

Stefania Spada¹, Lidia Ghibaudo¹, Fabrizio Sessa¹, Luca Varetto⁵, Maria Pia Cavatorta⁴, Alessandro Baracco⁵, Maurizio Coggiola⁵, Canzio Romano⁵

Lo Human Model, uno strumento per la valutazione ergonomica preventiva dell'aspetto posturale

¹ Fiat Group Automobiles, Manufacturing Engineering - Ergonomics, Torino

² Fiat Group Automobiles, Manufacturing Engineering Southern Italy, Pomigliano d'Arco (NA)

³ Iveco SpA, Global Manufacturing - Manufacturing Engineering - Work Analysis, Torino

⁴ Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Politecnico di Torino

⁵ A.O.U. Città della Salute e della Scienza di Torino - Dipartimento di Scienze della Sanità Pubblica e Pediatriche dell'Università di Torino

RIASSUNTO. Il Decreto legislativo 81/08 richiede al datore di lavoro di progettare sistemi, metodi e strumenti di lavoro rispettando i principi ergonomici. Pertanto, risulta opportuno ed efficace utilizzare già in fase di progettazione strumenti di simulazione, in modo da verificare se l'insieme progettuale abbia le caratteristiche ergonomiche definite dalle normative vigenti. Lo strumento presentato in questo lavoro, una volta introdotto il genere e il percentile antropometrico dell'operatore, ne simula le posture assumibili durante l'esecuzione della mansione lavorativa. Lo strumento può esser utilizzato anche in fase di riprogettazione.

Parole chiave: simulazione, progettazione, ergonomia, posture, prevenzione, WMSDs.

ABSTRACT. D.Lgs. 81/08 requires the employer to design work systems, methods and tools in accordance to the ergonomic principles. In order to check the compliance of the design with current regulation, it is appropriate and effective to make use of simulation tools since the design phase. The paper describes a tool based on multi body approach. Once the gender and the anthropometric percentile of the worker have been specified, the tool simulates the postures that the worker is likely to assume during the execution of the work task. The tool can be used in the design as well as in the re-design phase, taking into account the different percentile of workers for a proper accommodation of the same.

Key words: simulation, design phase, ergonomics, postures, WMSDs.

Introduzione

La tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori è uno degli elementi centrali della progettazione dei sistemi di produzione. A questo proposito il D.Lgs. 81/2008, prescrivendo all'art. 15 le "Misure generali di tutela", afferma (alla lettera *d*) del primo comma) che il datore di lavoro deve assicurare "il rispetto dei principi ergonomici nell'organizzazione del lavoro, nella concezione dei posti di lavoro, nella scelta delle attrezzature e nella definizione dei metodi di lavoro e produzione, in particolare al fine di ridurre gli effetti sulla salute del lavoro monotono e di quello ripetitivo". In altri termini, il legislatore italiano richiede al datore di lavoro e, di riflesso, a chi su suo incarico progetta i sistemi di lavoro, di adottare metodologie e strumenti idonei a garantire che il lavoratore, nel momento in cui si troverà a svolgere concretamente la propria attività nel posto di lavoro, possa operare costantemente in condizioni ergonomicamente corrette.

Si tratta di un obiettivo estremamente impegnativo in quanto, seguendo ad esempio i principi enunciati dalla norma UNI EN ISO 6385, è necessario che il progettista sappia realizzare un binomio lavoratore-lavoro tale per cui vengano costantemente rispettate le capacità e le necessità di tutti gli addetti al posto di lavoro progettato. A questo fine risulta molto più conveniente – non solo dal punto di vista procedurale, ma anche da quello economico – utilizzare già in fase di progettazione strumenti robusti, in grado di consentire sia la progettazione di condizioni operative ergonomicamente corrette, sia di verificare costantemente, man mano che il progetto si evolve e cresce in complessità, che l'insieme progettuale mantenga le caratteristiche ergonomiche, sperimentando in virtuale l'efficacia di diverse soluzioni costruttive. È, d'altra parte, auspicabile che un simile strumento sia sufficientemente evoluto da poter essere utilizzato anche quando il progettista sia chiamato ad operare su postazioni di lavoro già esistenti, di cui si vogliono correggere le disergonomie: in tal modo è possibile realizzare percorsi di miglioramento delle condizioni di lavoro contemporaneamente rispettose del principio della massima efficacia e del bilancio costi-benefici.

