POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di laurea magistrale

Analisi dei difetti di assemblaggio in ambito Human Robot Collaboration (HRC)

Relatore

Prof.re Fiorenzo Franceschini

Correlatore

Prof.re Luca Mastrogiacomo

Candidato

Mirco Bartolomei

Matricola: S285629

Sessione di laurea: Ottobre 2022

Indice

PREMESSA 4
INTRODUZIONE 6
1. I Robot 6
1.1 Storia dei Robot industriali 7
1.2 Componenti fondamentali dei Robot industriali 11
1.2.1 Componenti meccanici 11
1.2.2 Organi sensori 12
2. I robot collaborativi 16
2.1 Definizione del concetto di Human Robot Collaboration (HRC) e di robot collaborativi 17
2.2 Robot collaborativi: cenni storici 18
2.3 Tipologie di collaborazione tra operatore e cobot 21
Obiettivo della tesi 22
3. Revisione della letteratura 23
3.1 Human Robot Collaboration (HRC) 23
3.2 Misurazione del carico mentale e fisico durante il lavoro 26
4. Materiali e metodi 28
4.1 Descrizione esperimento 28
4.2 Descrizione fasi operative dell'assemblaggio 30
4.3 Strumenti utilizzati 32
4.3.1 Cobot UR3e 32
4.3.2 Empatica E4 35
4.3.3 Tagliatrice manuale e piano di lavoro 38
4.3.4 Tobii pro glasses 41
4.3.5 Strumenti di autovalutazione 42
4.4 Dati raccolti 46
4.4.1 Attività elettrodermica (EDA) 46
4.4.2 Variabilità della frequenza cardiaca (HRV) 47
5. Analisi dei risultati 50
5.1 Analisi dei difetti 51

5.1.1 Analisi di difetti uomo nelle prove con assemblaggio manuale e collaborativo 55
5.1.2 Analisi di difetti uomo e del robot nelle prove con assemblaggio manuale e collaborativo .. 60
5.1.3 Analisi dell'impatto del processo di apprendimento sulla difettosità 66
5.2 Analisi dei parametri fisiologici 71
5.2.1 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in base alla modalità di svolgimento delle prove 71
5.2.2 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in prove con e senza errori 93
5.2.3 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in funzione della tipologia di errore 95
5.2.4 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in funzione del numero di errori 99
5.2.5 Andamento dei parametri fisiologici in funzione del numero di prove 100
5.3 Produttività del processo 103
5.3.1 Differenze tra le distribuzioni dei tempi nelle due modalità di esecuzione delle attività 103
5.3.2 Analisi dell'impatto dei difetti sulla durata delle attività 108
6. Conclusioni 111
Bibliografia 114
Sitografia 119

Indice degli acronimi

HRC Human Robot Collaboration

PLCA Programmable Logic Controller

CCD Charge Coupled Device

EDA Electrodermal Activity

BVP Blood Volume Pulse

HRV Heart Rate Variation

RMSSD Root Mean Square of Successive Differences between normal heartbeats

SDNN Standard Deviation of N-N intervals

HRI Human Robot Interaction

PFMEA Process Failure Mode and Effect Analysis

FMECA Failure Mode and Effects and Critical analysis

KDF Kinetostatic Danger Field

P-Y Poka Yoke

TLX Task Load Index

TCP Tool Central Point

PPG Photoplethysmogram

PAD Pleasure Arousal Dominance

SAM Self-Assessment Manikin

SCR Skin Conductance Response

SCL Skin Conductance Level

IBI Intra-Beat Interval

PREMESSA

Immaginare un processo produttivo in cui un operatore e un robot condividano uno stesso spazio di lavoro e interagiscano in maniera attiva non è più un'utopia lontana nel tempo, ma grazie ai robot collaborativi e alla Human Robot Collaboration (HRC) sta sempre più diventando una realtà concreta. Per definire il concetto di Human Robot Collaboration (HRC) e quindi di Cobot (Collaborative Robot) non si può che partire dalle motivazioni che hanno portato al suo sviluppo e al suo utilizzo sempre più crescente nell'industria moderna.

La diminuzione della durata del ciclo di vita dei prodotti e l'aumento della pressione competitiva del mercato ha spinto le aziende a competere, in misura maggiore rispetto al passato, sulla velocità di introduzione di nuovi prodotti. La competizione riguarda anche i prezzi, ciò va quindi a limitare le spese indirizzate all'innovazione, ma soprattutto i profitti delle imprese. Per adattarsi a questo nuovo modo di competere sul mercato, soprattutto in ambito manifatturiero, le aziende hanno quindi dovuto riprogettare le proprie attività produttive, le quali hanno visto aumentare il loro livello di complessità. Il fattore sociale ha portato nel tempo all'evoluzione di come viene concepita l'industria; infatti, l'invecchiamento generale della popolazione e l'aumento della consapevolezza dei lavoratori riguardo ai propri diritti ha portato alla ridefinizione del ruolo degli operatori all'interno delle fabbriche. Con la recente introduzione del concetto di Industria 5.0 è stata infatti evidenziata la necessità di creare un modo di fare industria sempre più incentrato sull'uomo, definito Human-Centered.

Il paradigma di utilizzo dei robot all'interno dell'industria consiste in elevata efficienza, scarsa varianza della produzione e bassi costi per prodotti standardizzati. L'utilizzo dei robot industriali non collaborativi, quindi, risulta efficace in contesti in cui non è richiesta flessibilità, il prodotto è tecnologicamente stabile e quindi non soggetto a processi innovativi e la competizione è principalmente sul prezzo. I robot industriali si inseriscono perfettamente in un contesto di produzione di massa, che ha caratterizzato il mercato del ventesimo secolo e l'inizio del ventunesimo, ma con l'avvento della digitalizzazione il mercato è stato ridefinito come di personalizzazione di massa. Il vecchio paradigma di industria all'interno del quale, si inserivano i robot industriali, non è adattabile alle nuove necessità dei consumatori.

All’interno di questo contesto si inserisce il crescente interesse industriale per la robotica collaborativa e in ambito accademico per l’HRC. Le qualità di questa nuova tipologia di macchine è quella di combinare le migliori qualità dei classici robot industriali con le caratteristiche dell’uomo che invece mancano alle macchine. Un operatore ha come qualità innate la flessibilità, l’intelligenza e quindi la capacità di compiere processi decisionali complessi che permettono, insieme ai robot collaborativi, di raggiungere elevati livelli flessibilità e riconfigurabilità, mantenendo comunque contenuti i costi unitari di produzione grazie all’efficienza dei robot.

L’utilità della collaborazione non si limita all’ambito prettamente industriale, ma riguarda anche la salute dei lavoratori, tema sempre più centrale nei dibattiti politici e istituzionali. Negli ultimi cinquanta anni in ambito medico è cresciuto l’interesse per le patologie legate al lavoro, le ricerche hanno infatti dato evidenza del fatto che i mestieri in cui è necessario il sollevamento di carichi elevati determinino un maggior rischio di insorgenza di disturbi muscoloscheletrici. L’ausilio dei robot collaborativi permette una progettazione dei processi produttivi in cui le attività con carichi elevati, o estremamente ripetitive vengono gestite completamente dai robot.

Il presente lavoro ha come obiettivo la valutazione dell’impatto dell’HRC in un processo produttivo, andando ad analizzare tutti i possibili vantaggi e svantaggi rispetto ad uno tradizionale. In una prima fase sono stati raccolti i dati risultanti da un esperimento svolto in laboratorio, in cui sono state effettuate sessioni continuative di assemblaggio di una tagliatrice manuale, con e senza l’ausilio di un robot collaborativo.

I dati hanno permesso di avere una fotografia sia dello stato emotivo dell’operatore che dell’efficienza del processo in termini di difetti e tempi. Questi dati sono stati poi sottoposti ad analisi statistiche per determinare le differenze significative tra i due processi e quindi determinare l’effettiva efficacia del cobot nel processo di assemblaggio considerato.

INTRODUZIONE

1. I Robot

Sono presenti due macrocategorie di robot, distinti per l'utilizzo funzionale che ne viene fatto. La prima è rappresentata dai robot di servizio, che si distinguono dai robot industriali in quanto non svolgono attività di automazione, si tratta di macchine dedicate allo svolgimento di attività utili per gli esseri umani o per le apparecchiature.

I robot di servizio sono classificati a loro volta in due sottocategorie, i robot di servizio personale svolgono attività per il consumatore e non sono adibiti ad attività commerciali. I robot di servizio professionale sono invece utilizzati soprattutto nella nicchia dell'agricoltura di precisione e nella medicina, dove lavorano in sinergia con un operatore adeguatamente formato che ne gestisce il funzionamento.

La seconda macrocategoria all'interno della quale si inseriscono anche i Cobot è la robotica industriale, una definizione tecnica è data dalla normativa ISO 10218-1 2011 che li definisce come "*manipolatori multifunzione riprogrammabili, con tre o più assi di rotazione, che possono essere fissi o mobili per l'impiego in applicazioni di automazione industriale".*

La definizione industriale coniata dalla RIA (Robot Industrial Association) definisce il robot industriale come un "*manipolatore programmabile multiscopo per la movimentazione di materiali, di attrezzi ed altri mezzi di produzione, capace di interagire con l'ambiente nel quale si svolge il ciclo tecnologico di trasformazione relativo all'attività produttiva".*

La definizione più omnicomprensiva, ma al tempo stesso sintetica di Robot li definisce come "*connessione intelligente della percezione all'azione" (*Brady,1980).

L'azione è fornita da un sistema meccanico formato da organi locomotori (ruote, cingoli, gambe meccaniche) e/o di organi di manipolazione per agire sugli oggetti presenti nell'ambiente circostante (braccia meccaniche, mani artificiali, utensili).

La percezione invece è affidata a un sistema sensoriale in grado di acquisire informazioni sul sistema meccanico e sull'ambiente (sensori di posizione, telecamere, sensori di forza e tattili).

Infine, la connessione intelligente, cioè un sistema di controllo che riceve input dall'ambiente esterno attraverso il sistema sensoriale e che attraverso un principio retroattivo regola le azioni del robot stesso.

1.1 Storia dei Robot industriali

La storia dei robot industriali nasce all'inizio degli anni 50' quando quello che può essere considerato uno dei padri della robotica, George Charles Devol, depositò il primo brevetto riguardante tale materia, denominato " Programmed Article Transfer".

Il primo robot industriale fu prodotto da Unimation Inc., fondata proprio da Devol, presso gli stabilimenti della General Motors nel 1961. Chiamato *Unimate* (figura 1.2) aveva il compito di estrarre getti di metallo trattati in pressofusione dalle macchine ed immergerli in acqua per il raffreddamento.

I robot industriali possono essere inseriti all'interno di tre stadi temporali evolutivi, in funzione delle caratteristiche tecnologiche possedute (Isidori,1986). Si possono quindi definire tre generazioni.

I robot di **prima generazione** hanno come precursori Unimate (introdotto nel 1961) e Verstran (figura 1.1), prodotti da Unimation Inc. e destinati agli stabilimenti Ford. La loro programmazione era molto complessa e non possedevano alcuna capacità di controllo sulla modalità delle attività svolte, non rendevano inoltre possibile la comunicazione con l'ambiente esterno. Non era inoltre presente alcun tipo di servocontrollo e la movimentazione avveniva attraverso attuatori pneumatici controllati da porte logiche [2]. L'utilizzo era limitato al carico/scarico di macchinari e allo spostamento di materie prime e semilavorati.

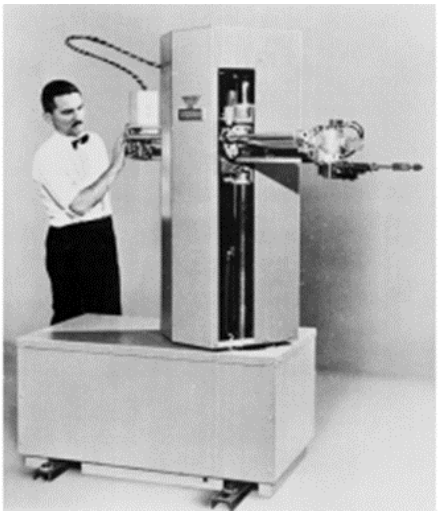


Figura 1.1 Versatran Robot,1961(Gasparetto, A., & Scalera, L. ,2019)

Figura 1.2 Unimate,1961 (Gasparetto, A., & Scalera, L. ,2019).

