INAIL

2026

# PROCEDURA PER IL CALCOLO DELLA VELOCITÀ RELATIVA MASSIMA DI PARTI DI ROBOT INDUSTRIALI IN MODO CHE LE CONSEGUENZE DI CONTATTI TRANSITORI E QUASI-STATICI SIANO TOLLERABILI

## 1. INTRODUZIONE

Secondo l'art. 70 del d. lgs. 81/08 [1] è fatto obbligo al datore di lavoro di provvedere affinché le attrezzature di lavoro messe a disposizione dei lavoratori siano conformi alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto ad esse applicabili.
Tali attrezzature, che devono essere idonee ai fini della salute e sicurezza e adeguate al lavoro da svolgere o adattate a tali scopi, devono essere utilizzate conformemente alle disposizioni legislative di recepimento delle direttive comunitarie (art. 71, d. lgs. 81/08).
Le attrezzature di lavoro conformi alla Direttiva macchine (2006/42/EC, recepita con d. lgs. 17/2010, [2]) devono soddisfare i requisiti di sicurezza in essa riportati. Dopo il 14 gennaio 2027, la direttiva sarà abrogata e entrerà in vigore il nuovo Regolamento (UE) 2023/1230 [3] relativo alle macchine e tutti i riferimenti alla direttiva si intenderanno fatti al regolamento.
Nel seguito considereremo i *robot industriali* (che chiameremo, per brevità, soltanto *robot*). Questi sono macchine (o quasi macchine, finché non sono assemblati in una *cella di lavoro*) che normalmente sono progettati per non entrare in *contatto* con un essere umano, a meno di compiti particolari.
Le due norme EN ISO 10218-1 [4] e EN ISO 10218-2 [5] sono armonizzate alla direttiva e riportano i requisiti di sicurezza per i robot industriali. La EN ISO 10218-1 riguarda i costruttori, mentre la EN ISO 10218-2 interessa gli integratori delle celle.
Secondo tali norme, i robot industriali possono essere utilizzati per lo svolgimento di *attività collaborative*. Infatti, è permesso realizzare una cella di lavoro in cui sia possibile, tramite l'uso di opportune "*funzioni di sicurezza*", lo svolgimento di alcuni *compiti* in maniera *collaborativa*. Ciò in ragione del fatto che:

- le "*applicazioni robotiche*" sono suddivise in "*compiti*", secondo una sequenza volta a raggiungere la massima efficienza produttiva;
- alcuni di questi compiti, che prevedono un'interazione tra il robot e un operatore all'interno dello stesso "*spazio di lavoro collaborativo*", sono detti "*compiti collaborativi*".

Durante un compito collaborativo, per via della condivisione dello stesso *spazio di lavoro*, sussiste un pericolo residuo di contatto tra il robot e l'operatore: il rischio associato con tale pericolo varia a seconda dell'applicazione e dipende, in modo particolare, dalla velocità e dalle caratteristiche meccaniche (masse, momenti di inerzia, bordi taglienti, etc.) della parte del robot (incluso l'eventuale pezzo movimentato) che partecipa al contatto con l'operatore.
L'*integratore* della cella del robot deve effettuare una dettagliata individuazione dei pericoli e un'analisi dei rischi associati con la specifica attività per cui la cella sarà utilizzata. Poi, sulla base di tale analisi, sceglierà le misure di protezione e le funzioni di sicurezza da utilizzare al fine di ridurre la probabilità di occorrenza del pericolo o la severità delle conseguenze.
Attualmente le norme EN ISO 10218-1 e EN ISO 10218-2 definiscono tre funzioni di sicurezza dedicate (in grado di richiamare anche altre funzioni a carattere più generale) da utilizzare per garantire lo svolgimento in sicurezza delle attività collaborative. Una di queste è la funzione di "limitazione della pressione e della forza" (*Power and Force Limiting by design or control - PFL*):

- la funzione consente che si verifichino contatti tra parti del robot (incluso il pezzo in lavorazione) e parti del corpo dell'operatore;
- la riduzione del rischio può essere attuata per mezzo di sensori e sistemi di controllo che mantengano la pressione e/o la forza di contatto al di sotto di limiti biomeccanici predeterminati;
- la riduzione del rischio può anche essere ottenuta con un robot progettato per essere intrinsecamente sicuro, cioè con caratteristiche meccaniche e dinamiche che mantengano la pressione e/o la forza esercitate durante il contatto al di sotto dei limiti biomeccanici;
- con tale funzione attiva, tre tipi di eventi possono sfociare in un contatto:
  (a) eventi intenzionali: situazioni volute che sono parte della sequenza di lavoro;
  (b) eventi incidentali: eventi casuali (non intenzionali) dovuti a situazioni impreviste che si sono generate durante la procedura di lavoro (con esclusione dei guasti tecnici);
  (c) guasti tecnici: eventi di guasto che possono portare al contatto.

Nel seguito sarà presentato il metodo approssimato contenuto nella norma EN ISO 10218-2 [5] che, sulla base della massa del robot e della conoscenza preliminare della regione del corpo su cui avverrà l'impatto, permette di ricavare il valore massimo della velocità consentita al robot, per fare in modo che l'impatto non sia pericoloso. Sarà presentato anche un metodo di misura, ugualmente tratto dalla norma EN ISO 10218-2 [5], per ottenere valori delle pressioni e delle forze in gioco durante eventi di contatto con un modello simulato del corpo umano.
Entrambi i metodi possono essere usati per validare la valutazione dei rischi e per progettare la cella del robot per un'applicazioni che utilizzino la PFL come funzione di sicurezza.

## 2. LIMITAZIONE DELLA PRESSIONE E DELLA FORZA

Nel caso di una cella robotica realizzata per svolgere compiti collaborativi, la valutazione del rischio deve tenere conto di pericoli che di solito non sono presi in considerazione in una cella di lavoro tradizionale, dove il robot è protetto da barriere perimetrali. Questi pericoli nascono per la vicinanza e contiguità tra il robot e l'operatore, eventualità che accresce la possibilità di un contatto.

Per motivi di sicurezza ed economia, è importante progettare preventivamente il compito collaborativo prima di procedere con la sua realizzazione, in modo da comprendere le interazioni prevedibili e le possibili dinamiche di queste. Ciò è utile al fine della scelta dei sensori (per la rilevazione delle posizioni del robot e dell'operatore) e del sistema di controllo di sicurezza (che deve essere in grado di riconoscere le situazioni pericolose e deve inviare i giusti comandi agli attuatori al fine di evitarle o ridurne gli effetti avversi).

Come già ricordato, una delle funzioni utilizzate in alcuni tipi di compito collaborativo è la "*limitazione della pressione e della forza*". La limitazione della pressione e/o della forza di un possibile contatto tra una parte in movimento del sistema robotico (compreso il pezzo in lavorazione) e una parte del corpo di un operatore richiede un'accorta individuazione dei pericoli e analisi dei rischi (HRA - "*Hazard and Risk Analysis*"). I sistemi robotici che la utilizzano devono essere appositamente progettati proprio sulla base delle risultanze di tale analisi. Infatti, è possibile intervenire:

- con *misure passive*;
- con *misure attive*.

Le misure passive riguardano la progettazione meccanica e, a volte, sono riferite anche come "*design a sicurezza intrinseca*". Possono essere una o più delle seguenti misure:

- riduzione della massa del manipolatore e/o della sua velocità e/o della forza che può esercitare;
- adozione di superfici lisce e/o morbide, di spigoli e bordi arrotondati, di parti deformabili (deformazione degli angoli dei giunti del manipolatore o deformazione strutturale);
- prevenzione di qualsiasi evento di bloccaggio dell'operatore da parte del robot o possibilità di facile fuga da un simile evento.

Le misure attive riguardano la progettazione del "*sistema di controllo di sicurezza*" del sistema robotico, cioè di quella parte del sistema di controllo (costituita da una catena di sensori, logica di controllo e attuatori) che realizza la funzione di sicurezza PFL. Una tale progettazione potrebbe includere una o più delle seguenti caratteristiche:

- limitazione delle forze e/o delle coppie esercitate;
- limitazione della velocità della parte terminale del robot;
- uso di una funzione di arresto monitorato di sicurezza;
- uso di sensori per rilevare la prossimità tra manipolatore e operatore, al fine di ridurre le possibili forze di contatto.

## 3. TIPI DI CONTATTO

Nella HRA condotta dall'integratore della cella robotica è preferibile considerare tre tipi di possibili eventi di contatto fisico tra le parti del robot (compreso il pezzo in lavorazione) e le parti del corpo dell'operatore:

- situazioni previste (e volute) che fanno parte della sequenza di lavoro; o
- situazioni incidentali risultanti da situazioni di lavoro non previste (e non volute), non dovute a guasti tecnici, ma controllate dal sistema di controllo di sicurezza (o dalle misure di protezione); o
- guasti tecnici del sistema di controllo di sicurezza (o delle misure di protezione) che portano a contatti estremamente pericolosi, poiché l'operatore è inconsapevole e risulta completamente indifeso da parte del sistema di controllo di sicurezza (o delle misure di protezione).