In questo studio viene presentato uno strumento, denominato Human Model, che ha dimostrato di possedere caratteristiche idonee a rispondere alle esigenze sia dell'ergonomia progettuale, sia dell'ergonomia correttiva e che sembra rispondere alle domande recentemente poste dalla comunità scientifica rispetto alla efficacia preventiva dell'uso di strumenti virtuali in ambito progettuale (Savin 2012).

Materiali e metodi

Lo Human Model è uno strumento di simulazione per l'ergonomia fisica che supporta l'analisi ergonomica in fase di progettazione o riprogettazione delle postazioni di lavoro sia su linea di montaggio, sia individuali. Lo strumento si basa su un foglio elettronico realizzato in ambiente Microsoft Excel con il supporto del linguaggio di programmazione Visual Basic e risulta, pertanto, integrabile con altri programmi realizzati nello stesso ambiente. Questa scelta consente un'ampia diffusione dello strumento anche in realtà produttive di piccole dimensioni e, quindi, non in grado di acquistare strumenti progettuali complessi e costosi o che richiedono il supporto di strumenti ICT dedicati.

Il foglio di lavoro consente di movimentare un manichino virtuale 3D e dispone di funzionalità per la stima dei parametri posturali di un operatore in una postazione di lavoro.

Lo strumento si basa sulla modellazione *Multi Body* che ha l'obiettivo di studiare sistemi costituiti da più corpi collegati tra loro. La struttura del manichino, infatti, è una catena cinematica aperta costituita da segmenti rigidi (segmenti corporei), uniti da giunti caratterizzati da più gradi di libertà (articolazioni).

Il nodo principale, detto radice, è il nodo del bacino, tutti gli altri nodi sono nodi figli. Questo vuol dire che la rotazione imposta ad un nodo a monte si ripercuote su tutti i nodi a valle e, quindi, anche sui segmenti che li uniscono. Pertanto, le configurazioni assunte dagli arti superiori non influiscono sugli arti inferiori e viceversa.

Ogni nodo è caratterizzato da uno o più gradi di libertà: il bacino e la spalla sono rappresentati da giunti sferici e presentano 3 gradi di libertà, il gomito presenta 1 grado di libertà; ginocchio e caviglia non hanno gradi di libertà controllabili dall'utente.

I range articolari attualmente implementati nello Human Model provengono dalla letteratura: l'ampiezza massima è relativa al singolo giunto articolare (tabella I), pertanto non tiene conto dell'interazione tra i range articolari dei vari giunti.

Tabella I. Range articolari implementati nello strumento

	MIN	MAX
Piegamento sagittale tronco	-30	70
Rotazione tronco	-35	60
Piegamento laterale tronco	-40	40
Gomito	0	175
Angolo braccio spalla	-35	190
Rotazione braccio	-30	138

Lo strumento è stato sviluppato facendo riferimento ai principi delle norme EN 1005-4 e ISO 11226, che non riportano valori limiti per la movimentazione del gomito, ma chiedono che siano evitate le posizioni estreme del giunto articolare. Pertanto, non viene data una codifica semaforica dell'angolo assunto da tale giunto.

Per la postura, lo strumento prevede la possibilità di selezionare alcune configurazioni degli arti inferiori: seduto, accovacciato, eretto.

All'utente viene richiesto di inserire in ingresso al foglio di lavoro il genere ed il percentile antropometrico dell'operatore di riferimento, nonché le quote di lavoro. Il foglio di calcolo restituisce in uscita gli angoli assunti dai giunti del manichino 3D (figura 1) e la rappresentazione grafica della postura su tre viste (frontale, laterale e dall'alto).



