62	16.7%
Tempo acquisizione (sec)	3.68		3.68	

- Per l'37% della durata delle attività (REBA), visualizzabile nella Tabella 6.5.

Tabella 6.5 - % temporale dei livelli di rischio REBA per la fase di lancio

Complessivo REBA				
Punteggio complessivo	RIGHT		LEFT	
Negligible (1)	0	0.0%	0	0.0%
Low risk (2-3)	0.2	5.4%	0.28	7.7%
Medium risk (4-7)	2.1	57.0%	3.28	89.1%
High risk (8-10)	1.38	37.6%	0.12	3.2%
Very high risk (11+)	0	0.0%	0	0.0%
Tempo acquisizione (sec)	3.68		3.68	

In questa attività dalla breve durata, il metodo REBA rileva un punteggio delle gambe che risulta essere congruo poiché l'operatore non compie movimenti o flessioni particolari delle ginocchia, mantenendo il carico stabilmente su entrambi gli arti inferiori, come riporta la Figura 6.8.

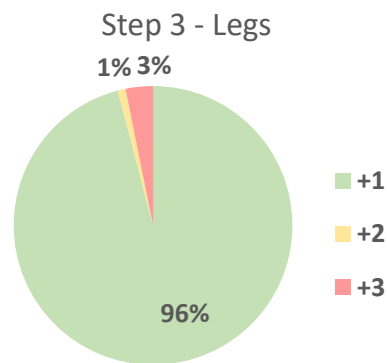


Figura 6.8 – Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio per le gambe durante l'attività di lancio

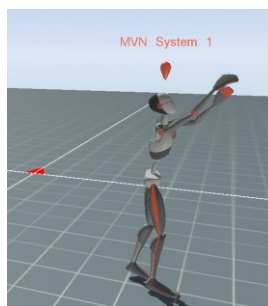


Figura 6.9 – Postura durante il lancio

Nella Figura 6.9 emerge chiaramente che durante questa fase dell'attività, è la parte superiore del corpo a subire un carico muscoloscheletrico non trascurabile. Questo fenomeno è attribuibile al movimento operativo richiesto, il quale implica una sollecitazione significativa della schiena e del collo. Inoltre, durante questa fase, è necessario mantenere le braccia sollevate per pochi istanti, con angoli di flessione delle spalle e gomiti elevati. I grafici successivi forniscono una visualizzazione dettagliata di tali elementi, confermando la natura impegnativa di questa parte specifica dell'attività, soprattutto se eseguita frequentemente come accade nella raccolta porta a porta.

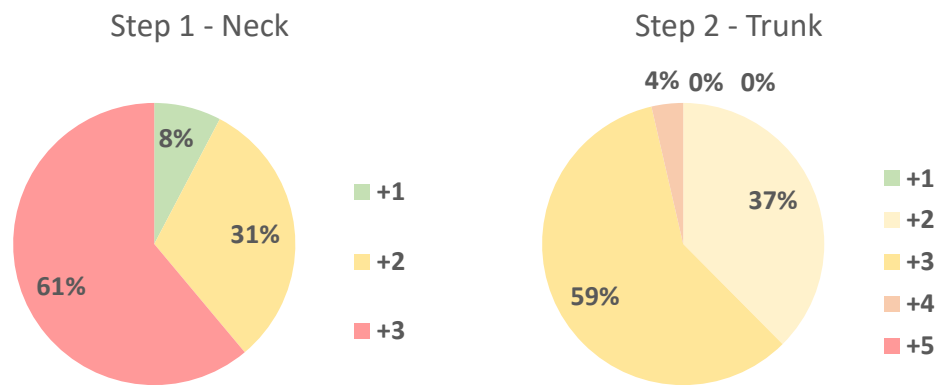


Figura 6.10 - Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio REBA per collo e dorso durante l'attività di lancio