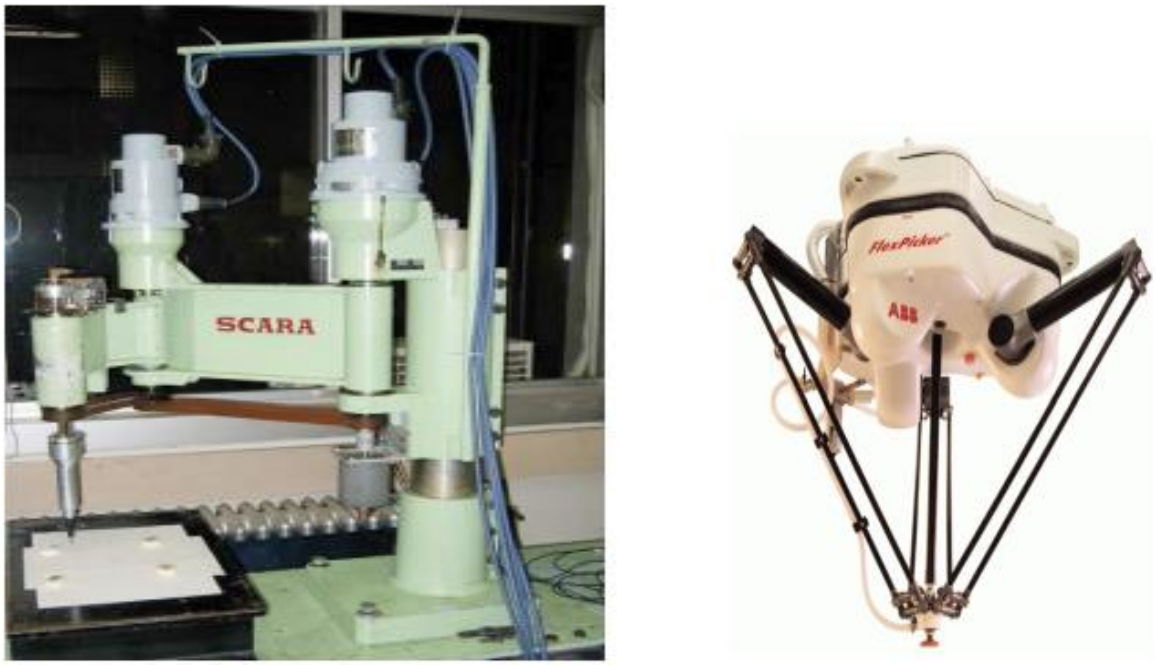
I robot di **seconda generazione (fig 1.3)** sono stati introdotti ad inizio anni 70', la componente innovativa riguarda l'inserimento del servocontrollo attraverso microprocessori e Programmable Logic Controllers (PLCA). Gli attuatori non sono più idraulici, ma elettrici. Questa generazione di robot viene impiegata in attività più complesse rispetto a quelle svolte dai loro predecessori come: la saldatura a punto, la verniciatura, la foratura e il taglio. La flessibilità di questa seconda generazione è comunque molto ridotta, in quanto all'interno del robot erano installati software specifici dedicati ad una sola attività. Per poter cambiare sequenza di azioni sarebbe quindi stata necessaria una riprogrammazione dell'intero sistema operativo e di controllo.

(a) (b) (c)

Figura 1.2 - Alcuni modelli di aziende pioniere nel campo della robotica industriale (Gasparetto, A., & Scalera, L. ,2019)

(a) PUMA; (b) Cincinnati Milacron T3; (c) ABB IRB

La **terza generazione (figura 1.4)** di robot è introdotta ad inizio anni 80'. Queste macchine consentono una maggiore interazione con operatori e ambiente e grazie alla presenza di sensori visivi e tattili, permettono una maggiore programmabilità, aumentando così la flessibilità. Con la terza generazione di robot, per la prima volta, si parla di auto-istruzione; ad esempio attraverso i dati forniti dai sensori il robot è in grado di modificare i propri movimenti, in maniera tale da svolgere le attività nella maniera più efficiente possibile.



(a) *(b)*

Figura 1.3 - (a)Scara Robot; (b)Flex Picker Delta Robot (Gasparetto, A., & Scalera, L. ,2019)

Attualmente è presente una tendenza che sta portando alla formazione della **quarta generazione** di robot. Attraverso l'utilizzo sempre più efficiente dei dati, degli algoritmi di machine learning e grazie a linguaggi di programmazione estremamente evoluti questi robot sono in grado di svolgere attività di auto-istruzione e di auto-diagnostica sempre più efficienti. Ciò permette di renderli efficaci anche per i cicli produttivi più complessi e di svolgere attività di manutenzione predittiva. L'interazione con gli operatori, inoltre, diventa sempre più semplice, intuitiva e sicura.

1.2 Componenti fondamentali dei Robot industriali

1.2.1 Componenti meccanici

La figura sottostante rappresenta i principali organi meccanici che costituiscono il manipolatore di un robot industriale (e quindi anche di un robot collaborativo). Come si può osservare la forma è tipicamente antropomorfa. Ogni elemento (o link) osservabile nella figura sottostante è legato agli altri attraverso giunti rotatori o di traslazione. Ogni coppia formata dal link e dal giunto rappresenta un grado di libertà del sistema. I giunti si dividono in due tipi in funzione della tipologia di movimento permessa: i prismatici permettono la traslazione mentre i rotoidali la rotazione. Il lavoro prosegue con la descrizione degli elementi rappresentati in figura:

- **Base:** è il supporto rispetto al quale si muove il robot. Esistono due tipi di movimenti possibili in funzione dell'attività che deve svolgere la macchina. In caso di base fissa il robot non compie alcun movimento traslatorio (robot fissi). In alcuni casi (robot mobili) la base è montata in una rotaia e di conseguenza il robot effettua anche un movimento traslatorio.

Figura 1.4 - Generico robot industriale ed elementi meccanici principali

- **Shoulder:** è la prima articolazione del braccio e collega la base con il link che poi si inserisce nell'elbow.

- **Elbow:** è la seconda articolazione del braccio e mette in movimento il link che poi andrà ad inserirsi nel wrist.

- **Wrist:** è l'articolazione finale del braccio e permette di orientare il terminale(gripper).

- **Gripper(o end effector):** è lo strumento generico fissato al wrist e che permette al robot di svolgere il compito a cui è deputato. Può essere un organo di presa come in Figura 1.5.

1.2.2 Organi sensori

I sensori sono dispositivi presenti in tutti i robot collaborativi, ma anche in gran parte dei robot industriali in quanto permettono di gestire il rapporto con l'ambiente esterno. Sono deputati alla raccolta e alla trasmissione di informazioni al robot, il quale attraverso un meccanismo di controllo attuerà poi azioni di risposta retroattive.

Le informazioni possono riguardare: la forma, la posizione, la disposizione, la tipologia di superficie del pezzo da lavorare oppure la presenza all'interno del piano di lavoro di persone o altre macchine con cui il robot deve interagire. Equipaggiare un robot industriale di un sistema sensoriale ha un impatto sensibile sui costi, di conseguenza non viene implementato in macchine che svolgono compiti relativamente semplici o in ambienti protetti e senza la collaborazione di persone.

I **sensori di contatto** permettono la rilevazione di un oggetto mediante diverse tipologie di contatto fisico. Un esempio sono i *sensori di tatto*; generalmente si tratta di microinterruttori posizionati all'interno del gripper. Nel caso in cui l'organo di presa eserciti sul pezzo da afferrare una pressione superiore ad un certo valore soglia avviene lo switch nell'interruttore, che provoca la chiusura del circuito elettrico. Tale informazione viene poi fornita al sistema di controllo.

Questi sensori non sono in grado di garantire informazioni sul posizionamento del pezzo o sulla sua forma. Nel caso in cui sia necessario questo tipo di dati si è costretti a ricorrere a

sensori tattili più complessi e con una percezione simile a quella del polpastrello delle dita umane, come i sensori di Tekscan (fig 1.6). Tali dispositivi sono estremamente sottili (0.1 mm) e flessibili; nelle zone di contatto sono formati esclusivamente da materiale semiconduttivo, che permette di ricostruire in maniera più dettagliata le informazioni, grazie alla variazione della resistenza elettrica nelle differenti zone di contatto. A differenza dei sensori tattili piezoelettrici, che sfruttano la variazione di carica elettrica generata dalla deformazione del materiale di cui sono formati, non sono sensibili alle variazioni di temperatura e riescono a mantenere un flusso informativo costante anche in condizioni dinamiche.

Un'altra tipologia di sensori di contatto sono i *sensori di forza* (fig. 1.7*),* i quali sono tipicamente rappresentati dagli estensimetri. Trovano impiego in tutti i casi in cui la forza erogata dall'end effector sul pezzo abbia una tolleranza molto bassa e debba quindi essere regolata con un dispositivo ad elevata sensibilità. La deformazione degli estensimetri varia al variare della forza e con essa anche la resistenza elettrica del materiale, che può essere misurata e fornire quindi indicazioni precise sulla pressione esercitata. I sensori di forza vengono generalmente installati sui giunti del polso.

Figura 1.6 - Sensori Tekscan equipaggiati su una mano robotica (A. Khasnobish, M. Pal, D. Sardar, D. N. Tibarewala, and A. Konar, 2016)

Figura 1.7 - Sensori di forza HEX-E/high precision di Universal Robot (https://onrobot.com/it/prodotti/sensore-forza-coppia-a-6-assi-hex).

I **sensori di prossimità** rappresentano la seconda tipologia più utilizzata, essi permettono di rilevare la distanza da un qualsiasi oggetto. Un esempio di tale tipologia sfrutta gli ultrasuoni. Il sistema è formato da un emettitore di ultrasuoni e da una cella che riceve gli echi di ritorno dopo il contatto con gli oggetti. Per misurare la distanza, si sfrutta la sua proporzionalità con il tempo di ritorno degli echi che viene misurato. È utilizzato come meccanismo anticollisione con gli oggetti che incrociano la traiettoria del robot.

Un altro tipo di sensore di prossimità è quello che sfrutta le *radiazioni magnetiche,* questi dispositivi vengono utilizzati principalmente in robot che effettuano operazioni di ispezione di fori in superfici lisce. Tali sensori generano un campo magnetico, il quale viene alterato dalla presenza di materiale ferromagnetico nel pezzo target che si vuole ispezionare. Attraverso un dispositivo che misura tali alterazioni è possibile determinare la distanza del sensore dall'oggetto.

L'ultimo tipo di dispositivo per la raccolta di dati esaminato sfrutta **l'acquisizione di immagini attraverso delle telecamere**, con cui vengono equipaggiati i robot. Attraverso questi sensori è possibile determinare la posizione degli oggetti nello spazio, la loro forma e la distanza. Questi dati poi vengono utilizzati per adattare il comportamento del robot all'ambiente in cui esso si trova. *La telecamera di tipo vidicon* (f*ig 1.8)* possiede uno schermo composto da materiale silicico caricato elettrostaticamente. Il target viene irradiato da fasci luminosi e la luce riflessa va a colpire lo schermo della telecamera provocando una diminuzione, di entità differente, della carica elettrostatica in tutti i punti. Si ricrea un equivalente elettronico dell'immagine,

che viene trasformato nel suo corrispettivo numerico attraverso un processo di digitalizzazione. Attraverso un microprocessore avviene la rielaborazione che permette la ricostruzione dell'immagine target. Attualmente il Vidicon è stato superato dalle telecamere allo stato solido, in cui l'elemento sensibile è costituito non più da silicio,ma da fotodiodi supportati da particolari sensori ad accoppiamento di carica, chiamati Charge Coupled Device (CCD). Il vantaggio rispetto al Vidicon riguarda la velocità e l'affidabilità, in quanto non è presente alcuna forma di sensibilità ai campi elettromagnetici.

Figura 1.8- Tubo di Vidicon (https://it.wikipedia.org/wiki/Vidicon)

2. I robot collaborativi

La collaborazione è un rapporto reciprocamente vantaggioso e ben definito stipulato da due o più organizzazioni per raggiungere un obiettivo (Matessich et al.,1992). Tale attività può anche essere vista come un meccanismo sociale, cioè come un contesto in cui più individui cooperano per compiere atti individuali nel perseguimento di un obiettivo condiviso che richiede un coordinamento (Ali 2012). Queste due definizioni si adattano al rapporto uomo-uomo, ma è ragionevole considerarle applicabili anche al contesto uomo-macchina. A regolare la collaborazione tra umani ci sono sottili meccanismi sociali e psicologici che rendono possibile la costruzione di tale rapporto.

La collaborazione in ambito manifatturiero può essere declinata nel concetto di azione congiunta, cioè un'interazione sociale attraverso la quale due o più soggetti coordinano le proprie azioni nello spazio e nel tempo per creare un cambiamento nell'ambiente (Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006). La differenza tra le azioni congiunte e le azioni individuali è la presenza, nelle prime, di obiettivi condivisi. Numerosi studi hanno inoltre individuato, nel linguaggio, la base delle azioni congiunte; infatti, la comunicazione verbale è stata definita il mezzo attraverso il quale si premeditano e si specificano al/ai partner le attività da svolgere prima di effettuare un'azione congiunta (H. H. Clark, 2005).

Le azioni congiunte implicano quindi la presenza di una forma di coordinazione, che può essere spontanea, quindi determinata da pattern di comportamento involontari e quindi non predefiniti, oppure pianificata. In quest'ultimo caso è richiesto un piano d'azione che specifichi il risultato delle attività congiunte, è inoltre presente la consapevolezza che possa essere portato a termine solo attraverso il sostegno di un altro agente. Ciò comporta che un'azione non pianificata determini la necessità di effettuare una riprogrammazione delle azioni (Bauer et al. 2008).

Analizzando il rapporto tra uomo e macchina è evidente che non si possa pensare ad un'attività congiunta basata totalmente su una pianificazione spontanea. Per questo è necessaria una coordinazione pianificata, cioè derivante da una premeditazione delle attività da svolgere per il raggiungimento dell'obiettivo. All'orizzonte nell'industria 4.0 è concreta la possibilità di sviluppare collaborazioni uomo-macchina del tutto simili a quelle uomo-uomo. Le fondamenta sono sicuramente formate dalla coordinazione pianificata ma, attraverso la comprensione da parte dei robot del linguaggio e la possibilità di quest'ultimi di apprendere e

comportarsi sempre più similmente all'uomo, si punta ad aprire il campo per una collaborazione sempre più diretta e in tempo reale tra uomo e macchina.