Figura 1. Angoli considerati dallo strumento

L'utente può scegliere tra due approcci distinti di utilizzo:

1. Cinematica diretta: agendo direttamente con il cursore sui singoli giunti articolari, si dispone il manichino nella postura necessaria a raggiungere il punto di lavoro. Pertanto, lo strumento funziona sostanzialmente da goniometro, calcolando gli angoli assunti da ogni giunto per l'assunzione della postura desiderata.
2. Cinematica inversa: vengono inseriti nel foglio di lavoro i vincoli presenti nella postazione di lavoro (ostacoli, spazio di movimento ristretto, configurazioni degli arti inferiori...): il software in automatico posiziona il manichino nella postura necessaria a raggiungere il punto di lavoro. Pertanto, lo strumento calcola la postura più verosimile assunta dal manichino per raggiungere un determinato punto di lavoro e restituisce, come per la cinematica diretta, i valori degli angoli assunti da ogni giunto.

Per rendere lo strumento di facile e veloce utilizzo per il progettista, il manichino è stato realizzato soltanto con un braccio da movimentare: il braccio destro, inteso come "braccio di carico", dominante.

Inoltre, alcuni gradi di libertà potenzialmente importanti, come quelli della mano, non sono stati rappresentati: la mano è infatti rappresentata da un punto, realizzato in corrispondenza della linea di presa situata a circa metà del palmo.

Il manichino virtuale può dunque effettuare gran parte dei movimenti che l'operatore svolge durante le operazioni lavorative. L'obiettivo principale è di verificare già in fase di progettazione che il compito lavorativo non richieda di assumere posture incongrue.

Il valore degli angoli soglia dei segmenti corporei e la relativa valutazione semaforica sono coerenti con i valori riportati nella norma ISO 11226.

Volendo essere uno strumento di screening, l'indicazione sugli angoli assunti dai segmenti corporei non è legata al tempo di mantenimento della postura; ciò vuol dire che lo strumento segnala la presenza di posture incongrue anche se assunte istantaneamente.

Lo strumento risulta, quindi, utile nella progettazione di nuove postazioni, nonché nell'identificare i percentili per i quali un'operazione già pianificata non determina l'assunzione di posture incongrue. Questo tipo di analisi, suggerita da molti autori (2, 3, 4), può esser di supporto anche nella suddivisione dei compiti lavorativi.

Lo strumento consente all'utilizzatore di scegliere altri percentili indicati in letteratura per la progettazione per estremi (1°, 5°, 95° e 99° percentile), oltre al 75° percentile, indicato da alcuni Autori come misura più realistica del lavoratore medio (1).

Nella fase osservazionale, necessaria per verificare le indicazioni dello Human Model e l'effettiva criticità degli angoli assunti dai giunti articolari, la valutazione ergonomica della postazione di lavoro è stata eseguita con un metodo di screening a corpo intero.

Considerando l'importanza dell'aspetto posturale nell'analisi è stato scelto come strumento di *risk assessment* uno strumento che valuta il corpo in maniera globale, la Checklist di Torino (CdT), messa a punto dal Settore di Ergonomia del Dipartimento di Scienze della Sanità Pub-

blica e Pediatriche dell'Università di Torino. La Checklist di Torino è un metodo utile per un'analisi preliminare del rischio: il suo risultato semaforico suggerisce se proseguire la valutazione con metodi di livello I o II. Per una descrizione più dettagliata del metodo si rimanda a Baracco 2005 (5). Qui viene brevemente ricordato che la checklist è suddivisa in quattro sezioni (rachide cervicale, rachide dorso lombare, arti superiori ed arti inferiori) e fornisce un'indicazione generale sul rischio del corpo intero.