Dal punto di vista della durata i possibili eventi precedentemente considerati sono riconducibili a due tipi:

- contatto quasi statico (*clamping* - schiacciamento/intrappolamento);
- contatto transitorio (*impact* - impatto/urto).

Durante un "*contatto quasi statico*", una parte del corpo di un operatore può rimanere schiacciata, bloccata o intrappolata tra una parte mobile del robot e un altro oggetto (ad es. una parte fissa della cella del robot). In questo caso, la pressione (o la forza) applicata alla parte del corpo intrappolata può durare a lungo prima che possa essere ripristinata una situazione di sicurezza per l'operatore.

Durante il "*contatto transitorio*" si assume che il corpo umano sia libero di muoversi e possa essere spinto nella direzione di moto della parte del robot. Il contatto genera un trasferimento di quantità di moto a causa dell'impulso della forza esercitata dal robot. L'operatore può indietreggiare o ritrarsi dal robot dopo l'impatto, senza rimanere bloccato o intrappolato, determinando così un contatto di breve durata.Tralasciando fattori soggettivi come la prontezza di riflessi dell'operatore o la sua forma fisica, la possibilità che un contatto transitorio possa dar luogo a danni per l'operatore dipende da fattori oggettivi quali: l'inerzia del robot, l'inerzia della parte del corpo dell'operatore interessata e la loro velocità relativa.

## 4. MODELLO DEL CORPO E LIMITI DI CONTATTO

La norma EN ISO 10218-2 [5] fornisce indicazioni, basate su un modello di contatto totalmente anelastico, ad uso degli integratori di sistemi robotici che intendono realizzare la funzione di sicurezza PFL.

Sono forniti i valori massimi della pressione e della forza per contatti quasi statici e per contatti transitori su diverse aree del corpo.

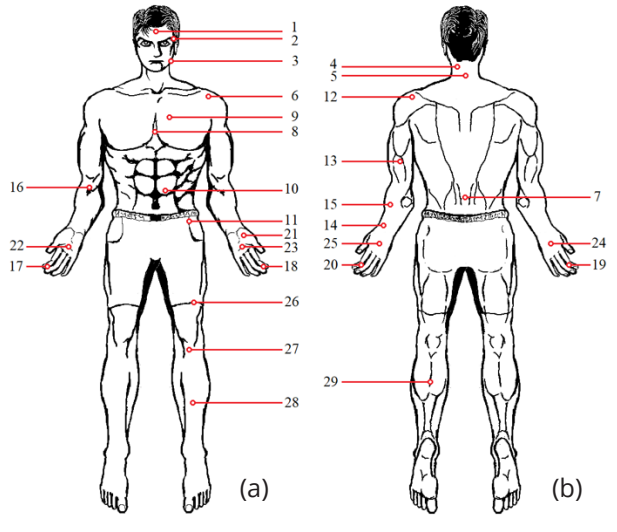
I valori massimi della pressione di contatto sono scelti in modo da non superare la soglia di sensibilità al dolore, mentre i valori massimi della forza di contatto sono scelti in modo da non superare i valori di soglia di lesione.

### 4.1. MODELLO DEL CORPO

Il primo obiettivo della Hazard and Risk Analysis è quello di determinare quali parti del corpo dell'operatore possono essere soggette a contatti con parti del robot. Questo è fondamentale, perché aree diverse del corpo hanno soglie diverse di sopportazione del carico biomeccanico prima che compaia la sensazione di dolore o si verifichino lesioni anche minori.

Per questo motivo, la norma EN ISO 10218-2 [5] considera un modello del corpo suddiviso in 29 *aree specifiche di contatto*, raccolte in 12 *regioni*. La Figura 1 mostra la distribuzione delle aree specifiche nel modello del corpo, mentre la Tabella 1 mostra i nomi delle regioni e delle aree.

**Figura 1** **Modello del corpo, con indicazione delle aree specifiche di contatto**




### 4.2. LIMITI DI CONTATTO

La norma EN ISO 10218-2 [5] fornisce valori limite di pressione e di forza di contatto (qui riportati nelle Tabelle 2.1 e 2.2). Tali valori sono stati indicati come valori di riferimento aventi lo scopo di impedire che il carico biomeccanico, dovuto al contatto con il robot, crei potenzialmente un rischio di superamento della soglia del dolore o un rischio di lesioni minori per l'operatore.

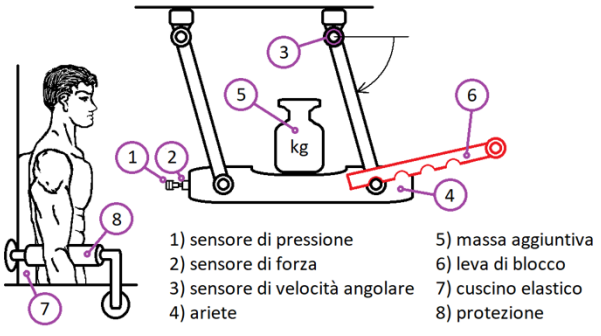
I valori limite di pressione $p_s$ per i contatti quasi statici (Tabella 2.1) sono il risultato dello studio [10] condotto dall'Università di Mainz sui livelli di insorgenza del dolore in caso di contatto tra essere umano e parti di macchine. Tali valori, che potrebbero essere aggiornati in futuro sulla base di ulteriori studi, sono stati ottenuti conducendo test su 100 soggetti adulti sani che si sono prestati come volontari. Per ciascuna delle 29 aree specifiche del corpo, di cui al modello di Figura 1, sono stati stabiliti i limiti di pressione per contatti quasi statici, valutando l'inizio delle soglie del dolore (quantità di pressione corrispondente all'inizio dell'insorgenza della sensazione di dolore). I valori di pressione indicati rappresentano la media al 75-esimo percentile dell'intervallo di valori registrati per quell'area specifica del corpo (con risoluzione pari a 1 mm$^2$). L'apparato di prova (Figura 2) era costituito da una superficie di prova metallica, piana (1,4 cm x 1,4 cm), con un raggio di curvatura di 2 mm su tutti e quattro i bordi, su cui era posizionato un sensore di pressione (Figura 3). Valori diversi potrebbero essere trovati utilizzando apparati di prova diversi.

**Tabella 1** **Denominazioni delle regioni e delle aree specifiche di contatto del modello del corpo secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | Area specifica del corpo | | Fig. 1 |
|---|---|---|---|
| Testa (cranio e fronte) | 1 | Centro della fronte | Vista (a) |
| | 2 | Tempia | Vista (a) |
| Volto | 3 | Muscolo masticatorio | Vista (a) |
| Collo | 4 | Muscolo del collo | Vista (b) |
| | 5 | Settima vertebra del collo | Vista (b) |
| Schiena e spalle | 6 | Articolazione della spalla | Vista (a) |
| | 7 | Quinta vertebra lombare | Vista (b) |
| Torace | 8 | Sterno | Vista (a) |
| | 9 | Muscolo pettorale | Vista (a) |
| Addome | 10 | Muscolo addominale | Vista (a) |
| Bacino | 11 | Osso pelvico | Vista (a) |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | 12 | Muscolo deltoide | Vista (b) |
| | 13 | Omero | Vista (b) |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | 14 | Osso radio | Vista (b) |
| | 15 | Muscolo dell'avambraccio | Vista (b) |
| | 16 | Nervo del braccio | Vista (a) |
| Mani e dita | 17 | Polpastrello indice D (a) | Vista (a) |
| | 18 | Polpastrello indice ND (a) | Vista (a) |
| | 19 | Giunto finale indice D (a) | Vista (b) |
| | 20 | Giunto finale indice ND (a) | Vista (b) |
| | 21 | Eminenza tenare | Vista (a) |
| | 22 | Palmo della mano D (a) | Vista (a) |
| | 23 | Palmo della mano ND (a) | Vista (a) |
| | 24 | Dorso della mano D (a) | Vista (b) |
| | 25 | Dorso della mano ND (a) | Vista (b) |
| Cosce e ginocchi | 26 | Muscolo della coscia | Vista (a) |
| | 27 | Rotula | Vista (a) |
| Parti inferiori delle gambe | 28 | Parte centrale dello stinco | Vista (a) |
| | 29 | Muscolo del polpaccio | Vista (b) |