2.1 Definizione del concetto di Human Robot Collaboration (HRC) e di robot collaborativi

La testimonianza dell'interesse crescente verso la collaborazione uomo-macchina è la nascita dell'HRC (Human Robot Collaboration), acronimo inglese che definisce: la scienza e l'insieme delle tecniche di studio, progettazione, costruzione e valutazione di un sistema uomo-robot. Le motivazioni che hanno portato alla nascita dell'HRC sono la volontà di combinare le capacità dei robot: cioè potenza, ripetibilità, precisione, assenza di affaticamento e indifferenza al pericolo a quelle dell'uomo: cioè flessibilità, destrezza, intelligenza e adattabilità alle contingenze, grazie all'elaborazione visiva.

Legata al concetto di HRC è la definizione di robot collaborativi (Cobot), che vengono descritti dalla Federazione Interazionale della Robotica come una classe di robot che permette lo svolgimento di attività in collaborazione con gli operatori; in un contesto industriale. Secondo la normativa tecnica ISO 10218-1 2011 I un robot collaborativo è *"un robot destinato ad interagire fisicamente con gli esseri umani in uno spazio di lavoro condiviso".* I cobot hanno generalmente un peso minore rispetto alle macchie industriali e al contempo un'elevata flessibilità. Possono essere quindi utilizzati per svolgere una grande varietà di attività e sono di conseguenza adottati da più settori dell'industria. L'utilità dei Cobot emerge nelle linee produttive in cui non tutte le attività possono essere automatizzate, ma devono comunque essere svolte sequenzialmente. In altri casi la completa automazione diminuisce la produttività, in quanto alcune attività possono essere svolte in maniera più proficua dagli operatori. Analizzando più nel dettaglio, le situazioni in cui vengono impiegati più frequentemente i Cobot, sono le seguenti:

- *Attività ripetitive e non ergonomiche*: l'utilizzo dei cobot combinato con una corretta progettazione della postazione di lavoro [1][2] permette di migliorare le condizioni lavorative degli operatori. Ciò avviene soprattutto nei casi in cui venga richiesto il

sollevamento e il mantenimento in una specifica posizione di carichi elevati, per svolgere attività di: ispezione, assemblaggio, avvitatura. Numerosi studi [3][4] hanno rilevato che lo svolgimento di lavori che richiedono la gestione di carichi elevati aumenti la probabilità di sviluppare disturbi muscolo-scheletrici. La ricerca si sta quindi concentrando sulla realizzazione di framework che permettano un adattamento da parte del cobot alle condizioni di lavoro (Kim et al, 2019) e alle abitudini dell'operatore. Si tratta di soluzioni che consentono quindi di diminuire i carichi di lavoro e i rischi muscolo-scheletrici.

- *Attività complesse*: i robot industriali automatizzati non sono in grado di svolgere attività che richiedano un alto grado di destrezza, necessaria per maneggiare prodotti con forme complesse. Questi robot inoltre non possono generalmente gestire situazioni in cui sia necessario affrontare un processo decisionale, per il quale è quindi obbligatoria la collaborazione di un operatore umano.

- *Attività in cui è richiesta elevata flessibilità:* l'interazione tra robot e operatore permette di aumentare la flessibilità. Per lotti di piccole dimensioni e con un certo grado di eterogeneità dei prodotti, l'utilizzo di una postazione di lavoro collaborativa permette un beneficio dal punto di vista della produttività e dei costi. Tutto ciò, è reso possibile grazie alla sinergia tra la produttività dei cobot e l'intelligenza e flessibilità dell'operatore umano.

2.2 Robot collaborativi: cenni storici

Il primo prototipo di cobot è il risultato di una fruttuosa collaborazione tra uno dei più importanti gruppi automobilistici del mondo, cioè General Motors e due rinomate università americane, Northwestern e California Berkeley. I Cobot furono inventati nel 1996 da due professori della Northwestern University, J. Edward Colgate e Michael Peshkin.

La necessità che ha spinto General Motors ad esplorare nuove frontiere della robotica è stato l'incessante aumento di patologie professionali all'interno degli stabilimenti dell'azienda. L'obiettivo della ricerca era quindi quello di trovare una forma di automazione che permettesse di ridurre il carico di lavoro per gli operatori, ma che al tempo stesso non determinasse una riduzione della produttività.

I primi esemplari di cobot non presentavano alcuna forma di forza motrice interna, la quale veniva fornita invece dall'operatore. La macchina aveva l'unica funzione di permettere il controllo computerizzato dei movimenti, garantendo la guida del carico durante il movimento.

L'evoluzione dei cobot è stata guidata dal progressivo aumento della forza motrice generata internamente. Il primo con queste caratteristiche è stato prodotto da KUKA nel 2004, quando viene lanciato il modello LBR3(Figura 2.1) e nel 2005 con l'LBR4(Figura 2.1), entrambi frutto di investimenti in ricerca in collaborazione con numerose aziende. Successivamente nel 2009 KUKA , come risultato di alcuni studi di fattibilità, presenta un nuovo modello evoluzione dell'LBR3, chiamato KUKA LBR4+.

Figura 2.1 –A sinistra un KUKA LBR3 con a fianco la sua evoluzione, il KUKA LBR4 (https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/#gallery/29165).

Universal Robot azienda danese leader nella produzione di robot industriali collaborativi, immette sul mercato la prima generazione di cobot nel 2008 con l'UR5, il quale presentava un payload di 5kg. Successivamente nel 2012 rilascia l'UR10 (con un carico utile di 10kg), nel

2015 l'UR3, un cobot con un payload di 3kg e infine nel 2019 per i carichi più elevati l'UR16 , con un carico utile di 16kg.

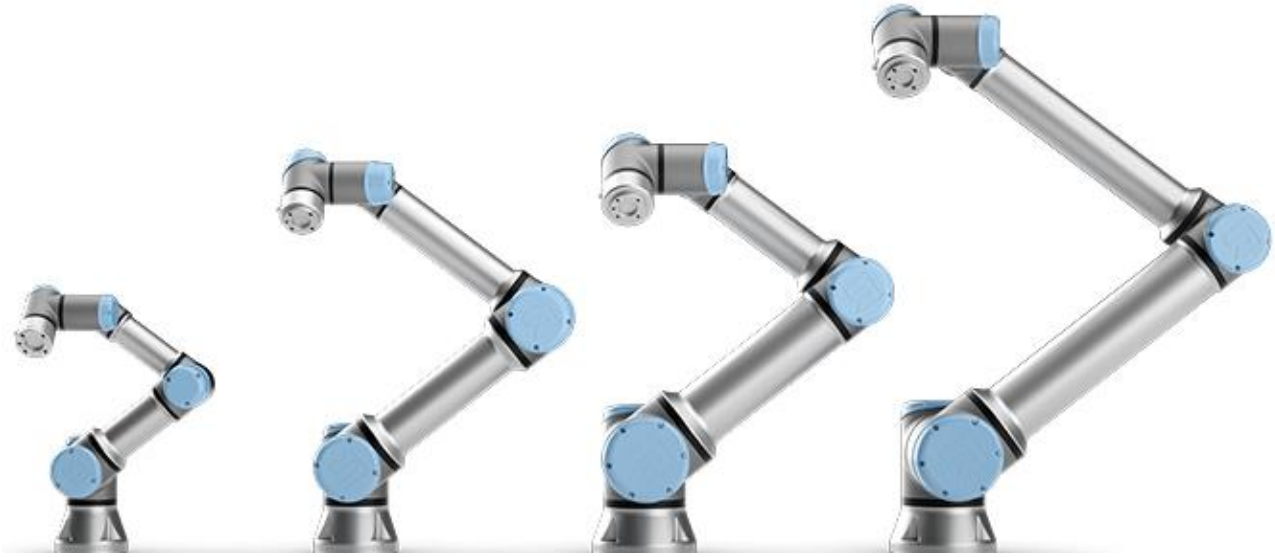


Figura 2.2 - Modelli di cobot prodotti da Universal Robot, da sinistra verso destra: UR3, UR5, UR10, UR16 (https://www.universal-robots.com/it/blog/quali-sono-le-caratteristiche-fisiche-e-i-limiti-dei-cobot/).

2.3 Tipologie di collaborazione tra operatore e cobot

Müller et al. propone una classificazione per le differenti metodologie di interazione tra uomo e macchina in un ambiente industriale:

- Coesistenza: il robot e operatore condividono lo stesso ambiente, ma hanno postazioni di lavoro separate. L'interazione uomo-robot è infrequente.

- Sincronizzazione: processi nei quali uomo e macchina lavorano nella stessa postazione di lavoro, ma svolgono le attività in istanti temporali differenti.

- Cooperazione: processi nei quali operatore e uomo lavorano nella stessa postazione di lavoro in contemporanea, ma svolgono attività diverse.

- Collaborazione: Cobot e operatore svolgono la stessa attività nella stessa postazione di lavoro. L'operato dell'uno ha immediate conseguenze sulle attività svolte dall'altro.

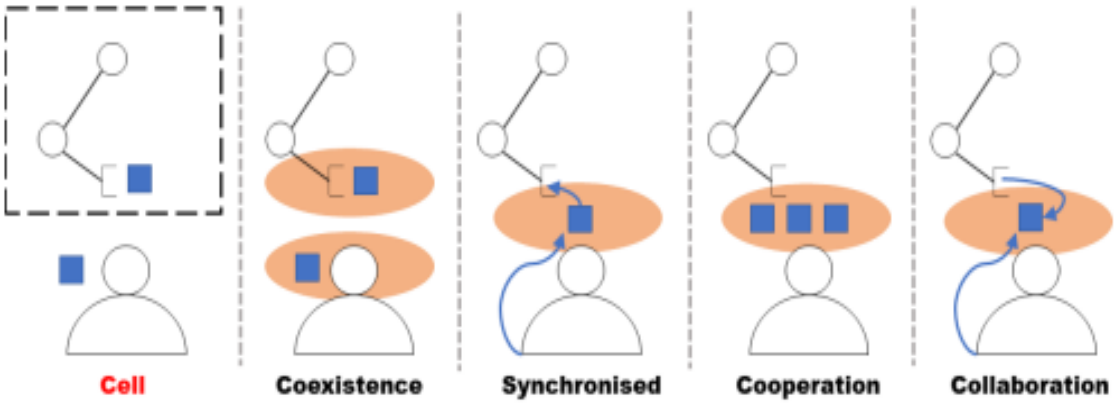


Figura 2.3 - Tipologie di collaborazione tra operatore e cobot (E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio, and G. Rosati, 2019).

Obiettivo della tesi

L'obbiettivo primario dell'elaborato è di analizzare le differenze nella numerosità e nella tipologia di difetti tra un processo di assemblaggio effettuato manualmente e uno svolto con l'ausilio di un cobot. La prima fase riguarda l'identificazione di tutti i possibili difetti, la categorizzazione e infine l'analisi sull'occorrenza degli errori. L'obbiettivo finale è stabilire se esistano differenze statisticamente significative nella difettosità tra le due modalità. Si indaga inoltre l'esistenza di un processo di apprendimento anch'esso significativamente diverso nei due casi sopracitati. Una seconda parte dell'elaborato invece andrà a trattare la tolleranza fisiologica da parte dell'operatore nei confronti del cobot. Questa analisi ha come input i dati derivanti da due dispositivi. Il primo è Empatica E4, un bracciale che, attraverso dei sensori posizionati sul polso dell'operatore, permette di rilevare la pressione sanguigna (BVP) e l'attività elettrodermica (EDA).

I segnali fisiologici sopradescritti sono la risposta dell'organismo umano a condizioni di stress fisico e mentale. I dati ottenuti dai dispositivi sono stati quindi analizzati per indagare l'esistenza di differenze significative tra l'assemblaggio con l'ausilio del cobot e senza di esso. Il confronto si estende anche all'evoluzione di questi dati al prolungarsi delle prove, andando a valutare differenze tra i due casi nell'aumento dello stress.

L'ultima analisi effettuata riprende parzialmente la prima parte dell'elaborato. Gli errori sono combinati con i segnali fisiologici per indagare la presenza di una correlazione positiva con lo stress. Ciò, è fatto dapprima considerando tutte le prove indipendentemente dall'utilizzo del cobot e solo successivamente ripetendo le analisi tenendo conto di questa distinzione.

L'ultima analisi svolta riguarda la produttività, vengono infatti indagate le differenze tra le due modalità di esecuzione del processo produttivo. Sono stati individuati gli errori che hanno avuto un impatto significativo sulla produttività, intesa come durata delle prove, per capirne la natura e gli accorgimenti da mettere in atto per limitarne l'impatto.

3. Revisione della letteratura

3.1 Human Robot Collaboration (HRC)

L'HRC condivide numerosi aspetti con l'HRI (Human Robot Interaction), che Goodrich *et al.* (2019) definisce come un campo di ricerca dedicato alla comprensione, progettazione e valutazione dei sistemi robotici usati per l'interazione con l'uomo. Lo studio dell'HRI è estremamente interdisciplinare in quanto coniuga più domini generalmente divisi tra di loro, tra cui: robotica, psicologia cognitiva, progettazione e infine l'uomo. L'interazione tra i due attori non può prescindere dalla distanza tra di essi; infatti, mentre l'HRI studia qualsiasi genere di interazione l'HRC prende in considerazione i robot collaborativi, i quali sono progettati per permettere la prossimità fisica con l'uomo, senza la presenza di barriere.