Caso studio e analisi dei risultati

Lo Human Model e la CdT sono stati utilizzati nella fase di riprogettazione di una postazione di lavoro in un'industria automobilistica che doveva essere adattata per una nuova produzione. La fase iniziale di analisi prevedeva l'utilizzo della postazione di lavoro preesistente senza modifiche di layout. L'analisi dettagliata delle attività degli operatori, con tale layout, ha evidenziato come rischio di maggiore entità il fattore posture. In questo contesto, pertanto, l'utilizzo dello Human Model e della CdT risulta di particolare interesse nella riprogettazione della postazione.

Al termine della task analysis sono state identificate sei mansioni da svolgere nella postazione di lavoro riadattata: per brevità, viene qui illustrata la sola attività di montaggio del "poggia piede laterale" sulla vettura.

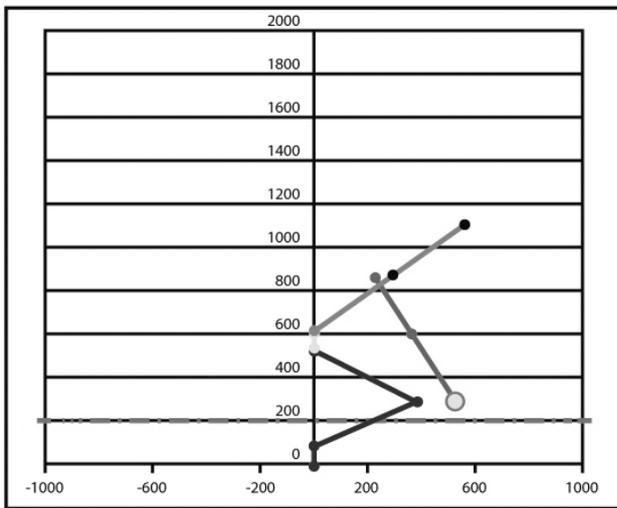
Sono state, innanzitutto, individuate le quote di lavoro: 300 mm in altezza (asse z) e 500 mm in distanza frontale (asse y) che l'operatore doveva raggiungere durante l'esecuzione della attività di montaggio del poggia piede laterale con il layout iniziale.

La postazione di lavoro originaria permetteva l'esecuzione del montaggio del poggia piede laterale sulla vettura unicamente con vettura a terra. Il poggia piede laterale veniva montato sul veicolo con avvitatura manuale. L'operazione richiedeva precisione per il collocamento delle viti: per analogia con una mansione simile, si è ipotizzata come probabile l'assunzione della postura accovacciata/inginocchiata da parte dell'operatore in quanto permette all'operatore maggiore equilibrio, stabilità e padronanza dell'attività manuale.

Le quote misurate ed il punto di lavoro relativi alla mansione sono stati introdotti come input nel foglio di lavoro dello Human Model, insieme al genere ed ai percentili di riferimento (1°, 5°, 50°, 75°, 95°, 99°) dell'operatore per cui si sono fatte le simulazioni. Per gli arti inferiori è stata selezionata, in base alle considerazioni precedenti, la postura accovacciata.

È stata poi selezionata la modalità di cinematica inversa per stimare i diversi angoli articolari (in figura 2 viene esemplificata la vista laterale).

La tabella II riporta i valori degli angoli assunti dai giunti simulando l'operazione di montaggio poggia piede laterale, con la vettura posizionata a terra, per i diversi percentili di riferimento. Lo strumento permette, selezionando la funzionalità "Valutazione ergonomica" di avere la codifica semaforica per gli angoli assunti dai giunti coerente con i limiti di accettabilità riportati nella norma EN 1005-4.



(b) laterale

Figura 2. Simulazione della postura per svolgere la mansione con macchina a terra (piano sagittale), 75° percentile

I dati sottolineano che, nella configurazione originaria con la vettura posizionata a terra, l’operazione di montaggio del poggia piede laterale risulta difficoltosa sia per un operatore appartenente ad un percentile piccolo sia per quelli appartenenti a percentili superiori. Infatti l’operazione richiede l’assunzione di posture incongrue in cui almeno un giunto articolare assume, anche solo istantaneamente, un angolo che, confrontato ai valori della normativa, ricade nella fascia di rischio rossa.