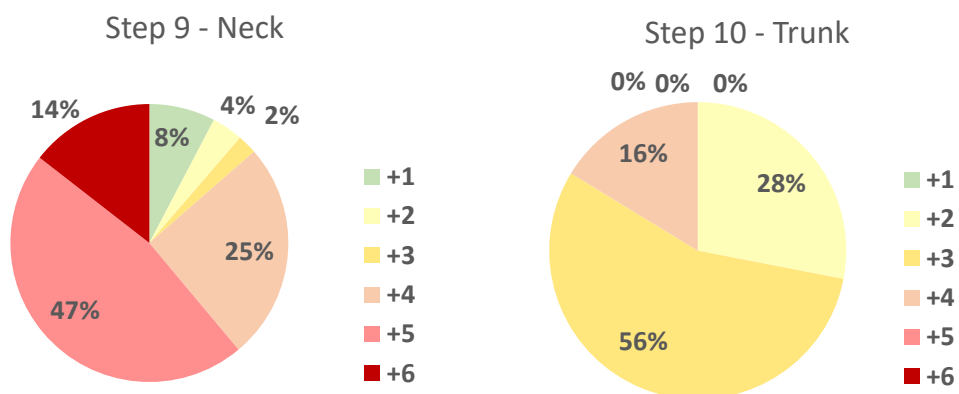


Figura 6.11 - Grafico a torta in cui si riportano i livelli di rischio RULA per collo e schiena durante l'attività di lancio

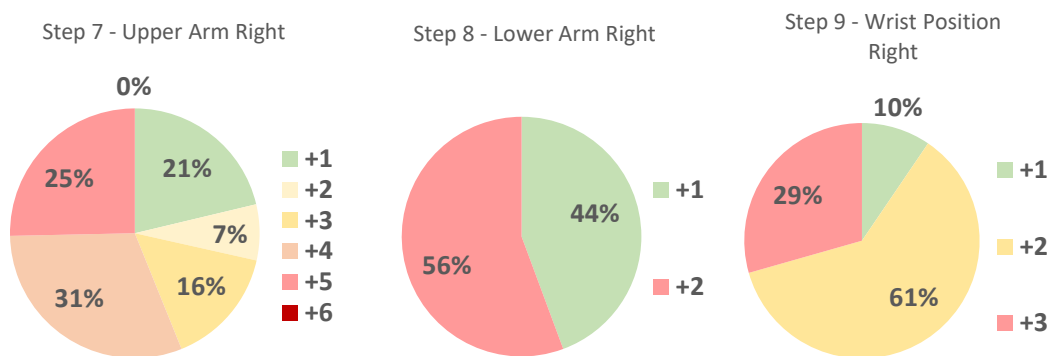


Figura 6.12 – Grafici a torta in cui si riportano i livelli di rischio RULA per braccio e polso (dx) durante l'attività di lancio

Data la breve durata dell'acquisizione, approssimativamente 4 secondi, l'analisi dei livelli di rischio rappresentati nei grafici a torta, relativi alla totalità dell'attività, evidenzia chiaramente che la fase di lancio, similmente a quella di raccolta, può contribuire significativamente ai disturbi muscoloscheletrici degli operatori addetti. Questo rischio è accentuato dalla natura ripetitiva di tali azioni durante l'intero turno di lavoro nel contesto della raccolta porta a porta. Per mitigare questo rischio, sarebbe auspicabile l'adozione di sistemi o dispositivi che consentano agli operatori di evitare posture pericolose e non ergonomiche durante queste attività, fornendo un adeguato supporto alle movimentazioni manuali di carichi.

7 Conclusioni

Nel corso di questo testo, sono state delineate le direttive ed esplorati quelli che sono gli strumenti essenziali per condurre uno studio accurato sulle modalità di lavoro e sulle posture adottate, con l'obiettivo primario di salvaguardare il benessere dell'operatore. Riconoscendo l'importanza cruciale del benessere del personale sulla produttività aziendale, è imperativo per le organizzazioni garantire che le postazioni di lavoro siano sicure e confortevoli. Questa assicurazione non solo contribuisce al benessere individuale, ma svolge un ruolo fondamentale nel facilitare e agevolare il lavoro, minimizzando al contempo rischi potenzialmente dannosi, infortuni e altri eventi indesiderati. La responsabilità dell'azienda nella promozione di un ambiente lavorativo sano e protetto rappresenta un investimento strategico, poiché il benessere degli operatori è strettamente connesso al successo e alla prosperità complessiva dell'organizzazione.