Vicentini et al. (2020) ha sottolineato come l'interazione tra uomo e macchina permetta di creare soluzioni che garantiscano un aumento della qualità, della flessibilità e della riconfigurabilità di un processo produttivo. L'altra faccia della medaglia è sicuramente la necessità di porre particolare attenzione al fattore sicurezza. *Jiang et al.* (1987) hanno presentato un report, basato su un'analisi causa-effetto svolta su 32 incidenti, che sottolinea come la vicinanza al robot determini un maggior rischio di infortunio durante un processo produttivo. I risultati infatti dimostrano che nel 72% dei casi studiati siano gli operatori a subire l'infortunio. Gli addetti alla manutenzione rappresentano il 19% dei casi, mentre i programmatori solo il 9%. *S. Robla et al. (2017)* attraverso la descrizione e la quantificazione della pericolosità di tutti i possibili fattori di rischio per l'uomo ha creato un framework atto a valutare tutti i sistemi di sicurezza di cui sono provvisti i robot collaborativi. *Gopinath et al. (2019) ha* sottolineato come la limitatezza della cognizione umana debba essere un fattore di cui tener conto durante la progettazione dei sistemi di sicurezza e ha identificato delle soluzioni che permettano di compensare queste limitazioni. *O. Ogorodnikova (2008)* ha identificato tre possibili fonti di errore nell'interazione uomo-macchina che possono determinare rischi per l'operatore. Gli errori del robot, cioè legati al malfunzionamento di componenti legati alla macchina (software, elettrici, meccanici), che potrebbero generare movimenti non previsti. La seconda categoria invece riguarda gli errori umani, cioè tutte le mancanze dell'uomo nell'applicazione delle procedure richieste per l'utilizzo del robot.

L'ultima categoria infine racchiude tutte le possibili fonti di errori derivanti da condizioni ambientali.

Dopo aver preso coscienza della rischiosità della condivisone degli spazi di lavoro tra uomo e robot uno dei maggiori obiettivi dell'HRC è stato quello di sviluppare metodi per quantificare tale pericolo e contemporaneamente dei sistemi di controllo in tempo reale adatti. In *Lakovic e Rocco* (2010) è stato definito il concetto di "Kinetostatic Danger Field"(KDF), cioè una misura del rischio di impatto del robot con un ostacolo collocato arbitrariamente nello spazio di lavoro del robot. Una volta individuata la posizione dell'ostacolo e la distanza relativa con il manipolatore è possibile, attraverso calcoli algebrici elementari, determinare in tempo reale il KDF. In *Lakovic e Rocco (2011)* è stato proposto un metodo di controllo che utilizza il concetto di KDF per determinare in tempo reale la distanza effettiva tra la posizione degli elementi della catena cinematica e la posizione ideale secondo la traiettoria programmata per l'esecuzione del processo.

Tsai et al. (2014) propone un indice di sicurezza che è una funzione della posizione reciproca assunta dall'operatore e dal robot e del momento degli elementi che formano il braccio robotico. L'indice viene utilizzato come vincolo in un problema di ottimizzazione. La risoluzione di quest'ultimo attraverso un algoritmo permette di pianificare il movimento del robot per evitare contatti con l'uomo. L'operatore è rappresentato come un ellissoide la cui posizione viene determinata in tempo reale, con una frequenza di campionamento non inferiore a quella del sistema di controllo del robot. Täubig et al (2011) propone un metodo per la previsione dei contatti tra le varie parti del robot, attraverso l'algoritmo GJK (Gilbert et al. , 1983), viene determinato a lo swept volume che rappresentativo del movimento di ogni elemento dinamico del robot. Questi metodi sfruttano sistemi di limitazione della forza e hanno un'ottima efficacia per robot che lavorano con piccoli carichi o a velocità modeste. Nel caso di robot che lavorano con carichi elevati e ad alte velocità si rende necessaria l'introduzione di metodi di controllo che sfruttino la realtà aumentata [30]. *Kuang et al. (2019)* ha proposto un sistema operativo in grado di riconoscere più di 30 segnali, con una fotocamera integrata capace di fotografare l'operatore e analizzarne la gestualità per effettuare azioni di controllo. Papanistasiou et al. (2019) ha proposto un sistema che attraverso l'utilizzo di luci avvisa gli operatori in caso attività pericolose e contemporaneamente grazie alla presenza di sensori comunica al robot l'avvicinamento dell'operatore, con conseguente diminuzione della velocità delle braccia robotiche.

Le norme ISO 10218-1 e l'ISO 10218-2 forniscono una lista di rischi per la sicurezza, gettando quindi le basi per la progettazione degli spazi di lavoro dei robot industriali. Successivamente attraverso l'introduzione della norma ISO/TS 15066 si favorisce l'implementazione dell'HRC, permettendo la progettazione con livelli maggiori di autonomia dei robot collaborativi.

La qualità e l'efficienza, assieme alla sicurezza, sono altri due prerequisiti per la diffusione dell'HRC. Il presente elaborato parte dallo stato dell'arte per studiare queste importanti dimensioni. La qualità è sicuramente legata alla presenza di difetti nel processo produttivo e nel prodotto. La valutazione dei difetti nell'HRC è una dimensione di ricerca ancora poco esplorata, ma molto importante in quanto una corretta analisi aprioristica dei difetti che possono emergere nell'HRC favorisce una progettazione delle task e della loro assegnazione più oculata, garantendo maggiore efficienza e qualità.

Antonelli e Stadicka(2018) hanno proposto un metodo chiamato HRC-PFMEA(Process Failure Mode and Effect Analysis) per la previsione, la valutazione e la prevenzione degli errori in un processo di assemblaggio in modalità HRC. Il metodo viene utilizzato in una fase di organizzazione della cella di lavoro e permette di superare l'assenza di dati storici riguardo il processo, necessari invece per utilizzare la PFMEA, proponendo una serie di step che portano: alla definizione della cause di errore, alla determinazione dei possibili difetti, alla valutazione della severità degli stessi e infine attraverso il metodo P-Y (Poka Yoke) [Shingo, 1986] alla riduzione o all'eliminazione del numero di errori.

Franceschini, Antonelli et al. (2019) hanno proposto un nuovo metodo per la valutazione e l'analisi degli errori nell'HRC, rivisitando l'FMECA (Failure Mode and Effects and Critical analysis). Attraverso la tecnica ZM_{II} [Franceschini et al., 2020] è possibile superare la problematica generata dalla mancanza di accordo tra gli esperti sulla valutazione dei rischi, dovuta all'assenza di dati storici per il processo con HRC. Attraverso questa tecnica di aggregazione è possibile determinare la priorità dei rischi determinati dagli esperti senza necessità di un accordo fra essi.

Per garantire la sicurezza dell'operatore e al tempo stesso un'ottima performance, è necessaria una corretta progettazione del processo, ciò comprende l'organizzazione dello spazio di lavoro, ma soprattutto l'allocazione delle attività tra robot e operatore. *Matheus et al. (2019)* sviluppa un metodo che, partendo dal modello CAD del prodotto, metta a confronto i requisiti del processo studiato con le capacità dell'uomo e del robot, per determinare possibili soluzioni di allocazione delle attività tra uomo e macchina. Le soluzioni tengono

conto dei vincoli dovuti alla sicurezza e alla performance. *Bruno et al. (2018)* propone un metodo di classificazione delle attività che tenga conto delle caratteristiche e delle norme di sicurezza per determinare gli attori (macchinari e uomo) in grado di svolgerle. A valle di ciò viene proposto un metodo di assegnazione delle attività in tempo reale che prevede l'assegnazione al primo attore disponibile in grado svolgerla. *Tsarouchi et al. (2016)* propone un algoritmo decisionale che effettua analisi multicriterio basate su variabili legate al workload delle risorse. L'allocazione delle attività nell'esperimento considerato in questo lavoro è il risultato di comparazioni tra i requisiti delle attività e le capacità dell'uomo e del robot, ciò tramite un processo iterativo ha permesso di raggiungere il miglior livello di collaborazione possibile per il processo considerato.

3.2 Misurazione del carico mentale e fisico durante il lavoro

L'obiettivo dell'HRC è quello di combinare le capacità umane con quelle dei robot, garantendo l'interazione fisica all'interno di un contesto industriale (Gervasi, Mastrogiacomo, et al.,2020). Il risultato di questa interazione non deve essere apprezzabile solo dal punto di vista industriale, ma anche da quello legato alla qualità della vita dei lavoratori. La recente introduzione del concetto di Industria 5.0 pone l'uomo, non più solo le macchine, al centro del nuovo modello di industria del futuro. La valutazione dell'HRC deve essere effettuata con una visione olistica, l'implementazione su larga scala dei robot collaborativi, infatti, non dipende esclusivamente dai vantaggi industriali che questi possono apportare, ma anche dalla tolleranza dell'uomo a nuove tipologie di attività in cui la prossimità con i robot è sensibilmente maggiore rispetto al passato, in quanto ciò potrebbe provocare stress sia fisico che mentale [34,35,36]. Nell'industria per come la concepiamo oggi e in maniera particolare nell'HRC, le dimensioni legate alla qualità e alla salute psicofisica dei lavoratori sono profondamente dipendenti l'una dall'altra. Situazioni di stress fisico o mentale, infatti, possono intaccare la qualità della produzione, portando al potenziale aumento della difettosità. Per questo motivo, aspetti come: il carico mentale, lo stress, lo sforzo e la fatica sono sempre stati ritenuti di interesse per l'ambito manifatturiero e per questo ampiamente trattati dalla letteratura scientifica [37,38]. Questi fattori generalmente vengono misurati attraverso strumenti come il NASA-TLX (Hart and Stavaland,1988), la cui compilazione spetta all'operatore stesso alla fine dell'esperimento. La principale limitazione di questo strumento

è che non è in grado di cogliere le fluttuazioni dello stato fisico e mentale dell'operatore durante le prove, e quindi non permette di distinguere in maniera specifica le determinanti di tale stato. Ciò ha spinto chi fa ricerca in questo ambito a focalizzare la propria attenzione sull'utilizzo dei parametri fisiologici come determinanti dello stato fisico e mentale degli operatori [39,40].

Kulič et al. (2007) hanno proposto due parametri fisiologici: l'attività elettrodermica (EDA) e la variazione della frequenza cardiaca (HRV), per la misurazione dell'effetto del movimento di un robot industriale sullo stato fisico e mentale di un operatore. La variazione della traiettoria e della velocità di movimento del robot ha determinato risposte diverse negli operatori; infatti, lo stress mentale è risultato superiore per movimenti veloci e con traiettorie vicine alla posizione dell'operatore.

Arai et al (2010) hanno condotto uno studio simile, sono state valutate le differenze nei parametri fisiologici per la movimentazione a diverse velocità e traiettorie di un manipolatore industriale.

Questi studi sono stati condotti in ambito HRI, senza quindi avere una collaborazione attiva uomo-robot, ma una semplice interazione. In ambito HRC non sono ancora state condotte analisi significative.

I due parametri utilizzati in questi studi sono utilizzati in moltissimi campi di ricerca. L'EDA è utilizzato in ricerche legate principalmente alla psicologia (Prokasy, 1983).

La risposta di conduttanza cutanea (SCR), uno dei due indicatori che determinano l'EDA, misura l'attività del sistema simpatico, che è legato ad emozioni come lo stress fisico e mentale e ad uno stato di allarme. [44,45].

Le altre misure utilizzate durante questo elaborato sono l'RMSSD (Root Mean Square of Successive Difference) e l'SDNN (Standard Deviation of NN interval) che contribuiscono a determinare l'HRV. Entrambi sono indicatori dell'attività del sistema parasimpatico (Minarini, 2020) e quindi anch'essi vengono utilizzati per determinare la fatica fisica e mentale. [45,47,48].

4. Materiali e metodi

Il presente lavoro analizza i dati sperimentali derivanti da un processo di assemblaggio progettato e implementato all'interno del "Mind 4 Lab" (Manufacturing Industry 4.0 Lab) presso il Politecnico di Torino. L'obiettivo nella progettazione dell'esperimento è di simulare il processo di assemblaggio di una tagliatrice manuale svolto all'interno di una stazione di lavoro in ambito industriale.

4.1 Descrizione esperimento

L'esperimento ha coinvolto dodici gruppi, formati da tre studenti ciascuno. Ogni soggetto ha avuto un compito preciso durante tutto l'esperimento che non è cambiato né all'interno della singola sessione né durante l'intera giornata. I 3 compiti svolti sono i seguenti:

- **Controllo qualità e disassemblaggio:** il soggetto incaricato di queste attività è colui che ha il compito di controllare il prodotto finito alla fine della fase di assemblaggio, segnalando eventuali errori di prodotto. È inoltre responsabile del disassemblaggio della tagliatrice e del posizionamento dei componenti nel piano di picking, da dove poi il Cobot e l'assemblatore andranno a pendere i pezzi. Quest'attività è necessaria in quanto il numero di tagliatrici è limitato, il disassemblaggio permette quindi la continuità delle operazioni di montaggio. In una linea produttiva questa fase non viene svolta, in quanto il risultato dell'assemblaggio è il prodotto finito.