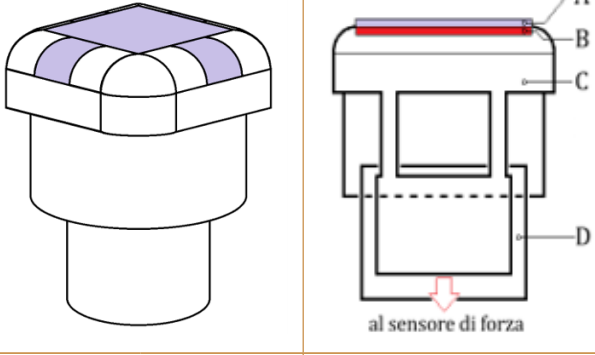
(a) D= parte dominante del corpo; ND= parte non dominante del corpo

**Figura 2** **Apparato di prova per la determinazione dei valori limite di pressione di contatto**




1) sensore di pressione
2) sensore di forza
3) sensore di velocità angolare
4) ariete
5) massa aggiuntiva
6) leva di blocco
7) cuscino elastico
8) protezione

**Figura 3** **Sensore di pressione per la determinazione dei valori limite di pressione di contatto**




**A:** tessuto di spessore ≤ 0,5 mm
**B:** sensore di pressione
**C:** struttura mobile
**D:** struttura fissa

I valori limite della forza $F_s$ per i contatti quasi statici (Tabella 2.1) sono il risultato di uno studio bibliografico, riferito a 188 fonti, condotto dal BG/BGIA (un'organizzazione operante nel settore della sicurezza del lavoro) e contenuto nel riferimento [7]. I valori di tale studio si riferiscono solo alle regioni del corpo e non alle aree specifiche. La forza limite considerata è la minima forza che potrebbe causare una lesione lieve come un livido [equivalente a una severità di 1 sulla scala delle lesioni "*Abbreviated Injury Scale*" (AIS) stabilita dall'*Association for the Advancement of Automobile Medicine* (AAAM) ad uso dei soccorsi in caso di incidenti automobilistici]. L'aderenza ai valori limite indicati serve ad impedire il verificarsi di penetrazioni cutanee o dei tessuti molli, accompagnate da ferite sanguinose, fratture o altri danni scheletrici. Tali valori potrebbero essere aggiornati in futuro sulla base di studi specifici sui robot utilizzati per applicazioni collaborative.
I valori limite della pressione ($p_t$) e della forza ($F_t$) per i contatti transitori (Tabella 2.2) sono stati stabiliti sulla base di alcuni studi ([7], [8], [9] e [12]) che indicano che tali valori possano essere almeno il doppio dei corrispondenti valori per contatti quasi statici, per questo nella Tabella 2.2 sono stati indicati i valori dei moltiplicatori $c_1$ e $c_2$ per ciascuna area specifica.

**Tabella 2.1** **Limiti biomeccanici secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | | Area specifica del corpo | Contatto quasi statico | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Press. limite $p_s$ [N/cm²] | Forza limite $F_s$ [N] |
| Testa (cranio e fronte) | 1 | Centro della fronte | 130 | 130 |
| | 2 | Tempia | 110 | |
| Viso | 3 | Muscolo masticatorio | 110 | 65 |
| Collo | 4 | Muscolo del collo | 140 | 150 |
| | 5 | Settima vertebra del collo | 210 | |
| Schiena e spalle | 6 | Articolazione della spalla | 160 | 210 |
| | 7 | Quinta vertebra lombare | 210 | |
| Petto | 8 | Sterno | 120 | 140 |
| | 9 | Muscolo pettorale | 170 | |
| Addome | 10 | Muscolo addominale | 140 | 110 |
| Bacino | 11 | Osso pelvico | 210 | 180 |
| Parti superiori braccia e articolazioni dei gomiti | 12 | Muscolo deltoide | 190 | 150 |
| | 13 | Omero | 220 | |
| Parti inferiori braccia e articolazioni dei polsi | 14 | Osso radio | 190 | 160 |
| | 15 | Muscolo dell'avambraccio | 180 | |
| | 16 | Nervo del braccio | 180 | |
| Mani e dita | 17 | Polpastrello indice D (ª) | 300 | 140 |
| | 18 | Polpastrello indice ND (ª) | 270 | |
| | 19 | Giunto finale indice D (ª) | 280 | |
| | 20 | Giunto finale indice ND (ª) | 220 | |
| | 21 | Eminenza tenare | 200 | |
| | 22 | Palmo della mano D (ª) | 260 | |
| | 23 | Palmo della mano ND (ª) | 260 | |
| | 24 | Dorso della mano D (ª) | 200 | |
| | 25 | Dorso della mano ND (ª) | 190 | |
| Cosce e ginocchi | 26 | Muscolo della coscia | 250 | 220 |
| | 27 | Rotula | 220 | |
| Parti inferiori delle gambe | 28 | Parte centrale dello stinco | 220 | 130 |
| | 29 | Muscolo del polpaccio | 210 | |

(ª) D=parte dominante del corpo; ND=parte non dominante del corpo

I valori indicati nelle Tabelle 2.1 e 2.2 non riflettono l'uso di dispositivi di protezione individuale o di qualsiasi altra cosa diversa dall'abbigliamento tipico di un normale ambiente di lavoro. Sebbene la Tabella 2.1 fornisca dati per il contatto con viso, cranio e fronte, il contatto con queste aree non è consentito.

**Tabella 2.2 Limiti biomeccanici secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | Area specifica del corpo | | Contatto transitorio | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Moltip. press. limite $p_t = c_1 \cdot p_s$ | Moltip. forza limite $F_t = c_2 \cdot F_s$ |
| Testa (cranio e fronte) | 1 | Centro della fronte | Non ap. | Non ap. |
| | 2 | Tempia | Non ap. | |
| Viso | 3 | Muscolo masticatorio | Non ap. | Non ap. |
| Collo | 4 | Muscolo del collo | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 5 | Settima vertebra del collo | $c_1$=2 | |
| Schiena e spalle | 6 | Articolazione della spalla | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 7 | Quinta vertebra lombare | $c_1$=2 | |
| Petto | 8 | Sterno | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 9 | Muscolo pettorale | $c_1$=2 | |
| Addome | 10 | Muscolo addominale | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| Bacino | 11 | Osso pelvico | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| Parti superiori braccia e articolazioni dei gomiti | 12 | Muscolo deltoide | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 13 | Omero | $c_1$=2 | |
| Parti inferiori braccia e articolazioni dei polsi | 14 | Osso radio | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 15 | Muscolo dell'avambraccio | $c_1$=2 | |
| | 16 | Nervo del braccio | $c_1$=2 | |
| Mani e dita | 17 | Polpastrello indice D (a) | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 18 | Polpastrello indice ND (a) | $c_1$=2 | |
| | 19 | Giunto finale indice D (a) | $c_1$=2 | |
| | 20 | Giunto finale indice ND (a) | $c_1$=2 | |
| | 21 | Eminenza tenare | $c_1$=2 | |
| Mani e dita | 22 | Palmo della mano D (a) | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 23 | Palmo della mano ND (a) | $c_1$=2 | |
| | 24 | Dorso della mano D (a) | $c_1$=2 | |
| | 25 | Dorso della mano ND (a) | $c_1$=2 | |
| Cosce e ginocchi | 26 | Muscolo della coscia | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 27 | Rotula | $c_1$=2 | |
| Parti inferiori delle gambe | 28 | Parte centrale dello stinco | $c_1$=2 | $c_2$=2 |
| | 29 | Muscolo del polpaccio | $c_1$=2 | |