La simulazione segnala come criticità l’angolo braccio-spalla e la rotazione del tronco, che per gran parte dei percentili verrebbero ad assumere un valore doppio rispetto al limite consentito.

La rotazione del braccio, classificata nella fascia di rischio rossa per tutti i percentili, presenta un valore di confine tra la fascia di rischio rossa e gialla. Discorso analogo può essere fatto per il piegamento laterale del tronco, in particolare per i percentili piccoli.

Per la compilazione della CdT si è osservata l’operazione di montaggio poggia piede laterale svolta, nella postazione reale allestita, da un operatore corrispondente al 75° percentile maschile della popolazione europea. L’osservazione ha permesso di verificare la correttezza dell’ipotesi sulla postura degli arti inferiori.

I risultati ottenuti dalla compilazione della CdT sono riportati nella tabella III: la checklist qualifica l’attività come critica e pone indicazione ad un’analisi ergonomica approfondita del carico biomeccanico insistente sui comparti rachide cervicale, rachide dorso-lombare ed arti inferiori. La valutazione relativa al corpo intero, espressa dalla CdT, si colloca nella fascia di rischio intermedia.

Tabella III. Risultati della valutazione della mansione simulata dall’operatore, con macchina a terra, eseguita con la CdT

Sezioni CdT	INDICE	CUT OFF FASCIA VERDE (5)
Rachide cervicale	72	15
Rachide dorso-lombare	84	67.5
Arti superiori	36.5	50
Arti inferiori	48	15
Indice corpo intero	240.5	150

I risultati della CdT in termini di fascia semaforica del rischio (tabella III) sono stati confrontati con i risultati delle simulazioni dello Human Model espressi anch’essi in termini di fascia semaforica del rischio. Le simulazioni dello Human Model confrontate con i risultati osservazionali sono state quelle del 75 percentile maschile, percentile in cui rientra l’operatore a cui è stato chiesto di eseguire l’operazione di montaggio nella postazione simulata.

Dalla tabella riassuntiva (tabella IV) si evince che le criticità posturali evidenziate dalla simulazione con lo Human Model sono confermate dall’analisi osservazionale, sebbene la fascia di rischio in cui ricadono alcune sezioni corporee nella checklist risulti mitigata dal fattore tempo. Per esempio, se consideriamo le posture del tronco assunte dal gomito nella simulazione con lo Human Model, gli angoli assunti ricadono nella fascia semaforica di rischio rossa coerentemente con i valori della norma EN 1005/4. L’analisi della mansione con la CdT, nella postazione simulata, ha permesso di verificare che tali posture vengono assunte per un tempo inferiore al 35% del tempo ciclo a cui corrisponde un rischio del rachide dorso lombare ricadente nella fascia semaforica di rischio gialla secondo i cut off della CdT.

Tabella II. Angoli assunti dai giunti nella simulazione della mansione con macchina a terra per diversi percentili

	Poggia piede laterale - vettura a terra - accovacciato					
	1%	5%	50%	75%	95%	99%
Piegamento sagittale dei tronco	60	60	50	40	30	35
Rotazione tronco	25	25	25	25	10	10
Piegamento laterale tronco	20	20	20	20	18	15
Gomito	175	175	175	175	175	150
Angolo braccio spalla	105	100	85	85	60	40
Rotazione braccio	60	60	60	60	60	60

Tabella IV. Confronto dei risultati ottenuti con lo Human Model e con la CdT

Segmenti corporei	HM 75%	CdT Indice per comparto	CdT Indice corpo intero
Piegamento tronco in avanti		Rachide dorso lombare	
Rotazione tronco			
Piegamento laterale tronco			
Gomito		Arti superiori	
Angolo braccio spalla			
Rotazione braccio			