- **Controllo delle attività operative di assemblaggio:** un secondo studente è deputato al controllo degli errori di processo durante la fase di assemblaggio. Attraverso un Personal Computer, lo studente, segnala non solo la presenza dell'errore, ma anche la tipologia e l'istante temporale in cui è occorso.

- **Operazioni di assemblaggio:** lo studente ha il compito di combinare i componenti seguendo delle fasi obbligate sia dalle regole di assemblaggio che dalla struttura dell'esperimento. Ha inoltre il compito di segnalare l'inizio e la fine di ogni prova attraverso un time stamp, impresso premendo un apposito pulsante sul bracciale

Empatica E4. Ciò ha permesso nella successiva fase di analisi di filtrare il segnale grezzo aggregato associandolo alle singole prove.

Come precedentemente riportato nel capitolo introduttivo l'esperimento è volto ad analizzare le differenze sotto il punto di vista dei difetti, ma anche del workload dell'operatore e della produttività, di due diverse tipologie di assemblaggio.

Nell'assemblaggio manuale l'operatore svolge le attività in completa autonomia, andando a montare i componenti secondo delle regole di assemblaggio determinate dalla morfologia del prodotto stesso o da scelte effettuate precedentemente da chi ha ideato l'esperimento.

Nell'assemblaggio collaborativo la sequenza delle attività da svolgere è in un certo senso suggerita dal cobot stesso. Esse, infatti, non avvengono in una successione continua, ma è lo studente stesso a dare l'input al cobot premendo l'apposito pulsante per iniziare l'attività successiva.

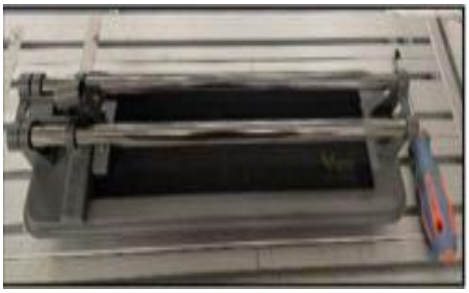
Ogni gruppo ha svolto quattro sessioni di lavoro, ognuna delle quali ha avuto la durata di un'ora e trenta minuti. Le quattro sessioni sono state accorpate in due diverse macro-sessioni, una mattutina e una pomeridiana. All'interno di ognuna la tipologia di esperimento è stata la medesima. È stato inoltre deciso di diversificare l'assegnazione della tipologia di esperimento per evitare un possibile bias determinato dall'effetto di apprendimento; che avrebbe potuto influenzare la macro-sessione pomeridiana. Si hanno quindi sei gruppi che hanno svolto prima l'assemblaggio manuale e altrettanti che invece hanno iniziato con l'ausilio del cobot.

4.2 Descrizione fasi operative dell'assemblaggio

Il tagliapiastrelle è formato da un totale di dieci componenti principali, a cui si aggiungono ulteriori cinque elementi che comprendono viti, dadi e rondelle necessari all'assemblaggio. Le attività sono descritte nella Tabella 2, ma possono essere riassunte in quattro fasi principali:

- *Fase 1*: in questa fase l'operatore prende la base dal vassoio con i componenti e la pone in posizione nell'area di assemblaggio. Successivamente avviene il montaggio dei due supporti per il tagliapiastrelle, infine viene dato l'input al cobot per portare la base con montati i supporti fuori dall'area di assemblaggio alla posizione 2 (vedi Fig. 4.8).
- *Fase 2:* in questa fase avviene il montaggio del sistema di taglio, la collaborazione è più consistente rispetto alla Fase 1. Il cobot mantiene in una posizione ergonomica il pezzo C2, favorendo l'assemblaggio dei restanti componenti da parte dell'operatore. Alla fine di questa fase il meccanismo di taglio viene riposto sul vassoio che contiene i componenti che ancora devono essere assemblati.
- *Fase 3:* La base viene riportata in posizione 1 (vedi Fig. 4.8) dal cobot, mentre l'operatore è responsabile del montaggio del meccanismo di taglio sulle guide
- *Fase 4:* Il meccanismo di taglio, opportunamente montato sulle guide in Fase 3 viene posizionato sui supporti per le guide, completando così la fase di assemblaggio. Il cobot infine porta il prodotto finito in posizione iniziale.

Tabella 4.2 – Elenco delle attività svolte durante l'esperimento nell'assemblaggio collaborativo .

Fase	Attività	Responsabile	Tempo stimato (s)
Fase 1:Assemblaggio dei supporti sulla base (Assemblato A1).	Att1:Portare la base dal vassoio fino all'area di assemblaggio.	Cobot	9s
	Att2:Assemblaggio dei componenti C1a e C1b sui due lati della base. L'avvitatura di B1a e B1b deve essere leggera per facilitare le fasi successive. Si ottiene l'assemblato A1.	Uomo	44s
	Att3:Muovere l'assemblato A1 fuori dall'area di assemblaggio in posizione 2.	Cobot	4s
Fase 2: Assemblaggio del meccanismo di taglio (Assemblato A4).	Att4:Portare il componente C2 all'area di assemblaggio (Posizione 1).	Cobot	7s
	Att5: Assemblaggio del componente C3 con il componente C2 attraverso B2(Assemblato A2).	Uomo	50s
	Att6:Rotazione di 180° di A2.	Cobot	3s
	Att7:Assemblaggio della lama L1 con il componente C3 (Assemblato A3).	Uomo	24s
	Att8: Assemblaggio del componente C4 con C3 attraverso B4 (Assemblato A4).	Uomo	35s
	Att9:Spostarel'assemblato sul vassoio (Posizione iniziale).	Cobot	7s
Fase 3:Assemblare il meccanismo di taglio con la base (Assemblato A6). 	Att10:Spostare l'assemblato A2 nell'area di assemblaggio (Posizione 1).	Cobot	9s
	Att11:Spostare l'assemblato A4 nell'area di assemblaggio (Posizione 1).	Uomo	2s
	Att12:Inserire le due guide P1a e P1b nei sostegni dell'assemblato A4(Assemblato A5)	Uomo	7s
	Att13:Inserire l'assemblato A5 nei supporti C1a e C1b dell'assemblato A1.	Uomo	14s
	Att14:Serraggio delle viti B1a e B1b (Assemblato A6).	Uomo	13s
Fase 4:Completare l'assemblaggio del tagliapiastrelle (Assemblato A7).	Att15:Avvitare l'asta P2 nel componente C3 dell'assemblato A6(Assemblato A7).	Uomo	13s
	Att16: Spostare l'assemblato A7 sul vassoio.	Cobot	11s

4.3 Strumenti utilizzati

4.3.1 Cobot UR3e

Per lo svolgimento dell'esperimento è stato utilizzato il cobot UR3e (figura 4.1; figura 4.2) equipaggiato con un una pinza. Questo tipo di robot grazie alle dimensioni e al peso ridotto ha un'elevatissima flessibilità in quanto può essere spostato agevolmente all'interno del layout industriale e applicato con facilità. La programmazione può avvenire attraverso due strade:

- *Tramite il teach pendant*: avviene attraverso un tablet touchscreen con cui è equipaggiato il cobot; si tratta di una programmazione ad albero estremamente semplice. Il sistema contiene template specifici precaricati che permettono di velocizzare il processo di programmazione; soprattutto per applicazioni come: pallettizzazione, erogazione, manipolazione e montaggio che possono essere lanciate con relativa semplicità attraverso pochi input a partire da template preesistenti.
- *Tramite la modalità free drive*: attraverso un pulsante presente nel controller touchscreen è possibile rimuovere i blocchi presenti nei giunti e spostare manualmente il braccio robotico, facendogli raggiungere la posizione desiderata. Questo metodo di programmazione estremamente semplice e intuitivo rende accessibile la creazione di task personalizzate ad ogni operatore.

Caratteristiche tecniche UR3e

Peso	11 kg
Carico utile	3kg
Portata	500mm
Rotazione	+/- 360°
Velocità massima	Articolazioni al polso:360°/sec Tutte le altre articolazioni:180°/sec
Ripetitibilità	+/- 1 mm
Dimensione della base	Ø128 mm
Gradi di libertà	6 articolazioni rotanti
Dimensioni pannello di controllo (LxAxP)	475 mm x 423 mm x 268 m
Consumo di corrente	Circa 100 watt utilizzando un programma tipico
Materiali	Alluminio, plastica PP

Figura 4.1 Robot Collaborativo UR3e (Mind 4 Lab, Politecnico di Torino).

La programmazione prevede la determinazione di waypoint consecutivi, che rappresentano la posizione nello spazio tridimensionale che dovrà essere raggiunta dal centro dell'applicatore con cui è equipaggiato il cobot. Come detto in

precedenza, questa posizione può essere determinata attraverso il teach pendant o manualmente in modalità free drive; nel caso di specie si sono utilizzate entrambe le modalità sfruttando i vantaggi di ognuna di esse. Assieme ai waypoint deve essere programmata l'attività svolta dall'applicatore una volta raggiunta la posizione obiettivo. Nel caso dell'esperimento, la pinza ha svolto solo due attività: apertura e chiusura, in quanto il cobot è stato utilizzato principalmente per attività di pick and place o di mantenimento del pezzo in una determinata posizione. La velocità con cui avviene l'apertura e chiusura della pinza è regolabile tramite il touchscreen anche durante lo svolgimento del processo attraverso la modifica della pressione con cui le pinze andranno in chiusura. Questa regolazione ha implicazioni sulla sicurezza, ma anche sull'efficienza del lavoro. Un'elevata velocità di chiusura delle pinze rende più repentine le attività di pick and place, aumentando i rischi per l'operatore; al tempo stesso però permette di garantire maggiore stabilità della presa sul pezzo. Viene ridotta così la numerosità con cui occorre uno degli errori più frequenti riscontrati in questo processo, che è la caduta di un componente, soprattutto nel caso in cui abbia una forma complessa. Un altro importante elemento che deve essere considerato in fase di programmazione è la velocità dei giunti, che determina la rapidità con cui si muove il braccio robotico; anch'essa, come la pressione di chiusura delle pinze, può essere determinata preliminarmente in fase di progettazione, ma poi modificata durante l'esecuzione del processo. Un'elevata velocità permette la riduzione generale della durata del processo, ma può comportare un aumento della difettosità, in quanto accresce il carico fisico e psicologico sull'operatore [41,42]. Un ulteriore elemento considerato durante la fase di programmazione è la tipologia di movimento con cui la pinza si muove da un waypoint al successivo, questo fattore è estremamente importante perché in certe situazioni lo spostamento più breve non è percorribile, in quanto provocherebbe il contatto con altri elementi presenti nella stazione di lavoro. Esistono quattro possibilità di movimento: la modalità "*MuoviJ"*, che controlla il movimento dei giunti in maniera tale che essi finiscano lo spostamento contemporaneamente, ciò comporta una traiettoria curva. I parametri programmabili per questo tipo di movimento sono la velocità massima e l'accelerazione massima dei giunti; misurati in deg/s e deg/s^2 rispettivamente. La modalità *"MuoviL"* sposta la posizione centrale dell'utensile chiamata TCP (Tool Central Point) in maniera lineare da un waypoint al successivo, ciò comporta un movimento dei giunti più complicato rispetto al MuoviJ, in quanto non ideato per massimizzare l'efficienza dei giunti, ma bensì per mantenere la traiettoria del TCP lineare. L'ultima modalità implementabile è la "MuoviP" in cui l'utensile viene spostato in maniera

lineare e a velocità costante, eseguendo transizioni circolari. Il parametro che determina la forma del percorso è il raggio di transizione, all'aumentare di tale valore il movimento sarà uniforme, mentre al contrario con valori bassi sarà più spigoloso. Nell'esperimento è stata utilizzata principalmente la modalità MuoviJ in quanto il MuoviL rendeva più frequenti i blocchi da fine corsa dei giunti. Come precedentemente detto, infatti, questi si muovono solamente in funzione della linearità della traiettoria del TCP.

Il cobot UR3e dispone di 17 safety native, cioè misure di sicurezza che garantiscono una collaborazione sicura; di seguito una tabella che descrive le più importanti:

Funzione di sicurezza	Descrizione	Tipo di blocco
Stop di emergenza	Può essere attivato dal pannello di controllo sul pendant touchscreen, impone uno stop di categoria 1. Arresta il movimento di tutti i giunti, che entrano in uno stato di blocco continuato.	Categoria 1
Stop di sicurezza	E' imposto da un dispositivo esterno che genera un input di sicurezza che blocca i giunti, nella pinza utilizzata era presente un sensore di forza nelle aree di presa e un sensore di contatto in alcune aree non adibite alla presa.	Categoria 2
Limiti di posizione dei giunti	Può essere impostato un limite sulla posizione di ogni giunto, che se viene raggiunto provoca il blocco del giunto e quindi l'arresto del movimento.	Categoria 0
Limiti di velocità dei giunti	E' presente una soglia massima della velocità raggiungibile dai giunti, che se superata comporta il blocco dei giunti e quindi l'arresto del movimento.	Categoria 0
Limite di forza	E' presente una soglia massima della forza che può esercitare il cobot attraverso le pinze, che se superata comporta il blocco dei giunti e quindi l'arresto del movimento	Categoria 0
Limite del momento angolare	E' presente una soglia massima del momento torcente applicabile ai giunti, che se superata comporta il blocco dei giunti e l'arresto del movimento. E' molto importante per limitare gli impatti durante il movimento.	Categoria 0
Limite della potenza	E' presente una soglia massima del lavoro meccanico applicabile da parte del cobot (somma della coppia e del momento angolare dei giunti, che se superata comporta il blocco dei giunti e quindi l'arresto del movimento.	Categoria 0

Figura 4.2 Principali funzioni di sicurezza cobot UR3e.