(a) D=parte dominante del corpo; ND=parte non dominante del corpo

L'analisi dei pericoli e dei rischi (HRA) deve prendere in considerazione la possibilità di simili contatti, in modo che, per quanto ragionevolmente praticabile, la successiva scelta delle misure di protezione o il funzionamento desiderato della funzione di sicurezza PFL portino ad evitare il verificarsi di tali contatti. L'eventualità di contatti ripetuti sulla stessa area specifica non è stata presa in considerazione nella compilazione delle Tabelle 2.1 e 2.2.
Per la valutazione del rischio di contatto con un robot collaborativo, è necessario considerare sia i valori di pressione che quelli di forza. Ad esempio, in caso di ingresso nella zona di lavoro collaborativo, una parte del corpo dell'operatore potrebbe essere schiacciata tra il manipolatore (o l'end-effector o il pezzo lavorato) e una parte fissa della cella robotica. La forza che agisce durante lo schiacciamento potrebbe essere al di sotto dei limiti indicati nelle Tabelle 2.1 e 2.2, mentre potrebbe non essere così per la pressione esercitata, per via della ridotta superficie di contatto della parte del robot coinvolta.
Altre volte è l'area del corpo dell'operatore che può contribuire a far in modo che il limite di una delle due grandezze sia rispettato. Ad esempio, in una zona con tessuti molli (ad es. addome) è facile che i tessuti assorbano una parte dell'energia dell'urto e che la forza si ripartisca su una superficie ampia, portando ad una situazione favorevole al rispetto dei limiti della pressione di contatto.
Come altro esempio si può considerare un manipolatore con parti del braccio dotate di copertura in materiale elastico. La copertura può essere utilizzata per ottenere una maggiore superficie di contatto e per assorbire parte dell'energia dell'urto, entrambi fattori che riducono la pressione di contatto. In questo caso i limiti di pressione potrebbero essere rispettati, mentre quelli di forza potrebbero non esserlo.
Durante la valutazione del rischio occorre considerare anche il fatto che il contatto tra il corpo dell'operatore e parti rigide del sistema robotico può portare, in corrispondenza della superficie di contatto, ad una distribuzione non uniforme della pressione (picchi di pressione). In tali circostanze, la pressione di picco nell'area di contatto può facilmente superare i limiti delle Tabelle 2.1 e 2.2.
Picchi di pressione sono sicuramente possibili quando le superfici di contatto sono estremamente ridotte, come nel caso di spigoli vivi, lame o punte. Per questo si cerca di evitare che siano presenti sulle superfici del manipolatore, dell'end-effector e del pezzo lavorato, almeno fintantoché la lavorazione richieda la presenza dell'operatore all'interno della zona di lavoro collaborativo.

## 5. RELAZIONE TRA L'ENERGIA TRASFERITA E LA VELOCITÀ DEL ROBOT DURANTE UN CONTATTO TRANSITORIO

La norma EN ISO 10218-2 [5] fornisce un metodo per determinare i limiti di velocità di movimento del robot, in modo che eventuali contatti transitori con parti del corpo non diano luogo a superamento dei valori di soglia per la pressione e la forza di contatto.
L'energia trasferita durante un contatto transitorio tra una parte del robot e una parte del corpo di un essere

umano può essere stimata assumendo che tale urto avvenga in modo completamente anelastico, tenendo conto della massa del robot e della massa associata alla parte del corpo sottoposta a contatto. Una volta stabilita l'energia trasferita durante il contatto, è possibile determinare i limiti di velocità per il movimento del robot nello spazio di lavoro collaborativo, in modo che tale l'energia si mantenga al di sotto del valore che consentirebbe il superamento della soglia di dolore e/o di lesioni lievi per un essere umano. Per determinare simili valori di energia possono essere utilizzati i valori limite di pressione e forza ricavabili dalla Tabella 2.2, utilizzando i suoi coefficienti per moltiplicare i valori in Tabella 2.1.

La modellazione si basa sull'assunzione che l'urto avvenga in modo completamente anelastico, cioè che il robot e l'essere umano restino uniti dopo l'urto [Figura 5(b)]. Per ogni regione di contatto del corpo è possibile ricavare la dimensione dell'area di contatto (che da questa dipende). Sulla superficie del robot si assume che non siano presenti dispositivi in grado di assorbire energia, in modo che la differenza tra l'energia prima e dopo l'urto possa essere considerata come energia completamente trasferita al corpo dell'essere umano nella regione di contatto che è utilizzata per deformare i tessuti nei pressi dell'area di contatto. La quantità di energia trasferita può essere modificata regolando la velocità del robot prima del contatto. Il modello descritto è illustrato nella Figura 4, dove i simboli hanno il seguente significato:

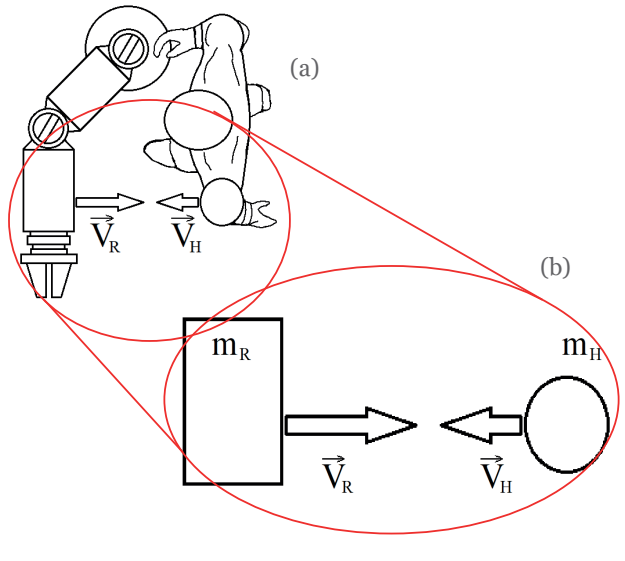
$m_R$ = massa della parte del robot che entra in contatto con l'essere umano;

$m_H$ = massa della regione del corpo umano che viene urtata dal robot;

$\vec{V}_R$ = velocità della parte del robot nel sistema di riferimento della cella;

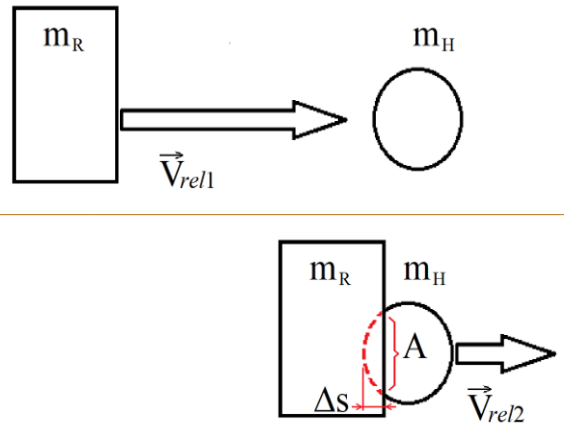
$\vec{V}_H$ = velocità della regione del corpo umano nel sistema di riferimento della cella.

**Figura 4** **Contatto tra robot ed essere umano**
**(a) situazione prima dell'urto**
**(b) particolare ingrandito**




La situazione prima dell'urto, per quanto riguarda un sistema di riferimento solidale con la cella del robot, è illustrata nella Figura 4(a) ed ingrandita nella Figura 4(b). La stessa situazione è mostrata nella Figura 5(a), per quanto riguarda un sistema di riferimento solidale con la parte del corpo umano che sta per subire l'urto.

**Figura 5** **Contatto tra robot ed essere umano nel sistema di riferimento dell'essere umano prima dell'urto**
**(a) situazione prima dell'urto**
**(b) situazione dopo l'urto**




Nella Figura 5(b) è mostrata la situazione dopo l'urto [nello stesso sistema di riferimento solidale col corpo umano prima dell'urto usato per la rappresentazione di Figura 5(a)]. Dopo l'urto i due corpi restano connessi come nel caso di un urto completamente anelastico. Questo è il caso peggiore che potrebbe verificarsi, in quanto tutta l'energia cinetica mancante è assorbita dal corpo umano ed utilizzata per deformare i tessuti. Il caso migliore è quello di un urto completamente elastico. Nella realtà può presentarsi un caso intermedio tra i due. L'analisi che segue sarà quella del caso peggiore. I simboli adottati in Figura 5 hanno il seguente significato:

$A$ = area della superficie di contatto tra la parte del robot e la regione del corpo umano;

$\Delta s$ = deformazione della parte del corpo umano in contatto con il robot immediatamente dopo l'urto;

$\vec{V}_{rel1}$ = velocità relativa del robot prima dell'urto, cioè velocità del robot nel sistema di riferimento solidale con il corpo umano nel suo moto prima dell'urto;

$\vec{V}_{rel2}$ = velocità relativa dopo l'urto, nel precedente sistema di riferimento.