Proprio per tali ragioni, basandosi sulle conoscenze e sui numerosi studi disponibili in letteratura, la trattazione ha voluto condividere approfondimenti per facilitare un approccio con l'ergonomia fisica. Attraverso il primo studio sui sistemi OptiTrack e Xsens, è stato possibile mettere alla prova nello stesso momento due categorie di strumenti differenti. Mentre i sistemi di visione offrono una precisione ed un'accuratezza straordinarie nella cattura dei movimenti nello spazio, è emerso, attraverso il terzo capitolo, che tali prestazioni non sono costantemente garantite durante le acquisizioni. In particolare, sono stati evidenziati i difetti del sistema OptiTrack, tra cui la forte dipendenza da fattori come la calibrazione, la difficoltà nel mantenere la posizione fissa dei marker durante le acquisizioni e la necessità di un ambiente controllato. D'altra parte, il focus sui sistemi inerziali ha sottolineato la loro praticità e coerenza, seppur a scapito di una minore precisione. Questo confronto non solo ha contribuito a un'analisi

approfondita delle tecnologie in esame, ma ha anche evidenziato considerazioni cruciali per l'applicazione pratica. La comprensione di queste dinamiche offre un contributo significativo nel contesto dell'ergonomia fisica, poiché permette di adattare le scelte strumentali alle esigenze specifiche di ciascun contesto operativo. La consapevolezza dei punti di forza e delle sfide associate a diverse tecnologie facilita una decisione informata nell'implementazione di sistemi di monitoraggio ergonomico.

Nel proseguo della ricerca, si è focalizzato l'attenzione su due metodi di valutazione ergonomica, il metodo REBA e la checklist OCRA, entrambi basati sull'assegnazione di un indice di rischio. Attraverso uno studio approfondito delle procedure associate a ciascun metodo, è emersa la possibilità di automatizzare i calcoli necessari per determinare tali indici. Grazie all'integrazione dei dati provenienti dai sistemi di motion-capture, si è notevolmente migliorata l'efficienza di entrambi i metodi, riducendo il tasso di errori, ottimizzando i tempi di valutazione e conferendo maggiore oggettività all'intero processo. Questi algoritmi contribuiscono anche a promuovere la standardizzazione delle pratiche ergonomiche. L'automazione dei calcoli, insieme all'uso dei dati provenienti dai sistemi di motion-capture, crea una base solida per valutazioni ergonomiche più accurate, oggettive e uniformi.

Emerge chiaramente come l'impiego di questi strumenti di calcolo abbia esteso la propria utilità anche in contesti aziendali concreti, consentendo la verifica della loro validità. Attraverso queste applicazioni pratiche presso il plant produttivo di “Nuova Simonelli” e nell'analisi delle attività degli operatori ecologici di “Cosmari”, è stato possibile gestire in modo più efficace importanti aspetti all'interno dell'ambiente lavorativo. Le due sperimentazioni hanno rappresentato un momento cruciale per entrambe le realtà coinvolte. Per le aziende, i risultati di queste ricerche hanno aperto la strada a scenari

futuri, delineando opportunità per migliorare l'ergonomia fisica dei propri operatori e, di conseguenza, ottimizzare le attività svolte. Dall'altra parte, per noi, è stata un'occasione preziosa per mettere alla prova le nostre competenze in questo ambito, sottolineando l'importanza della collaborazione tra teoria e pratica nell'ambito dell'ergonomia applicata. Il coinvolgimento degli operatori e dei vari dipendenti di tali aziende ha facilitato la riuscita di questi studi sperimentali oltre ad impreziosire maggiormente l'esperienza con le proprie opinioni e pensieri.