Le tre categorie di blocco differiscono per la tempestività e la metodologia con cui il blocco viene imposto:

- **Categoria di stop 0:** Il movimento è interrotto attraverso la rimozione immediata dell'alimentazione, i freni dei giunti si arrestano nel minor tempo possibile Lo stop è definito incontrollato e può provocare una deviazione dal percorso programmato.
- **Categoria di stop 1:** Questo tipo di blocco non impone una rimozione immediata dell'alimentazione; infatti, prima avviene l'arresto del moto attraverso l'utilizzo della

potenza disponibile e solo successivamente la rimozione dell'alimentazione. Lo stop è definito controllato, in quanto fino all'arresto definitivo il cobot continua a percorrere la traiettoria programmata. Lo stop deve avvenire entro 0.06 secondi dal momento dell'input, altrimenti viene imposto uno stop di categoria 0.

- **Categoria di stop 2:** Arresto controllato in cui viene lasciata disponibile la potenza al cobot, il sistema di sicurezza impone che il cobot rimanga in posizione di stop.

4.3.2 Empatica E4

Uno strumento fondamentale per la raccolta di dati durante l'esperimento è stato il braccialetto E4 di Empatica, un'azienda nata da uno spin off universitario con la prestigiosa università americana MIT di Boston. La mission aziendale è quella di creare dispositivi che permettano di monitorare la salute mentale e fisica delle persone attraverso la raccolta, in tempo reale, di dati corporei. Questi vengono poi analizzati e infine clusterizzati per poter generare una fotografia dettagliata dell'evoluzione dello stato psicofisico dell'utente durante il tempo. Questo tipo di dispositivi è stato introdotto per monitorare lo stato di salute di persone affette da dislessia, ma ciò ha poi aperto il campo per l'utilizzo anche in soggetti senza patologie particolari.

Figura 4.3 - Biosensore Empatica E4.

Le misure di interesse per le analisi svolte in questo lavoro sono l'attività elettrodermica (EDA), misurata attraverso un apposito sensore, e la variabilità della frequenza cardiaca (HRV), misurata attraverso un sensore fotopletismografico (PPG):

- *Sensore di attività elettrodermica:* è costituito da due elettrodi collocati sul laccio del bracciale, che vengono posizionati direttamente sul polso nella parte opposta rispetto al corpo del bracciale stesso. Questi elettrodi garantiscono una differenza di potenziale che genera un flusso di corrente di lieve entità. La generazione di un debole e impercettibile flusso di cariche elettriche è la base per la misurazione dell'attività elettrodermica; infatti, il sensore permette di misurare il voltaggio e di determinare quindi la resistenza elettrica del derma. A partire da questo valore è possibile calcolare la conduttanza cutanea. All'aumentare della sudorazione la resistenza elettrica del derma diminuisce e quindi aumenta la conduttanza. Le ghiandole sudoripare sono attivate dal sistema nervoso simpatico in seguito a stimoli emozionali esterni, di conseguenza l'EDA può essere considerata un ottimo indicatore dello stato emotivo di un soggetto.

- *Sensore fotopletismografico (PPG):* è situato all'interno della cassa del bracciale. Attraverso dei led viene generata luce che viene poi riflessa o assorbita dal flusso sanguigno. Un fotosensore posto in prossimità del led misura l'effetto di riflessione della luce e quindi indirettamente di assorbimento da parte del sangue. L'aumento volumetrico del flusso sanguigno dovuto ad una sistole ventricolare provoca un maggiore assorbimento della luce, i battiti cardiaci possono quindi essere efficacemente misurati tenendo conto della quantità di luce riflessa. Il dispositivo emette luce di due diversi colori: quella verde fornisce informazioni con un livello di sensibilità maggiore sulla frequenza cardiaca rispetto alla luca rossa. La misurazione di quest'ultima permette di determinare il livello di riferimento della quantità di luce assorbita, consentendo quindi di depurare i dati da eventuali outlier dovuti a movimenti repentini dell'utilizzatore.

Figura 4.4 - Biosensori presenti in Empatica E4.

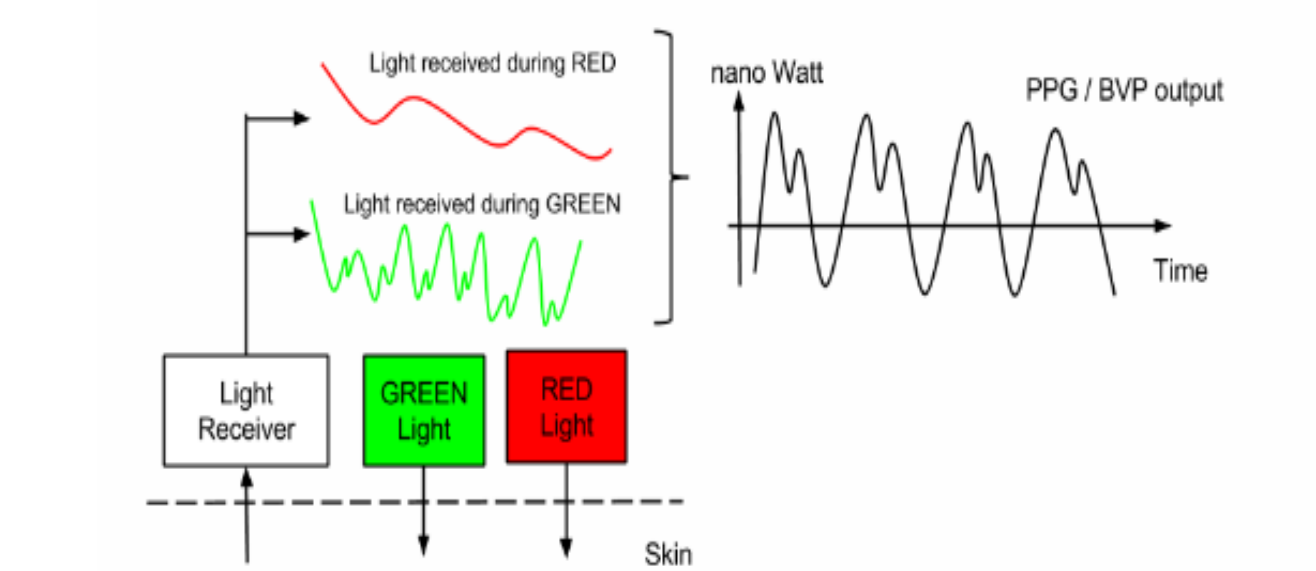


Figura 4.5 - Esempio di segnale in uscita dal sensore fotopletismografico.

4.3.3 Tagliatrice manuale e piano di lavoro

Il prodotto finale dell'assemblaggio (Fig. 4.5) è un tagliapiastrelle manuale, azionato tramite una leva che permette di abbassare la lama in direzione perpendicolare rispetto al piano di taglio e imprimere quindi la forza e la profondità necessarie. Prima dell'inizio della task, il soggetto che ha il compito di disassemblare il prodotto finito, posiziona i componenti in un apposito vassoio (con la disposizione mostrata nella Figura 4.6), che poi viene posto sul piano di lavoro (Figura 4.7), questa fase è definita "di asservimento".

Figura 4.6 – Tagliapiastrelle assemblato (44 X 14 X 9).

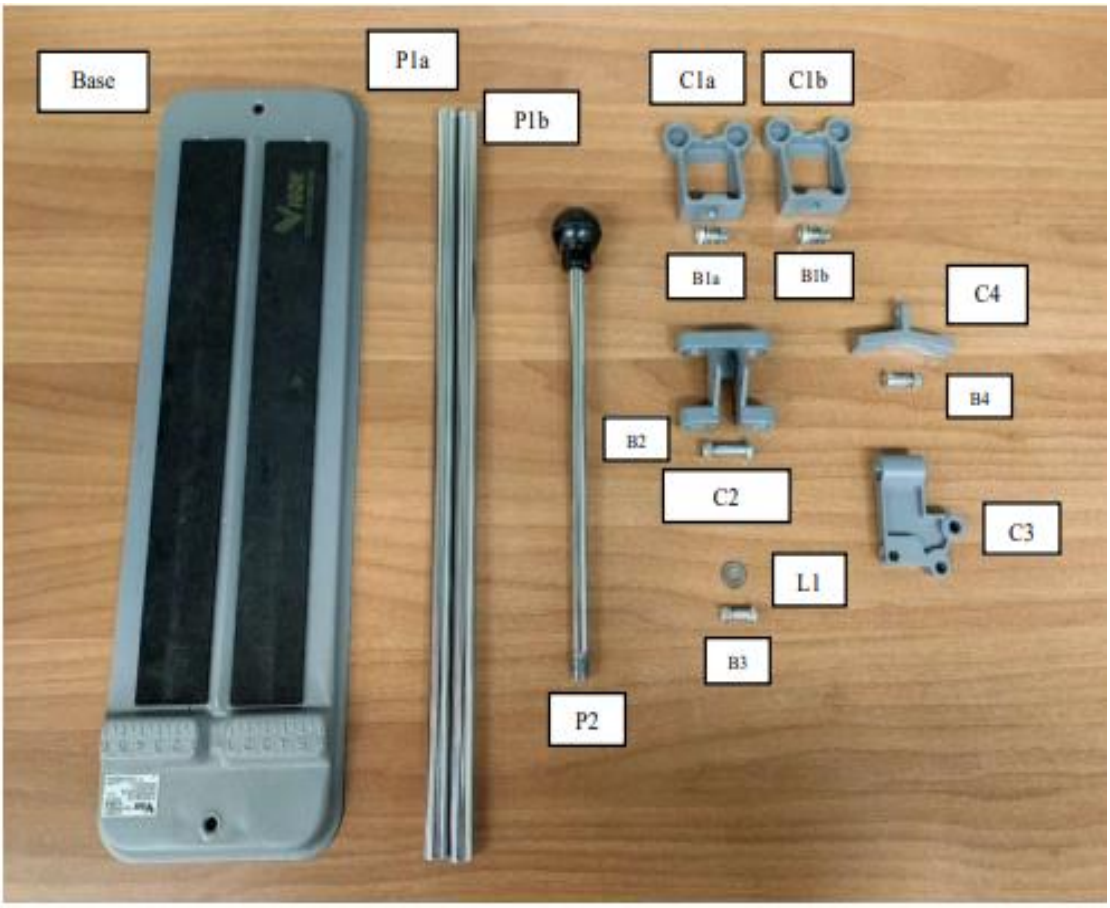


Figura 4.7 – Componenti del tagliapiastrelle e bulloni con relativi identificatori.

Identificatore	Componente
Base	Piastra che rappresenta la base del tagliapiastrelle .
C1a	Supporto per le guide del tagliapiastrelle .
C1b	Supporto per le guide del tagliapiastrelle .
B1a	Bullone e dado per il fissaggio del supporto per le guide sulla base.
B1b	Bullone e dado per il fissaggio del supporto per le guide sullabase.
C2	Giunzione tra le guide e il meccanismo di taglio.
B2	Bullone e dado necessari per il fissaggio di C2 su C3.
C3	Componente del meccanismo di taglio.
L1	Lama.
B3	Bullone e dado necessari per il fissaggio di L1 su C3.
C4	Componente per la separazione completa della mattonella già soggetta al taglio
B4	Bullone e dado necessari per il fissaggio di C4 su C3.
P1a	Guida del tagliapiastrelle.
P1b	Guida del tagliapiastrelle.
P2	Maniglia che fa da leva per effettuare il taglio.

Tabella 4.1 – Lista dei componenti della tagliatrice con i rispettivi identificatori.

Figura 4.8 - Vassoio con i componenti della tagliatrice come viene presentato all'operatore ad inizio assemblaggio.