Si assume che al momento dell'urto non intervengano forze esterne, pertanto vale la conservazione della quantità di moto e si può scrivere (per l'urto anelastico):

$$m_R\vec{V}_R + m_H\vec{V}_H = (m_R + m_H)\vec{V}_F$$

dove:

$\vec{V}_F$ = velocità finale dei due corpi dopo l'urto anelastico, nel sistema di riferimento della cella

Passando al sistema di riferimento solidale con il corpo umano, si può introdurre la velocità relativa del robot in tale sistema:

$$\vec{V}_{rel1} = (\vec{V}_R - \vec{V}_H)$$

e notare che:

$$\vec{V}_R = (\vec{V}_R - \vec{V}_H) + \vec{V}_H = \vec{V}_{rel1} + \vec{V}_H$$

Questa espressione può essere sostituita nell'equazione della conservazione della quantità di moto:

$$m_R(\vec{V}_{rel1} + \vec{V}_H) + m_H\vec{V}_H = (m_R + m_H)\vec{V}_F$$

Una volta raccolti i fattori comuni, quest'ultima diventa:

$$m_R\vec{V}_{rel1} = (m_R + m_H)(\vec{V}_F - \vec{V}_H)$$

che, a sua volta, può essere riscritta:

$$m_R\vec{V}_{rel1} = (m_R + m_H)\vec{V}_{rel2} \qquad (1)$$

dove è stata l'introdotta la velocità finale relativa, $\vec{V}_{rel2}$, cioè la velocità finale nel sistema di riferimento solidale con il corpo umano nel suo moto prima dell'urto:

$$\vec{V}_{rel2} = \vec{V}_F - \vec{V}_H$$

Dopo l'urto, la regione del corpo subisce una deformazione [che è indicata con $\Delta s$ in Figura 5(b)]. Se gli effetti dell'urto non causano lesioni gravi, la deformazione può essere modellizzata come una deformazione elastica per un opportuno valore della costante elastica ($k$) che caratterizza il tessuto interessato.
Le masse effettive delle regioni del corpo (ottenute, per un corpo umano di massa complessiva pari a 75 kg, dal riferimento [13]) e le costanti elastiche utilizzate per rappresentare la risposta elastica delle superfici di contatto in tali regioni, valide per aree di contatto di circa 1 cm$^2$, sono elencate nella Tabella 3 ([5]).
I valori delle costanti elastiche sono più bassi nelle regioni del corpo umano con una percentuale maggiore di tessuto molle, che può deformarsi e assorbire parte dell'energia cinetica durante i contatti.
I valori di massa effettiva indicati nella Tabella 3 rappresentano un compromesso che tiene conto della massa della regione di interesse e della sua inerzia, dovuta al fatto che tale regione non è completamente libera di muoversi in quanto è interconnessa con le regioni del corpo adiacenti.
Ad esempio, per quanto riguarda le gambe, se l'essere umano è in piedi e queste vengono colpite, esse non possono muoversi (nella direzione della velocità relativa finale dopo l'urto) indipendentemente dalla parte superiore del corpo, che sarà trascinata con esse (per questo nelle ultime due righe della Tabella 3 è indicata la massa complessiva del corpo).

**Tabella 3 Masse effettive e costanti elastiche per il modello del corpo umano da 75 kg, secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | Costante elastica $k$ [N/mm] | Massa effettiva $m_H$ [kg] |
|---|---|---|
| Testa (cranio e fronte) | 150 | 4,4 |
| Viso | 75 | 4,4 |
| Collo | 50 | 1,2 |
| Schiena e spalle | 35 | 40,0 |
| Petto | 25 | 40,0 |
| Addome | 10 | 40,0 |
| Bacino | 25 | 40,0 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | 30 | 3,0 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | 40 | 2,0 |
| Mani e dita | 75 | 0,6 |
| Cosce e ginocchi | 50 | 75,0 |
| Parti inferiori delle gambe | 60 | 75,0 |

I valori di massa per "Cosce e ginocchi" e "Parti inferiori delle gambe" corrispondono alla massa complessiva del corpo, poiché, in caso di impatto mentre l'operatore è in piedi, queste parti non sono libere di retrocedere o indietreggiare liberamente.

L'energia elastica immagazzinata nella regione del corpo quando la deformazione raggiunge il valore $\Delta s$ è:

$$\Delta E = \frac{1}{2}\, k\, \Delta s^2$$

La forza elastica (il cui modulo è $k\Delta s$) equilibra la forza transitoria che causa la deformazione (il cui modulo è $F_t$)

$$F_t = k\, \Delta s$$

Sostituendo quest'ultima espressione nella formula dell'energia elastica si ha:

$$\Delta E = \frac{1}{2}\frac{F_t^{\,2}}{k} \qquad (2)$$

Si ha anche l'espressione:

$$\Delta E = \frac{1}{2}\frac{(p_t\, A)^2}{k} \qquad (3)$$

ottenibile ricordando che forza e pressione sono legate dalla relazione:

$$F_t = p_t\, A$$

L'applicazione della formula (2), con i valori di forza limite per contatti transitori riportati nelle Tabelle 2.1 e 2.2, consente di ottenere i valori limite di energia trasferibile a ciascuna regione del corpo prima del verificarsi di una lesione lieve riportati nella Tabella 4.

**Tabella 4** **Valori limite di energia trasferibile, confronto tra i valori calcolati con la (2) e quelli indicati nella EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | Energia limite trasferibile calcolata con la (2) $\Delta E$ [J] | Energia limite trasferibile secondo la EN ISO 10218-2 $\Delta E$ [J] | |
|---|---|---|---|
| Testa (cranio e fronte) | 0,225 | 0,23 | (a) |
| Viso | 0,113 | 0,11 | (a) |
| Collo | 0,9 | 0,84 | (b) |
| Schiena e spalle | 2,52 | 2,5 | (a) |
| Petto | 1,568 | 1,6 | (a) |
| Addome | 2,42 | 2,4 | (a) |
| Bacino | 2,592 | 2,6 | (a) |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | 1,5 | 1,5 | |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | 1,28 | 1,3 | (a) |
| Mani e dita | 0,523 | 0,49 | (b) |
| Cosce e ginocchi | 1,936 | 1,9 | (a) |
| Parti inferiori delle gambe | 0,563 | 0,52 | (b) |

(a) valore ottenuto arrotondando il valore calcolato
(b) valore ottenuto arrotondando il valore calcolato dopo averlo ridotto del 7% (ulteriore margine di sicurezza)

L'energia cinetica prima dell'urto è:

$$E_1 = \frac{1}{2}m_R\left|\vec{V}_R\right|^2 + \frac{1}{2}m_H\left|\vec{V}_H\right|^2 =$$
$$= \frac{1}{2}m_R\left|\vec{V}_{rel1} + \vec{V}_H\right|^2 + \frac{1}{2}m_H\left|\vec{V}_H\right|^2 =$$
$$= \frac{1}{2}m_R({V_{rel1}}^2 + 2\vec{V}_{rel1}\cdot\vec{V}_H + {V_H}^2) + \frac{1}{2}m_H{V_H}^2 =$$
$$= \frac{1}{2}m_R{V_{rel1}}^2 + m_R\vec{V}_{rel1}\cdot\vec{V}_H + \frac{1}{2}(m_R + m_H){V_H}^2$$

L'energia cinetica dopo l'urto è:

$$E_2 = \frac{1}{2}(m_R+m_H)\left|\vec{V}_F\right|^2 = \frac{1}{2}(m_R + m_H)\left|\vec{V}_{rel2} + \vec{V}_H\right|^2 =$$
$$= \frac{1}{2}(m_R + m_H)({V_{rel2}}^2 + 2\vec{V}_{rel2}\cdot\vec{V}_H + {V_H}^2) =$$
$$= \frac{1}{2}\frac{{m_R}^2}{(m_R + m_H)}{V_{rel1}}^2 + m_R\vec{V}_{rel1}\cdot\vec{V}_H + \frac{1}{2}(m_R + m_H){V_H}^2$$

Nell'ultimo passaggio è stata sfruttata la relazione (1), precedentemente trovata, tra $\vec{V}_{rel1}$ e $\vec{V}_{rel2}$:

$$\vec{V}_{rel2} = \frac{m_R}{(m_R + m_H)}\vec{V}_{rel1}$$

La differenza tra l'energia cinetica prima dell'urto e l'energia cinetica dopo l'urto costituisce la quantità di energia sottratta all'energia cinetica iniziale e immagazzinata dai tessuti elastici del corpo:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{1}{2}m_R{V_{rel1}}^2 - \frac{1}{2}\frac{{m_R}^2}{(m_R + m_H)}{V_{rel1}}^2 =$$
$$= \frac{1}{2}\frac{m_R m_H}{(m_R + m_H)}{V_{rel1}}^2 = \frac{1}{2}\mu{V_{rel1}}^2 \qquad (4)$$

Nella precedente espressione è stato introdotto il seguente simbolo:

$$\mu = \frac{m_R m_H}{(m_R + m_H)} = \left(\frac{1}{m_R} + \frac{1}{m_H}\right)^{-1}$$

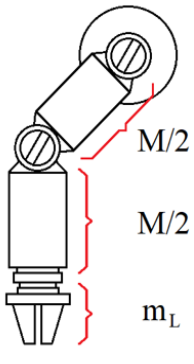
I valori di $\mu$ possono essere calcolati una volta noti i valori delle due masse $m_R$ ed $m_H$. In particolare, la norma EN ISO 10218-2 [5] adotta il modello di robot, con braccio a due segmenti, riportato nella Figura 6, dove:

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L$$

$M$ = massa complessiva dei due segmenti di uguale massa costituenti il braccio del robot;

$m_L$ = massa complessiva del carico trasportato dal braccio del robot (end-effector e pezzo in lavorazione).