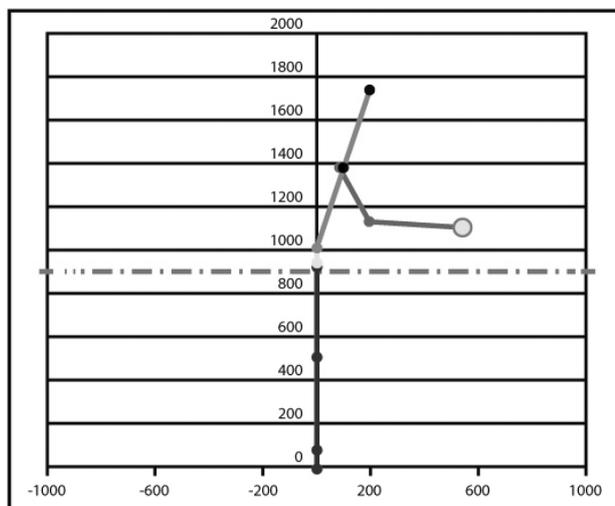
Gli arti inferiori, per i quali non sono riportate indicazioni in normativa, vengono collocati dalla CdT nella fascia di rischio rossa, a causa del mantenimento, per la quasi totalità del tempo ciclo, della postura accovacciata. La criticità di quest'aspetto è stato rilevato durante l'intervista all'operatore addetto alla mansione.

In una fase successiva, lo Human Model è stato utilizzato per valutare le soluzioni migliorative. L'analisi condotta sia in fase di simulazione sia in fase osservazionale aveva mostrato come l'assunzione di angoli critici da parte dei segmenti corporei fosse dovuta, principalmente, al posizionamento della vettura a terra.

Partendo dalle quote di lavoro relative alla vettura a terra e coerentemente alla normativa, sono state progettate le altezze di lavoro che permettano l'esecuzione della mansione limitando l'assunzione di posture incongrue per il maggior numero di operatori. Il confronto tra i risultati della simulazione e della valutazione con CdT permette di definire l'ordine di priorità negli interventi di progettazione da attuare in base al percentile utilizzato nella simulazione.

I valori ottenuti richiedono che la vettura sia sollevata da terra con l'ausilio di un macchinario (il sollevamento da terra della vettura porta il sottoscocca ad altezza 900 mm).

Assumendo le nuove quote di lavoro, è stata analizzata con lo Human Model la postura che l'operatore verrebbe ad assumere per eseguire l'attività. Il sollevamento della vettura da terra, consente al manichino l'assunzione di un atteggiamento posturale non critico come mostrato in figura 3.



(b) laterale

Figura 3. Simulazione della postura assunta per svolgere la mansione con macchina sollevata (piano sagittale)

La tabella V riporta i valori degli angoli assunti dai giunti simulando l'operazione di montaggio poggia piede laterale, con la vettura sollevata da terra, per i diversi percentili di riferimento.

È evidente che con la nuova configurazione l'operazione di montaggio del poggia piede laterale non risulta biomeccanicamente difficoltosa per gli operatori, indipendentemente dal percentile di riferimento. L'operazione, infatti, non richiede l'assunzione da parte dei giunti articolari di angoli incongrui se non per il giunto della spalla, valore che, confrontato ai valori della normativa, ricade nella fascia di rischio border-line.

Conclusioni

In questo contributo viene proposto e discusso uno strumento di analisi ergonomica virtuale adatto sia alla progettazione di nuovi posti di lavoro, sia alla riprogettazione di postazioni esistenti.

A scopo esemplificativo viene presentata una esperienza applicativa in cui l'analisi dettagliata delle nuove attività da svolgere nella postazione di lavoro da riadattare ha

Tabella V. Angoli assunti dai giunti nella simulazione della mansione con macchina sollevata per diversi percentili

	Poggia piede laterale - vettura sollevata					
	1%	5%	50%	75%	95%	99%
Piegamento tronco in avanti	25	25	15	5	5	10
Rotazione tronco	5	5	5	5	0	0
Piegamento laterale tronco	0	0	0	0	0	0
Gomito	100	100	115	115	125	145
Angolo braccio spalla	55	50	40	40	40	40
Rotazione braccio	15	15	15	15	15	15

evidenziato come rischio di maggiore entità il fattore posture. In questo contesto l'utilizzo dello Human Model come strumento di supporto alla progettazione ha permesso di simulare la postura che con maggior probabilità e più ragionevolmente l'operatore assume per svolgere l'attività in esame e di valutarla.