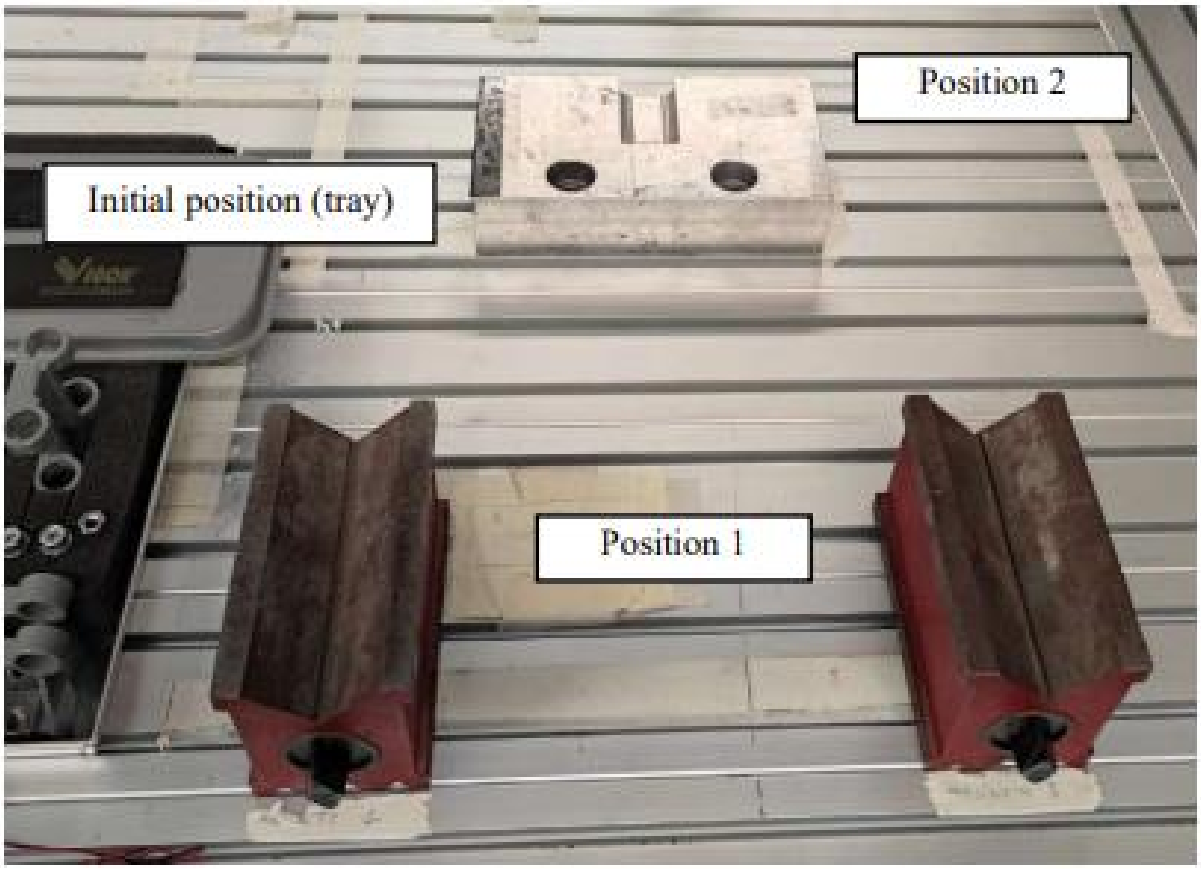


Figura 4.9 – Piano di lavoro con le rispettive posizioni di riferimento utilizzate durante l'assemblaggio in condizioni collaborative.

4.3.4 Tobii pro glasses

Durante lo svolgimento delle prove non è stata solamente tenuta traccia dei parametri fisiologici derivanti dal bracciale Empatica E4, ma attraverso l'utilizzo del dispositivo Tobii pro glasses (Fig. 4.9), cioè degli occhiali indossati dell'operatore, è stato possibile ottenere dati riguardanti: la direzione dello sguardo, la dimensione e l'accelerazione dei movimenti della pupilla. Il collegamento con una memoria mobile ha permesso di registrare lo spazio visivo dell'operatore nel tempo. La rielaborazione dei video ottenuti attraverso Tobii Pro Glasses è stata effettuata attraverso un software specifico, chiamato Eye Tracker Pro Manager, che ha permesso di ricostruire la mappa visiva e di dividere i dati ottenuti nell'intera sessione in quelli riguardanti le singole prove.

I dati derivanti dalla mappatura del movimento degli occhi vengono utilizzati dai ricercatori in molti campi di ricerca come: la scienza visiva, lo studio delle interazioni sociali negli adulti, ma anche in ambiti più commerciali come il marketing e la determinazione dell'usabilità di un prodotto. È possibile legare alcuni dati derivanti dal tracciamento del movimento degli occhi allo lo stato psicologico e fisico di un soggetto. La dimensione della pupilla è infatti direttamente proporzionale allo stress mentale e fisico, allo stesso modo la determinazione del focus dello sguardo e della sua durata è un indicatore veritiero del livello di confort raggiunto nell'interazione uomo-robot. È possibile determinare una heat map dello spazio visivo per determinare su quali punti sia maggiormente concentrato l'operatore. L'evoluzione di questo grafico dimostra come questa cambi nel tempo in funzione della maggior confidenza raggiunta con il robot, in quanto l'operatore ne capisce i movimenti e diventa sempre più cosciente del livello di sicurezza dell'interazione.

Figura 4.10 – Dispositivo di Eye tracking Tobii Pro Glasses 2 con memoria mobile (https://www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/).

4.3.5 Strumenti di autovalutazione

Per ogni sessione, sono stati raccolti i feedback degli operatori attraverso tre strumenti di autovalutazione utili a determinare: le percezioni sulla qualità dell'interazione con il cobot, il carico di lavoro percepito e lo stato emotivo dell'operatore.

Il primo strumento utilizzato è un questionario per determinare la qualità dell'interazione [49]. La progettazione dello strumento ha portato alla determinazione di 7 item, che riguardano: l'utilità del cobot, la naturalezza dell'interazione, la percezione di sicurezza, l'efficienza del team, la fluidità dell'interazione, il confort e l'affidabilità percepita.

Numero identificativo item	Item	Dimensione
Q1	Il robot è stato utile nello svolgimento dell'attività	Utilità del cobot
Q2	Ho percepito che l'interazione non fosse sicura.	Insicurezza nell'interazione
Q3	La collaborazione è stata naturale.	Naturalezza nell'interazione
Q4	Io e il robot abbiamo lavorato efficientemente insieme.	Efficienza del team
Q5	Non mi sono sentito a mio agio con il Cobot.	Confort
Q6	Io e il robot abbiamo lavorato in maniera fluente.	Fluidità del team
Q7	Il robot è affidabile.	Affidabilità del Cobot

Tabella 4.2 Questionario per l'interazione col Cobot

L'altro strumento di autovalutazione utilizzato è il NASA-TLX (Hart e Steveland, 1989), il quale è stato sfruttato per determinare il carico di lavoro percepito dall'operatore attraverso 6 differenti dimensioni, che sono poi misurate in una scala 0-100 (Fig. 4.10). Il carico di lavoro è stato determinato trovando la media tra le sei variabili valutate:

- *Carico mentale:* rappresenta la quantità di attività mentale e percettiva richiesta dalla prova.
- *Carico fisico:* rappresenta la quantità di attività fisica richiesta dalla prova.
- *Domanda temporale:* rappresenta la pressione dovuta al tempo causata dalla velocità della prova.
- *Performance:* rappresenta il grado di successo e soddisfazione percepiti nello svolgimento della prova.
- *Sforzo:* rappresenta lo sforzo necessario per raggiungere un certo livello di performance.
- *Frustrazione:* rappresenta l'irritazione, lo stress e il fastidio percepito durante lo svolgimento della prova.

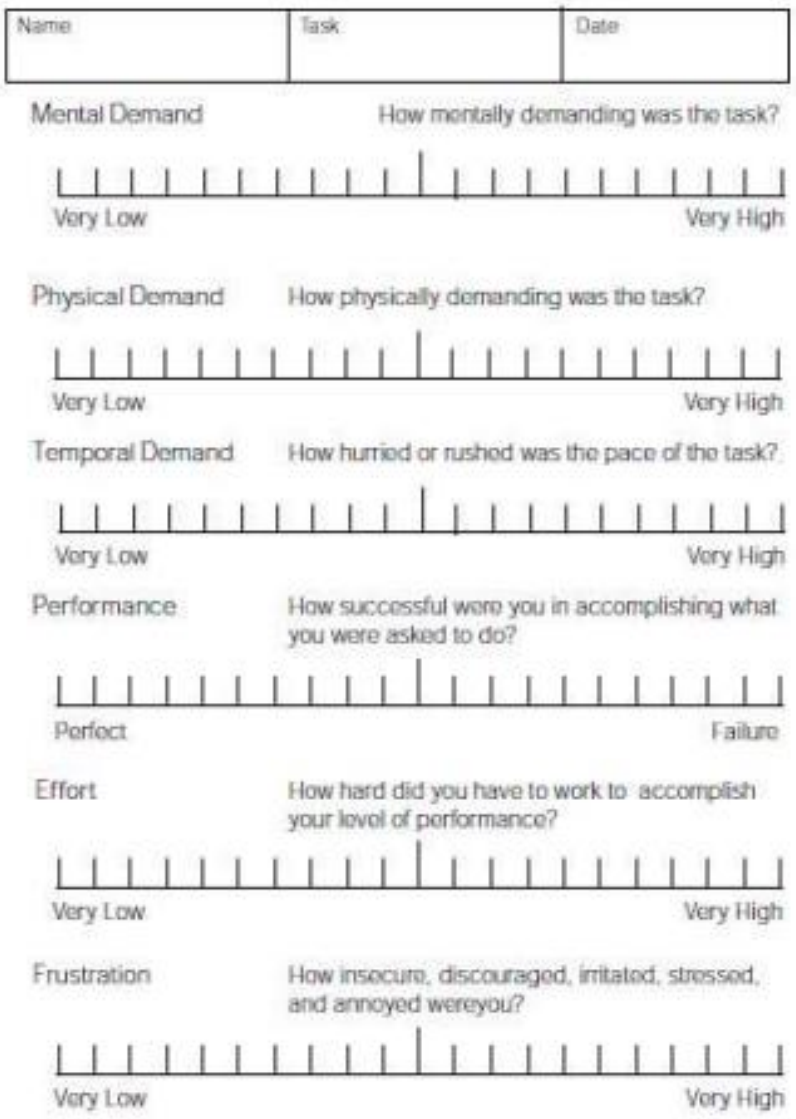


Figura 4.11 – Questionario NASA-TLX

L'ultimo strumento di valutazione utilizzato è il Self Assesment Manikin (Bradley and Lang,1994; Lang,1980), basato sul modello PAD (Pleasure Arousal Dominance), che valuta lo stato emotivo del soggetto su tre dimensioni (Fig. 7):

- *Valenza:* rappresenta la positività o la negatività di un'emozione, ad esempio rabbia e la frustrazione sono negative, mentre gioia e tranquillità sono emozioni positive.
- *Eccitazione:* rappresenta il livello di eccitazione di un soggetto, derivante sia dalle emozioni negative che da quelle positive.
- *Dominio:* rappresenta la percezione controllo del soggetto sulla situazione che affronta.

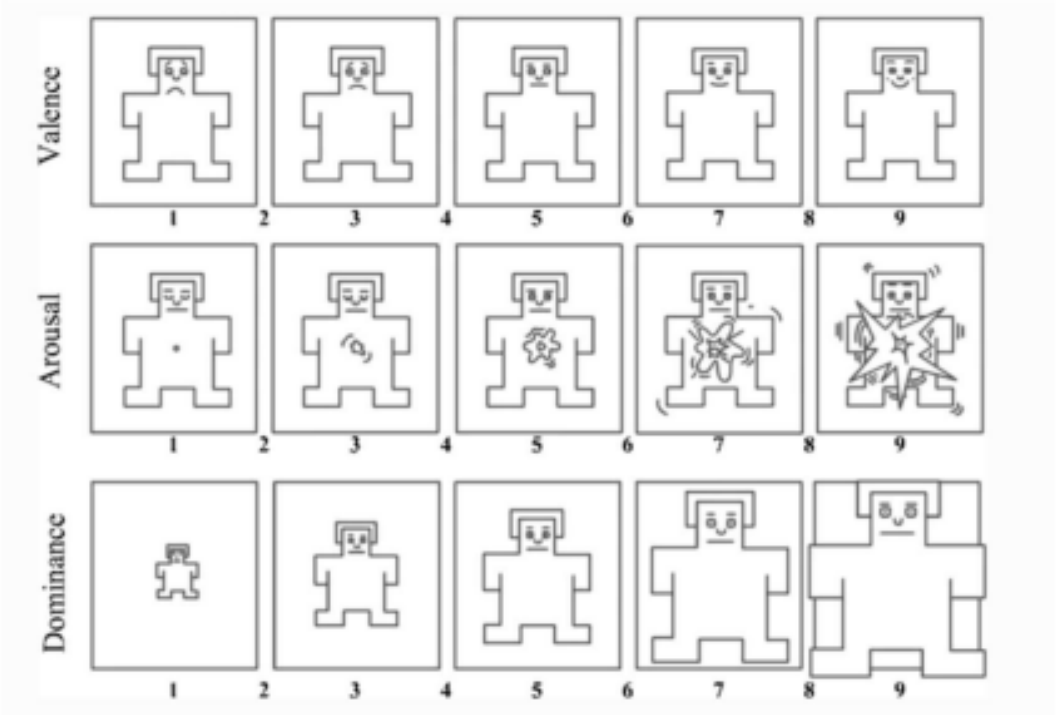


Figura 4.12 - Self Assessment Manikin (SAM) con le 3 dimensioni del modello PAD

4.4 Dati raccolti

I dati raccolti durante l'esperimento e utilizzati in questo lavoro derivano da due fonti principali. La prima è rappresentata dal bracciale Empatica E4, che fornisce informazioni sull'EDA e sull'HRV, questi due indicatori permettono poi di derivare altri parametri che verranno descritti nel seguente sotto capitolo. L'altra fonte di dati sono i report di coloro che hanno effettuato il controllo delle attività operative di assemblaggio, i quali hanno segnalato i difetti, dividendoli per tipologia e tenendo inoltre traccia dell'istante temporale in cui essi sono avvenuti. Dai report può essere ricavato quindi il numero di difetti per prova e la relativa durata. I dati derivanti dagli occhiali Tobii pro glasses e dai questionari non sono stati considerati in questo lavoro.