**Figura 6** **Modello di robot considerato nei calcoli**




I valori di $m_L$ e $M$ possono essere trovati nelle informazioni per l'uso.
Una volta stabilito il valore limite di energia trasferibile ad una regione del corpo umano prima che in tale regione possa comparire una lesione lieve (Tabella 4), si può utilizzare tale valore per identificare la velocità limite (relativa) a cui far muovere il robot all'interno dello spazio di lavoro collaborativo.
A tale scopo si possono eguagliare le formule (2) e (4), oppure (3) e (4), ottenendo rispettivamente le seguenti espressioni:

$$V_{rel1} = \frac{F_t}{\sqrt{\mu k}} \qquad (5)$$

$$V_{rel1} = \frac{p_t A}{\sqrt{\mu k}} \qquad (6)$$

Per applicare le formule (5) e (6), occorre calcolare innanzitutto il coefficiente $\mu$ in base ai valori delle masse $m_R$ ed $m_H$, quindi determinare $p_t$ ed $F_t$, in base ai valori contenuti in Tabella 2.2, infine determinare $k$, in base ai valori contenuti nella Tabella 3.
L'area di contatto $A$ è definita come la più piccola tra le superfici di contatto del robot (includendo l'end-effector e/o il pezzo lavorato) o del corpo. In situazioni in cui la superficie di contatto del corpo è più piccola della superficie di contatto del robot, come nel caso delle mani o delle dita, deve essere utilizzato il valore della superficie di contatto del corpo. Se il contatto avviene coinvolgendo più regioni del corpo con diverse aree di contatto potenziali, deve essere utilizzato il valore di $A$ che produce il valore di velocità $\vec{V}_{rel}$ più basso.
Nella Tabella 5 sono riportati i valori limite di velocità, espressi in mm/s, per contatti transitori non vincolati, secondo la norma EN ISO 10218-2 [5], assumendo per l'area di contatto un valore di 1 cm$^2$.

**Tabella 5** — **Valori limite di velocità per i contatti transitori secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo ↓ | $m_R \rightarrow$ | Limite di velocità in funzione della massa effettiva del robot, basato sui limiti di pressione su un'area di 1 cm$^2$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Mani e dita | | 2400 | 2200 | 2000 | 2000 | 2000 | 1900 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | | 2200 | 1800 | 1500 | 1400 | 1400 | 1300 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | | 2400 | 1900 | 1500 | 1400 | 1300 | 1300 |
| Addome | | 2900 | 2100 | 1400 | 1000 | 870 | 780 |
| Bacino | | 2700 | 1900 | 1300 | 930 | 800 | 720 |
| Cosce e ginocchi | | 2000 | 1400 | 920 | 670 | 560 | 500 |
| Parti inferiori delle gambe | | 1700 | 1200 | 800 | 580 | 490 | 440 |
| Schiena e spalle | | 1700 | 1200 | 790 | 590 | 500 | 450 |
| Petto | | 1500 | 1100 | 700 | 520 | 440 | 400 |

Nella Tabella 6 sono riportati i valori limite di velocità, in mm/s, per contatti transitori non vincolati, derivati utilizzando la formula (6) e i valori in Tabella 2.2, per un valore di area di contatto di 1 cm$^2$. Tali valori, opportunamente "arrotondati", sono alla base dei valori contenuti nella Tabella 5.
Nella Tabella 7 sono riportati i valori limite di velocità, in mm/s, per contatti transitori non vincolati, derivati utilizzando la formula (5) e i valori in Tabella 2.2.
Nella Tabella 8 sono riportati i valori limite di velocità, in mm/s, ottenuti prendendo i minimi tra i valori corrispondenti delle tre Tabelle 5, 6 e 7.

I grafici dei valori limite di velocità riportati nella Tabella 8 sono mostrati nella Figura 7.

**Tabella 6** — **Valori limite di velocità per i contatti transitori calcolati in base alla (6)**

| Regione del corpo ↓ | $m_R \rightarrow$ | Limite di velocità in funzione della massa effettiva del robot, basato sui limiti di pressione $p_t$ di cui alla Tabella 2.2 su un'area di 1 cm$^2$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Mani e dita | | 2385 | 2150 | 1996 | 1941 | 1923 | 1914 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | | 2205 | 1800 | 1506 | 1394 | 1355 | 1335 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | | 2533 | 2003 | 1602 | 1444 | 1388 | 1358 |
| Addome | | 2835 | 2028 | 1328 | 990 | 848 | 767 |
| Bacino | | 2689 | 1925 | 1260 | 939 | 804 | 727 |
| Cosce e ginocchi | | 1981 | 1410 | 909 | 662 | 557 | 495 |
| Parti inferiori delle gambe | | 1726 | 1228 | 792 | 577 | 485 | 431 |
| Schiena e spalle | | 1732 | 1239 | 811 | 605 | 518 | 468 |
| Petto | | 1537 | 1100 | 720 | 537 | 460 | 416 |

**Tabella 7** — **Valori limite di velocità per i contatti transitori calcolati in base alla (5)**

| Regione del corpo ↓ | $m_R \rightarrow$ | Limite di velocità in funzione della massa effettiva del robot, basato sui limiti di forza $F_t$ di cui alla Tabella 2.2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Mani e dita | | 1670 | 1505 | 1397 | 1359 | 1346 | 1340 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | | 1960 | 1600 | 1339 | 1239 | 1204 | 1187 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | | 2000 | 1581 | 1265 | 1140 | 1095 | 1072 |
| Addome | | 2227 | 1594 | 1044 | 778 | 666 | 602 |
| Bacino | | 2305 | 1650 | 1080 | 805 | 689 | 624 |
| Cosce e ginocchi | | 1981 | 1410 | 909 | 662 | 557 | 495 |
| Parti inferiori delle gambe | | 1068 | 760 | 490 | 357 | 300 | 267 |
| Schiena e spalle | | 2273 | 1627 | 1065 | 794 | 680 | 615 |
| Petto | | 1793 | 1283 | 840 | 626 | 536 | 485 |

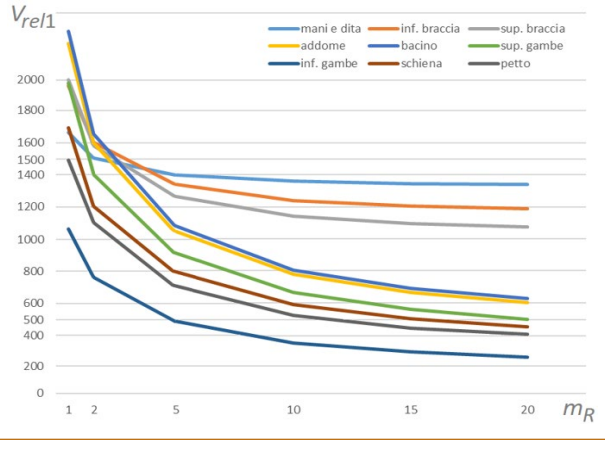
**Tabella 8** Valori limite di velocità per i contatti transitori ottenuti prendendo i minimi tra i valori delle tabelle 5, 6 e 7

| Regione del corpo ↓ | $m_R \rightarrow$ | Limite di velocità in funzione della massa effettiva del robot, minimi tra i valori delle Tabelle 5, 6 e 7 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Mani e dita | | 1670 | 1505 | 1397 | 1359 | 1346 | 1340 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni dei polsi | | 1960 | 1600 | 1339 | 1239 | 1204 | 1187 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni dei gomiti | | 2000 | 1581 | 1265 | 1140 | 1095 | 1072 |
| Addome | | 2227 | 1594 | 1044 | 778 | 666 | 602 |
| Bacino | | 2305 | 1650 | 1080 | 805 | 689 | 624 |
| Cosce e ginocchi | | 1981 | 1400 | 909 | 662 | 557 | 495 |
| Parti inferiori delle gambe | | 1068 | 760 | 490 | 357 | 300 | 267 |
| Schiena e spalle | | 1700 | 1200 | 790 | 590 | 500 | 450 |
| Petto | | 1500 | 1100 | 700 | 520 | 440 | 400 |

Valori tratti dalla Tabella 5
Valori tratti dalla Tabella 7

In pratica, i valori limite di velocità della norma EN ISO 10218-2 [5] (qui riportati nella Tabella 5) sono da considerare esempi utili per illustrare il ragionamento da seguire (infatti, si trovano in un allegato informativo, non mandatorio, della norma). Per ogni cella robotica in cui si progetta di svolgere attività collaborativa è necessario condurre una valutazione del rischio (HRA) utilizzando ragionamenti simili a quelli qui illustrati, adattandoli ai valori effettivi dei parametri e alla geometria specifica (ad esempio: braccio robotico con più di due segmenti, con segmenti di massa diversa, ecc.), in modo da determinare se la cella robotica soddisfi gli obiettivi di sicurezza desiderati.