8 Bibliografia e sitografia

- [1] U.S. Bureau of Labor Statistics, “LOST-WORKTIME INJURIES AND ILLNESSES: CHARACTERISTICS AND RESULTING DAYS AWAY FROM WORK, 2002”, 2004.
- [2] LIU L., CHEN S. G., TANG S. C., WANG S., HE L. H., GUO Z. H., LI J. Y., YU S. F., WANG Z. X. “How Work Organization Affects the Prevalence of WMSDs: A Case-control Study”. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2015. doi:10.3967/bes2015.088.
- [3] van der Windt DA, Thomas E, Pope DP, de Winter AF, Macfarlane GJ, Bouter LM, Silman AJ. “Occupational risk factors for shoulder pain: a systematic review”. *Occup Environ Med*. 2000. doi: 10.1136/oem.57.7.433.
- [4] European Agency for Safety and Health at Work, Kok, J., Vroonhof, P., Snijders, J. et al., “Work-related musculoskeletal disorders – Prevalence, costs and demographics in the EU”, *Publications Office*, 2019. doi: 10.2802/66947.
- [5] Eurofound, “Fifth European Working Conditions Survey”, *Publications Office of the European Union*, Luxembourg, 2012. doi: 10.2806/34660.
- [6] Parsons K.C., Shackel B., Metz B., “Ergonomics and international standards: History, organizational structure and method of development”, *Applied Ergonomics*, Volume 26, 1995. doi: 10.1016/0003-6870(95)00028-B.
- [7] International Organization of Standardization, ISO/TC 159 – Ergonomics, 1974.
- [8] Presidenza del Consiglio dei Ministri, DECRETO LEGISLATIVO 9 Aprile 2008, n.81.
- [9] International Organization of Standardization, ISO 11226:2000 Ergonomics — Evaluation of static working postures, 2000.

- [10] Joshi M., Deshpande V., “A systematic review of comparative studies on ergonomic assessment techniques”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 74, 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.102865.
- [11] David G.C., “Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders”, *Occupational Medicine*, Volume 55, 2005. doi: 10.1093/occmed/kqi082.
- [12] Takala E-P, Pehkonen I, Forsman M, Hansson G-Å, Mathiassen SE, Neumann WP, Sjøgaard G, Veiersted KB, Westgaard RH, Winkel J, “Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work”, 2009. doi:10.5271/sjweh.2876.
- [13] 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”, 2018. doi: 10.5271/sjweh.3746.
- [14] Bortolini M., Gamberi M., Pilati F., Regattieri A, “Automatic assessment of the ergonomic risk for manual manufacturing and assembly activities through optical motion capture technology”, *Procedia CIRP*, Volume 72, 2018. doi:10.1016/j.procir.2018.03.198.
- [15] McAtamney L., Hignett S., “Rapid Entire Body Assessment (REBA)”, *Applied Ergonomics*, Volume 31, 2000. doi: 10.1016/S0003-6870(99)00039-3.
- [16] Hita-Gutiérrez M, Gómez-Galán M, Díaz-Pérez M, Callejón-Ferre Á-J. “An Overview of REBA Method Applications in the World”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020. doi: 10.3390/ijerph17082635

- [17]Gòmez-Galàn M., Pèrez-Alonso J., Callejòn-Ferre A.J., Lòpez-Martinez J., “Musculoskeletal disorders: OWAS review”, *Industrial Health*, Volume 55, 2017. doi: 10.2486/indhealth.2016-0191
- [18]McAtamney L., Corlett E.N., “RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders”, *Applied Ergonomics*, Volume 24, 1993. doi:10.1016/0003-6870(93)90080-S
- [19]Madani D. A. & Dababneh A. “Rapid Entire Body Assessment: A Literature Review”. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016. doi:10.3844/ajeassp.2016.107.118
- [20]Muhamad Romi Firdaus & Taufik Roni Sahrani. “Analysis Workstation in Manufacturing Industry using Occupational Repetitive Action (OCRA) Index Method to Reduce Risk of Work-Related Musculoskeletal Disorder”, 2023. doi:10.1051/e3sconf/202342601080
- [21]Colombini D., Occhipinti E. “La valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico degli arti superiori con strumenti semplificati: la mini-checklist OCRA. Contenuti, campo applicativo e validazione”, *La Medicina del Lavoro*, 2011. doi: 10.23749/mdl.v102i1.768
- [22]J. Steven Moore & Arun Garg, “The Strain Index: A Proposed Method to Analyze Jobs For Risk of Distal Upper Extremity Disorders”, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1995. doi: 10.1080/15428119591016863
- [23]Reilly MJ, Wang L, Rosenman KD. “Evaluation of the characteristics of injured workers and employer compliance with OSHA's reporting requirement for work-related amputations”. *Am J Ind Med*, 2024. doi:10.1002/ajim.23560