Lo strumento restituisce una schematizzazione della postura su tre viste e calcola gli angoli assunti dai principali segmenti corporei. Gli angoli assunti dai segmenti corporei sono poi stati analizzati con fascia semaforica in modo coerente con la normativa. Le simulazioni hanno messo in evidenza i segmenti corporei maggiormente critici dal punto di vista del sovraccarico biomeccanico. Dal momento che lo strumento non tiene in considerazione il fattore tempo, posture incongrue assunte anche solo istantaneamente vengono classificate nella fascia di rischio rossa.

A verifica delle indicazioni fornite dallo Human Model, le mansioni sono state analizzate con la CdT, strumento di analisi preliminare del rischio da sovraccarico biomeccanico, che permette di identificare le posture incongrue in relazione al fattore di esposizione rispetto al tempo ciclo.

I risultati ottenuti mostrano la correttezza di previsione dello Human Model.

Lo Human Model si è dimostrato utile come supporto per analizzare le proposte migliorative della postazione di lavoro. Nell'esempio proposto, simulando il sollevamento della vettura da terra, è stato possibile sia verificare la riduzione del rischio associato alla postura dei diversi

segmenti articolari, sia ottimizzare l'altezza da terra a cui posizionare la vettura.

In conclusione, gli Autori ritengono che l'utilizzo di strumenti di analisi ergonomica virtuale come lo Human Model rappresentino un solido strumento a disposizione dei progettisti e dei preventori aziendali chiamati a progettare o riprogettare postazioni di lavoro rispondenti ai principi ergonomici.

Bibliografia

- 1) Pheasant SE. Bodyspace: anthropometry, ergonomics and the design of work. London, Taylor and Francis Ed. 1996.
- 2) Apostoli P, Sala E, Gullino A, Romano C. Analisi comparata dell'applicazione di quattro metodi per la valutazione del rischio biomeccanico per l'arto superiore. *G Ital Med Lav Erg* 2004; 26:3, 223-241.
- 3) Sala E, Torri D, Apostoli P. Esperienze di applicazione della valutazione del rischio dalle Linee Guida SIMLII sul rischio biomeccanico per l'arto superiore. *G Ital Med Lav Erg* 2008; 30:3, Suppl, 20-25.
- 4) Sala E, Torri D, Tomasi C, Apostoli P. Stima del rischio da sovraccarico biomeccanico all'arto superiore condotta, con l'impiego di più metodi di analisi, in diversi settori manifatturieri. *G Ital Med Lav Erg* 2010; 32:2, 162-173.
- 5) Baracco A, Coggiola M, Perrelli F, Gullino A, Crusiglia Cabodi D, Di Cuia S, Pollone A, Zito D, Romano C. La Checklist di Torino: evoluzione di uno strumento olistico per la valutazione preliminare del rischio da sovraccarico biomeccanico del sistema muscolo-scheletrico. *G Ital Med Lav Erg* 2005, 31:3 (Suppl. 2): 408-ss.
- 6) Savin J. Apports et limites des modèles anthropométriques numériques pour l'évaluation ergonomique de postes de travail. Note documentaire 2012, ND 2353.

Corrispondenza: Dr. Alessandro Baracco, S.C.D.U. Medicina del Lavoro, A.O.U. Città della Salute e della Scienza di Torino, Presidio Ospedaliero C.T.O. - Via Zuretti, 29 - 10126 Torino, Italy, Tel. 011 6933 917 - Cell. 328 1076320, E-mail alessandro.baracco@unito.it