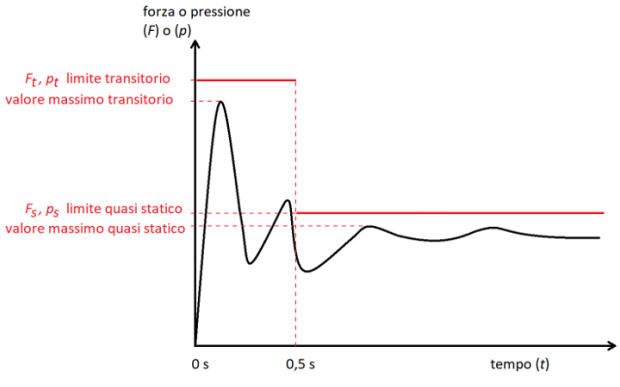
**Figura 7** Rappresentazione grafica dei valori limite di velocità di cui alla Tabella 8




## 6. MODO DI PROCEDERE NEL CASO DI CONTATTO QUASI STATICO

Nei casi in cui il contatto è destinato a divenire quasi statico, vi è un picco iniziale transitorio di forza e di pressione, per un periodo di tempo molto breve, poi il trasferimento di energia tra $m_R$ ed $m_H$ giunge all'equilibrio con la prosecuzione dello schiacciamento e la forza e la pressione raggiungono i valori di regime (Figura 8 - il transitorio si considera esaurito dopo 0,5 *s*).

**Figura 8** Rappresentazione grafica dell'andamento nel tempo della forza o della pressione di contatto




Se la forza iniziale o il picco di pressione iniziale possono essere misurati attraverso una strumentazione in grado di distinguere la forza (o la pressione) iniziale dalla forza (o dalla pressione) di regime, allora sono i valori di picco iniziali che devono essere confrontati, durante la valutazione dei rischi (HRA), con i valori limite per contatti transitori contenuti nella Tabella 2.2.
La norma EN ISO 10218-2 [5] suggerisce questo modo di procedere poiché il limite quasi statico vale la metà del limite transitorio, pertanto valori limite di velocità basati sui limiti quasi statici potrebbero rallentare eccessivamente il movimento del robot e ridurre l'efficienza della cella collaborativa, tenuto conto anche del fatto che la cella deve comunque essere progettata per evitare situazioni di intrappolamento e contatto quasi statico.

## 7. LIMITI DEL MODELLO DEL CORPO

Il modello del corpo presentato nella norma EN ISO 10218-2 [5] permette agli integratori di sistemi robotici, sulla base di un'opportuna valutazione del rischio, di impostare limiti appropriati per la potenza e la forza di contatto che potrebbe presentarsi durante attività di lavoro collaborative svolte dalla cella robotica.
Il modello va utilizzato tenendo conto che è comunque un'approssimazione dello scenario di contatto reale. Indagini e ricerche per migliorare la conoscenza e la comprensione sull'argomento sono tuttora in corso. Ad esempio, come già accennato, in un contatto reale la situazione potrebbe trovarsi a metà strada tra la situazione risultante da una collisione completamente elastica ed una completamente anelastica.
Oppure, potrebbe essere necessario modificare il modello di contatto a due corpi per tener conto del fatto che l'a-

rea della superficie di contatto tra il robot e il corpo umano non sia piatta, con il risultato che potrebbe aversi una distribuzione non uniforme della pressione su di essa. Durante lo svolgimento di valutazioni dei rischi più approfondite potrebbe essere consigliabile considerare anche gli effetti di diverse forme geometriche dell'area di contatto e di diverse configurazioni della parte del corpo bersaglio dell'impatto.

## 8. ASPETTI DELLA HAZARD AND RISK ANALYSIS

L'individuazione dei pericoli e analisi dei rischi (HRA) di un'attività collaborativa con limitazione della pressione e della forza di contatto (PFL) deve valutare se l'attività sia stata progettata e configurata in modo da far rientrare gli eventi di contatto all'interno dei limiti biomeccanici (di cui alle Tabelle 2.1 e 2.2).
Per questo motivo deve identificare i possibili eventi di contatto. Tali eventi possono essere raggruppati, in base alle situazioni di contatto, per regione del corpo e area specifica di contatto, al fine di ridurre al minimo le valutazioni pur mantenendo la rappresentatività. Gli eventi di contatto individuati devono includere il robot, l'end-effector, il pezzo in lavorazione e altri elementi pericolosi presenti all'interno della cella del robot.
La limitazione di pressioni e forze può essere ottenuta mediante le funzioni di sicurezza PFL del robot e/o quelle dell'end-effector (a titolo esemplificativo ma non esaustivo):

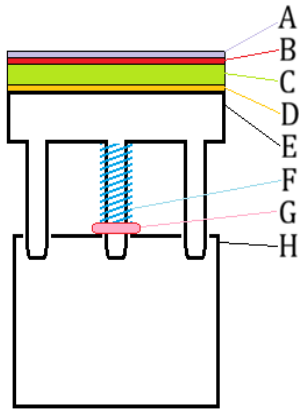
- limitazione della forza;
- limitazione della coppia;
- limitazione della configurazione (posa);
- limitazione della velocità;
- limitazione della posizione per evitare contatti.

Ogni evento di contatto deve essere analizzato considerando lo scenario peggiore (worst-case), basato sulla superficie di contatto minima, sulla velocità massima e sul carico utile (payload) maggiore. Per identificare tale scenario si può tener conto delle indicazioni del fabbricante del robot, di quelle del fabbricante dell'end-effector e delle specificità dell'attività (ad es.: posizione, velocità, accelerazione, direzione, traiettorie e carico utile).
È necessario prestare particolare attenzione ai pezzi in lavorazione, poiché spesso presentano superfici di contatto ridotte e spigoli non arrotondati.
Se un'attività collaborativa è simile a un'altra già analizzata si possono riutilizzare tutte o in parte le valutazioni già effettuate.

## 9. MISURE DI EVENTI DI CONTATTO SIMULATI

Una volta individuati gli eventi di contatto tramite la valutazione dei rischi, se non si vuole ricorrere a calcoli simili a quelli descritti nel paragrafo 5, la norma EN ISO 10218-2 [5] suggerisce la possibilità di effettuare misure della pressione e della forza di contatto con un modello simulato del corpo umano, utilizzando un dispositivo di misura PFMD (*Pressure and Force Measuring Device*) come quello riportato in Figura 9 (nella Tabella 9 sono riportati la durezza e lo spessore del materiale smorzante, così come la costante della molla, per la simulazione delle regioni di un corpo umano da 75 kg).

**Figura 9** **Sensore combinato di pressione e di forza di contatto (PFMD) per la misura dei rispettivi valori durante la simulazione**




**A:** tessuto ≤ 0,5 mm
**B:** sensore di pressione
**C:** materiale smorzante
**D:** film PTFE
**E:** struttura mobile
**F:** molla
**G:** sensore di forza
**H:** struttura fissa

**Tabella 9** **Materiali smorzanti e costanti elastiche per il modello del corpo umano da 75 kg, secondo la EN ISO 10218-2 [5]**

| Regione del corpo | Materiale smorzante (durezza) (Shore A) | Spessore (mm) | Costante elastica k [N/mm] | Massa effettiva $m_H$ [kg] |
|---|---|---|---|---|
| Testa (cranio e fronte) | 70 | 7 | 150 | 4,4 |
| Viso | 70 | 7 | 75 | 4,4 |
| Collo | 70 | 7 | 50 | 1,2 |
| Schiena e spalle | 30 | 14 | 35 | 40,0 |
| Petto | 70 | 7 | 25 | 40,0 |
| Addome | 10 | 21 | 10 | 40,0 |
| Bacino | 70 | 7 | 25 | 40,0 |
| Parti superiori delle braccia e articolazioni gomiti | 30 | 14 | 30 | 3,0 |
| Parti inferiori delle braccia e articolazioni polsi | 70 | 7 | 40 | 2,0 |
| Mani e dita | 70 | 7 | 75 | 0,6 |
| Cosce e ginocchi | 30 | 14 | 50 | 75,0 |
| Parti inferiori delle gambe | 30 | 14 | 60 | 75,0 |

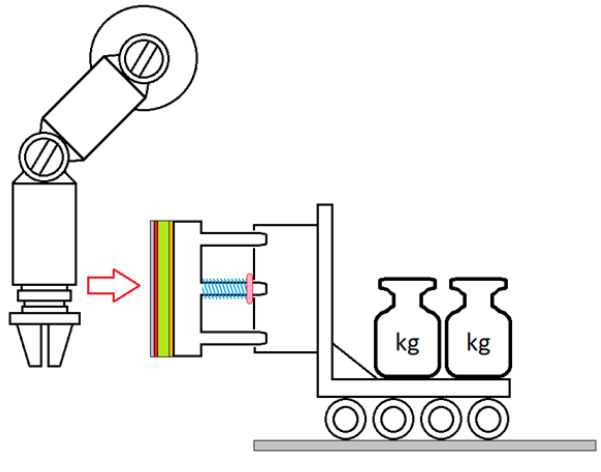
I valori di massa per "Cosce e ginocchi" e "Parti inferiori delle gambe" corrispondono alla massa complessiva del corpo, poiché, in caso di impatto mentre l'operatore è in piedi, queste parti non sono libere di retrocedere o indietreggiare liberamente.