- [24] T.R. Waters, S.L. Baron, K. Kemmlert, “Accuracy of measurements for the revised NIOSH lifting equation”, *Applied Ergonomics*, Volume 29, 1998. doi:10.1016/S0003-6870(98)00015-5
- [25] Stover H. Snook & Vincent M. Ciriello, “The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces”, *Ergonomics*, 1991. doi: 10.1080/00140139108964855
- [26] Marín J., Marín JJ. “Forces: A Motion Capture-Based Ergonomic Method for the Today’s World”, *Sensors*, 2021. doi:10.3390/s21155139
- [27] Rybníkář F., Kačerová I., Hořejší P., Šimon M. “Ergonomics Evaluation Using Motion Capture Technology—Literature Review”. *Applied Sciences*. 2023. doi:10.3390/app13010162
- [28] Yunus M.N.H., Jaafar M.H., Mohamed A.S.A., Azraai N.Z., Hossain M.S. “Implementation of Kinetic and Kinematic Variables in Ergonomic Risk Assessment Using Motion Capture Simulation: A Review”. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021. doi:10.3390/ijerph18168342
- [29] Stedmon A.W., Howells H., Wilson J.R., Dianat I. “Ergonomics/Human Factors Needs of an Ageing Workforce in the Manufacturing Sector”, *Health Promot Perspect*, 2012. doi:10.5681/hpp.2012.014
- [30] Fang Z., Woodford S., Senanayake D., Ackland D. “Conversion of Upper-Limb Inertial Measurement Unit Data to Joint Angles: A Systematic Review”. *Sensors*. 2023. doi:10.3390/s23146535
- [31] OptiTrack for Movement Sciences, <https://optitrack.com/applications/movement-sciences/>

- [32] J. Mišeikis, I. Brijačak, S. Yahyanejad, K. Glette, O. J. Elle and J. Torresen, "Two-Stage Transfer Learning for Heterogeneous Robot Detection and 3D Joint Position Estimation in a 2D Camera Image Using CNN," *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada, 2019. doi:10.1109/ICRA.2019.8794077
- [33] R. Estévez-García, J. Martín-Gutiérrez, S. Menéndez Mendoza, J. Rodríguez Marante, P. Chinea-Martín, O. Soto-Martín, M. Lodeiro-Santiago. "Open Data Motion Capture: MOCAP-ULL Database", *Procedia Computer Science*, Volume 75, 2015. doi: 10.1016/j.procs.2015.12.253
- [34] OptiTrack Documentation, <https://docs.optitrack.com/>
- [35] Xsens MTw Awinda: Miniature Wireless Inertial-Magnetic Motion Tracker for Highly Accurate 3D Kinematic Applications, https://www.xsens.com/hubfs/3446270/Downloads/Manuals/MTwAwinda_WhitePaper.pdf
- [36] Karatsidis A., Bellusci G., Schepers H.M., De Zee M., Andersen M.S., Veltink P.H. "Estimation of Ground Reaction Forces and Moments During Gait Using Only Inertial Motion Capture". *Sensors*. 2017. doi:10.3390/s17010075
- [37] Robert-Lachaine X., Mecheri H., Larue C. et al. "Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis." *Med Biol Eng Comput*, 2017. doi:10.1007/s11517-016-1537-2
- [38] Kee D. "Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021. doi: 10.1016/j.ergon.2021.103140
- [39] Cosmari MC, <https://www.cosmarimc.it/>

[40] INAIL - La sicurezza per gli operatori della raccolta dei rifiuti e dell'igiene urbana,
<https://www.inail.it/cs/internet/comunicazione/pubblicazioni/catalogo-generale/sicurezza-per-gli-operatori-della-raccolta-dei-rifiuti.html>