La misura può riguardare il contatto con una parte in movimento dell'applicazione robotica (che può includere il robot, l'end-effector, il pezzo in lavorazione, da soli o in combinazione) o con altri oggetti all'interno della cella, ad esempio:

- postazioni di carico/scarico e attrezzature di bloccaggio;
- telaio della macchina;
- nastri trasportatori;
- prodotto lavorato;
- strutture fisse;

Prima di procedere con una misura, devono essere identificate le superfici di contatto. Nel caso di eventi quasi-statici, potrebbe essere necessario simulare il contatto su entrambi i lati della regione del corpo interessata dallo schiacciamento (si può generare pressione sia sulla regione su cui avviene il contatto, sia sul lato del corpo situato posteriormente, dove avviene il contatto con l'altro oggetto responsabile dell'intrappolamento).
La norma EN ISO 10218-2 [5] suggerisce che una dimensione del campione delle prove comunemente adottata per ogni misura preveda un minimo di 3 prove per ciascun'area specifica di contatto individuata dalla HRA, con una varianza non superiore al 10%.
Per i contatti transitori, il metodo di misura utilizza il sistema raffigurato in Figura 10. In esso il carrello, che simula il movimento del corpo umano dopo l'urto, è libero di scorrere su un binario a basso attrito. Il PFMD è vincolato ad esso in modo sicuro. Il materiale smorzante e la costante elastica della molla sono scelti in accordo con la Tabella 9 per simulare la regione del corpo di interesse. La massa da aggiungere al carrello è calcolata sulla base del valore della tabella relativo alla parte del corpo che si sta simulando (massa da aggiungere = massa in tabella - massa del carrello).

**Figura 10** **Sistema di misura con PFMD montato su carrello**




Il PFMD è uno strumento di misura ad asse singolo, pertanto la sua superficie deve essere posizionata in modo che sia centrata e perpendicolare alla traiettoria del robot nell'applicazione specifica, come illustrato nelle Figura 10.

Il posizionamento del PFMD deve essere ripetibile. Per evitare effetti di vibrazioni impreviste o di fattori di smorzamento aggiuntivi nel sistema di misurazione - che potrebbero aumentare significativamente l'incertezza dei valori di pressione e forza rilevati - il PFMD deve essere fissato saldamente su una base solida (la parete verticale del carrello in Figura 10), dotata della massima rigidità possibile.
Per i contatti quasi-statici, il dispositivo PFMD deve essere adeguatamente supportato e ancorato stabilmente su una superficie rigida.
Gli eventi di contatto sono misurati utilizzando la velocità massima prevista per ciascuna prova specifica. È possibile ricorrere alla funzione di sicurezza di monitoraggio della velocità per limitare la velocità massima. Quando ciò avviene, a causa di vincoli applicativi (ad esempio, la lunghezza del percorso programmato per il manipolatore), potrebbe non essere possibile raggiungere il limite di velocità monitorato; in tali casi, la velocità effettivamente raggiunta può essere considerata la velocità massima ai fini della prova. Per raggiungere la velocità massima prima del contatto con il PFMD, potrebbe essere necessario predisporre programmi specifici per il robot, che includano punti di traiettoria non correlati all'applicazione reale, ma inseriti esclusivamente ai fini della prova.

## CONCLUSIONE

Nel caso di un'attività collaborativa, che debba essere svolta utilizzando come funzione di sicurezza la limitazione di pressione e forza di contatto (PFL), è necessario che l'assemblatore della cella esegua una valutazione dei rischi (HRA) utilizzando valori reali.
I risultati di tale valutazione sono impiegati per determinare se l'attività collaborativa soddisfa i requisiti di sicurezza.
La norma EN ISO 10218-2 [5], per illustrare il procedimento da seguire, presenta un modello semplificato del contatto tra la parte terminale di un semplice robot (segmento finale di un braccio a due segmenti con end-effector e pezzo in lavorazione inclusi) e il corpo umano. Al termine del procedimento presentato si ottengono i valori dei limiti della velocità relativa della parte meccanica in movimento, nel sistema di riferimento del corpo umano, espressi in mm/s, per contatti transitori non vincolati.
Il modello adottato presuppone che, in caso di contatto, siano noti la regione di contatto sul corpo e l'area di contatto, e che il trasferimento di energia possa essere modificato regolando la velocità relativa del robot prima del contatto.
Le formule riportate illustrano la relazione tra le velocità relative prima dell'urto e i valori di picco consentiti per le forze e le pressioni di contatto. Tali formule non sono intese per la verifica e la validazione dei valori di pressione e forza di contatto nelle applicazioni collaborative PFL, tuttavia, possono essere utilizzate per ottenere stime approssimative durante la fase di progettazione iniziale di un'attività PFL.
Si precisa che il modello a due corpi è solo uno dei modelli semplificati utilizzabili per analizzare l'evento

di contatto e ottenere una stima approssimativa della relazione tra la velocità del sistema robotico, quella dell'essere umano, le masse efficaci in gioco e i picchi delle sollecitazioni tollerabili. Le formule fornite derivano da tale modello semplificato e si basano su presupposti che non sono applicabili a tutti i casi di contatto transitorio. Inoltre, i valori calcolati tramite modelli semplificati potrebbero presentare scostamenti significativi rispetto ai valori rilevati mediante misurazioni reali del contatto transitorio. Pertanto, per una valutazione più attendibile dell'evento di contatto, è possibile ricorrere a modelli più complessi o a prove sperimentali.

## RIFERIMENTI


[1] D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 e successive modificazioni ed integrazioni, "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007 n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".

[2] Direttiva CE del Parlamento Europeo e del Consiglio 17 maggio 2006, n. 42, Norma relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE.

[3] Regolamento (UE) 14 giugno 2023, n. 1230, Norma relativa alle macchine e che abroga la direttiva 2006/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e la direttiva 73/361/CEE del Consiglio.

[4] EN ISO 10218-1, Robotics - Safety requirements - Part 1: Industrial robots, 2025

[5] EN ISO 10218-2, Robotics - Safety requirements - Part 2: Industrial robot applications and robot cells, 2025

[6] lEC/TS 62046:2008, Safety of machinery - Application of protective equipment to detect the presence of persons

[7] EN 12453:2021, Industrial, commercial and garage doors and gates - Safety in use of power operated doors - Requirements

[8] Mewes D., Mauser F., Safeguarding Crushing Points by Limitation of Forces, Int. J. Occup. Saf. Ergon, 2003, 9 (2) pp, 177-191.

[9] Suita K., Yamada Y., Tsuchida N., Imai K., Ikeda H., Sugimoto N., A Failure-to-safety "Kyozon" system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence, IEEE International Conference on Robotics and Automation 0-7803-1965-6/95, 1995.

[10] Research project No, FP-0317: Collaborative robots - Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface, Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz, Germany, Final report December 2014.

[11] BG/BGIA, Risk assessment recommendations according to machinery directive. Design of workplaces with collaborative robots, U001/2009e October 2009 edition, revised Feb. 2011 http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg_bgia_empf_u_001e.pdf

[12] Yamada, Suita, lkeda, Sugimoto, Miura, Nakamura, Pain: Evaluation of pain tolerance based on a biomechanical method for human-robot-coexistence, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, No. 96-0689.1997-8

[13] Report No 88-5 USAARL, Anthropometry and Mass Distribution for Human Analogues, Military Male Aviators, Vol. I, 1988.

[14] RIA TR R15.806-2018, Technical Report - Industrial robots and robot systems - Safety requirements - Testing methods for power & force limited collaborative applications

[15] Official Journal of the European Union L22, 26.1, 2010 p. 64, "Table 3 Severity of Injury."



**ISBN 979-12-5758-032-2**


© 2026 Inail. La pubblicazione viene distribuita gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. è consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.


Stampato dalla Tipolitografia Inail di Milano • Edizione 2026 • **Autori: Giovanni Luca Amicucci** (Inail) • **Grafica ed editing: D.G. Cogliani, V. Rinaldi.**



**Inail - Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici - Direttore: Corrado Delle Site**
**Via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma**
**Tel. 06 548 76 400 • Fax 06 548 76 413 • dit@inail.it**