4.4.1 Attività elettrodermica (EDA)

L'attività elettrodermica è definibile come la conduttanza dell'epidermide al passaggio della corrente ed è misurata in microSiemens (μS). I cambiamenti nell'andamento dell'EDA possono essere di due tipi: di breve durata, ma estremamente repentini, che quindi determinano un picco e poi una discesa, oppure cambiamenti con accelerazioni molto minori, ma di lunga durata. Nel primo caso si parla di attività fasica e la misura che ne deriva è la Skin Conductance Response (SCR), cioè la misura della variazione dell'EDA tra il picco e il livello precedente all'aumento repentino, il secondo caso invece riguarda un'attività di tipo tonico che viene misurata attraverso lo Skin Conductance Level (SCL).

Per lo svolgimento di questo lavoro sono stati elaborati dati riguardanti la sola SCR, è stata infatti determinata la media di questo parametro e il numero di picchi durante la prova. Non tutte le variazioni dell'EDA rappresentano un'attività fasica significativa; infatti, viene considerato un valore soglia di 0.05 μS. Attraverso un software dedicato sono stati elaborati i dati per determinare la media dell'ampiezza dei picchi e il loro numero. Valori elevati di questi due parametri segnalano uno stato di stress fisico ed emotivo nell'operatore.

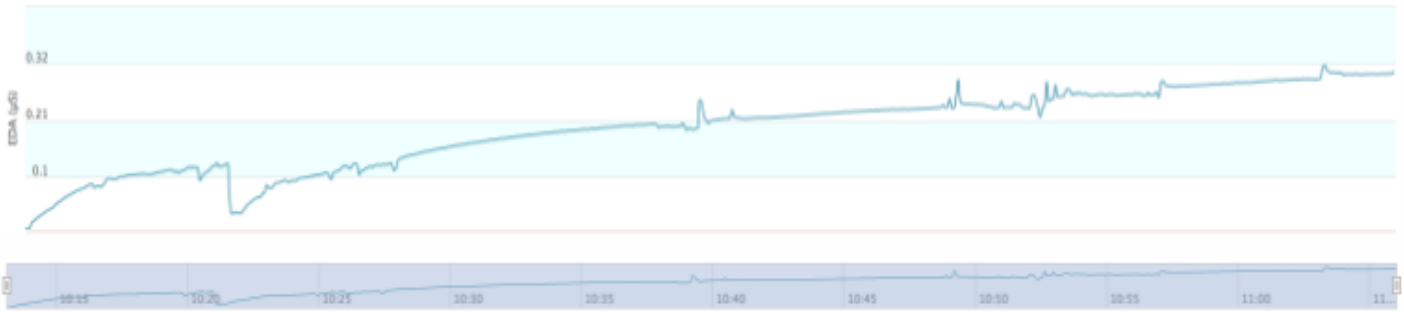


Figura 4.13 – Esempio di grafico dell'EDA con scarsa attività fasica ed elevata attività tonica. Asse x: Tempo (s) ; Asse y: Attività Elettrodermica (µS)

Figura 4.14 – Esempio di grafico dell'Eda con scarsa attività tonica ed elevata attività fasica. Asse x: Tempo (s) ; Asse y: Attività Elettrodermica (µS)

4.4.2 Variabilità della frequenza cardiaca (HRV)

L'output del Sensore fotopletismografico (PPG) di cui è provvisto il dispositivo Empatica E4 è il volume del flusso sanguigno (BVP). L'andamento naturale del segnale è sinusoidale con picchi che corrispondono alla fase diastolica del cuore, dove quindi il volume sanguigno è massimo e valli che invece rappresentano la fase sistolica in cui invece è minimo. Attraverso un software dedicato è stato possibile ricostruire l'intervallo intra-battito (IBI), cioè la distanza tra due battiti cardiaci, semplicemente andando a trovare la differenza temporale tra due fasi sistoliche consecutive. La differenza tra due IBI (Fig. 4.14) consecutivi dà la rappresentazione più sintetica dell'HRV, in realtà però i parametri utilizzati durante lo studio

vanno ancora più in profondità rispetto all'HRV nella valutazione della variabilità della frequenza cardiaca. Il due parametri fisiologici estrapolati dall'IBI sono il valore quadratico medio delle differenze successive dei battiti cardiaci (RMSSD) e la deviazione standard degli intervalli intra battito (SDNN). Valori bassi di questi due parametri fisiologici segnalano una condizione di stress fisico ed emotivo dell'operatore, è possibile quindi affermare che sono inversamente proporzionali allo stress.

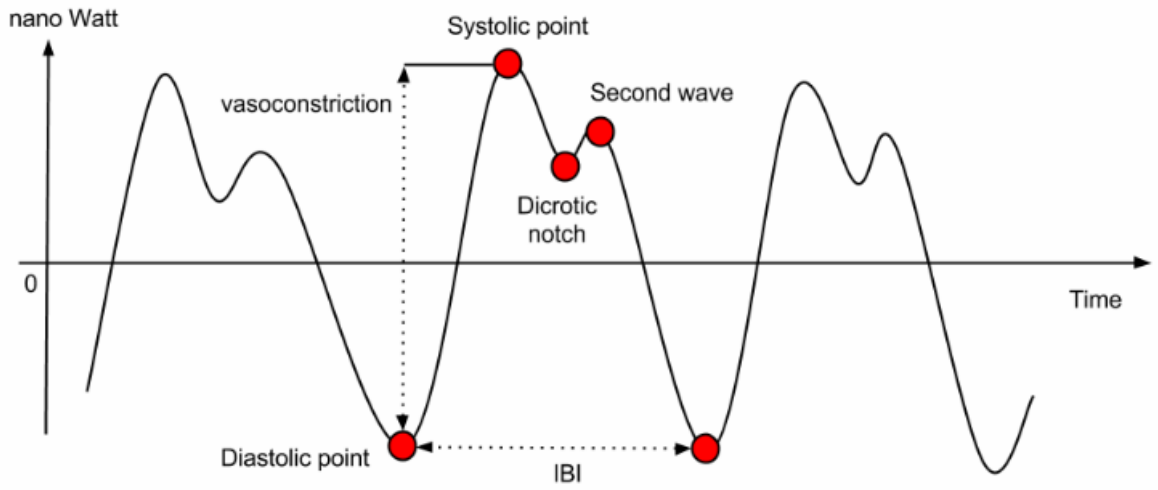
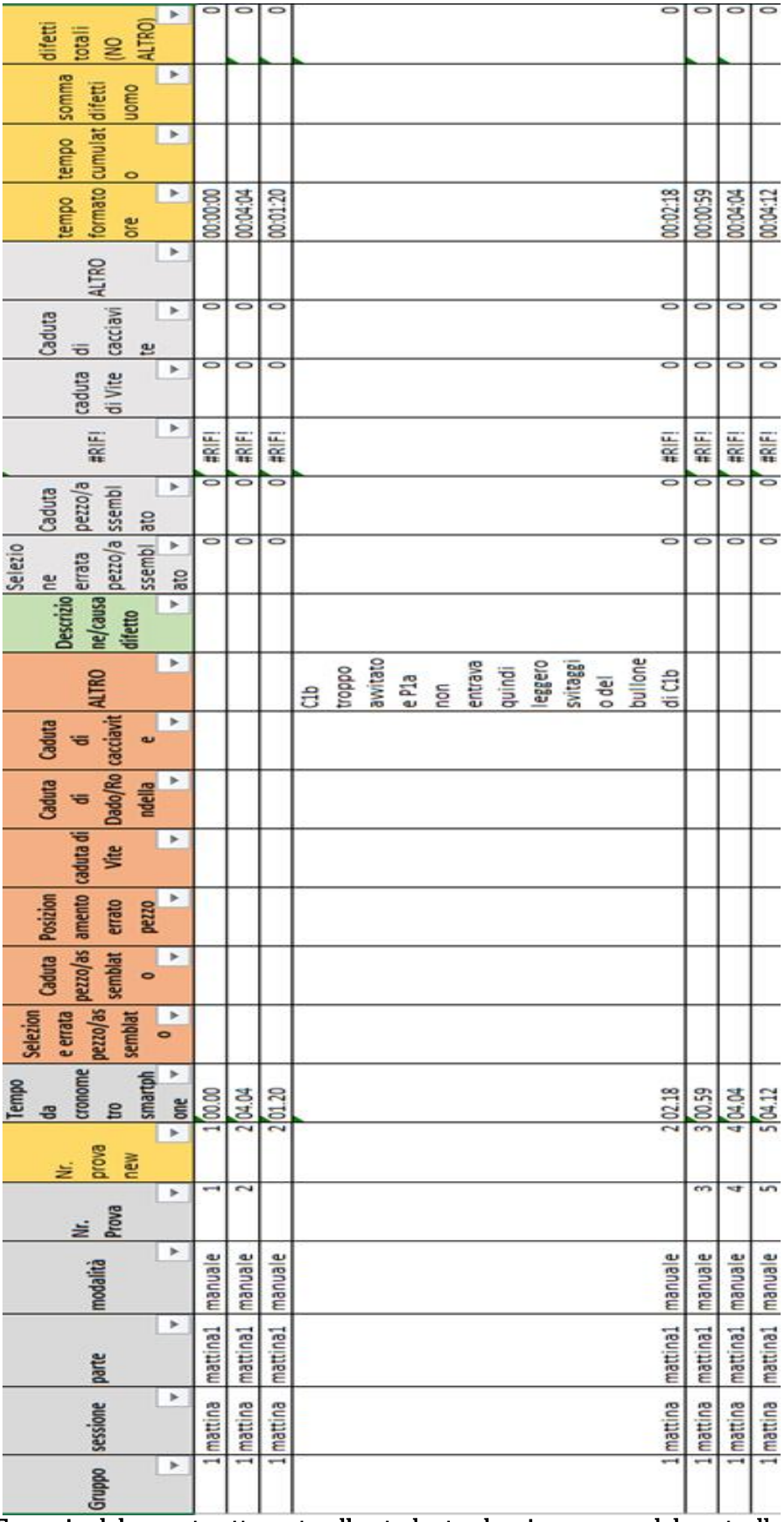


Figura 4.15 – Esempio di grafico del BVP da cui è possibile determinare fase diastolica,sistolica e infine l'IBI. Asse x : Potenza (nW); Asse y: Tempo(s)

4.4.3 Durata delle prove e difetti

Attraverso un report (Fig. 4.15) compilato dal controllore delle attività operative di assemblaggio vengono infine collezionati i dati sui difetti (divisi per errori dovuti all'uomo o al cobot) e sui tempi di ogni prova. Viene chiesto a chi controlla di definire per ogni difetto il delta di tempo rispetto al precedente o rispetto all'inizio della prova, in questo modo è possibile ricostruirne la durata. Per ogni difetto viene inoltre riportato il componente interessato, ciò permette di effettuare analisi sulle caratteristiche dei componenti che generano un numero maggiore di difetti.



Gruppo	sessione	parte	modalità	Nr. Prova	Nr. prova new	Tempo da cronometro smartphone	Selezione errata pezzo/assemblato	Caduta pezzo/assemblato	Posizionamento errato pezzo	caduta di Vite	Caduta di Dado/Rondella	Caduta di cacciavite	ALTRO	Descrizione/causa difetto	Selezione errata pezzo/assemblato	Caduta pezzo/assemblato	#RIF!	caduta di Vite	Caduta di cacciavite	ALTRO	tempo formato ore	tempo cumulato uomo	somma difetti uomo	difetti totali (NO ALTRO)
1	mattina	mattina1	manuale	1	1	00.00									0	0	#RIF!	0	0		00:00:00			0
1	mattina	mattina1	manuale	2	2	04.04									0	0	#RIF!	0	0		00:04:04			0
1	mattina	mattina1	manuale		2	01.20									0	0	#RIF!	0	0		00:01:20			0
1	mattina	mattina1	manuale		2	02.18								C1b troppo avvitato e P1a non entrava quindi leggero svitaggio del bullone di C1b	0	0	#RIF!	0	0		00:02:18			0
1	mattina	mattina1	manuale	3	3	00.59									0	0	#RIF!	0	0		00:00:59			0
1	mattina	mattina1	manuale	4	4	04.04									0	0	#RIF!	0	0		00:04:04			0
1	mattina	mattina1	manuale	5	5	04.12									0	0	#RIF!	0	0		00:04:12			0

Figura 4.16 – Esempio del report sottoposto allo studente che si occupava del controllo delle attività operative.

5. Analisi dei risultati

I dati derivanti dal braccialetto empatica E4 e dai report tenuti dagli studenti sono stati elaborati e uniti all'interno di un unico database, attraverso il software Excel, andando a dividere i difetti in base alla sessione, alla tipologia e al gruppo di lavoro (Fig. 5.1).

		Matt	MANUALE							Matt	MANUALE					
							Gruppo 1									
RMSSD (ms)	SDNN(ms)	SCR-media (µS)	NR SCR	Errori	Cumulata	Prova N	Tempo(s)	RMSSD(ms)	SDNN(ms)	SCR-media	NR SCR	Errori	Cumulata	Prova N	Tempo(s)	
63.61	42.94	0.09	22	0	0	1	125	150.28	186.91	0.08	7	0	0	30	153	
121.59	158.42	0.21	49	0	0	2	234	105.14	88.62	0.07	22	0	0	31	145	
108.66	98.45	0.08	20	1	1	3	265	219.83	146.47	0.07	11	0	0	32	163	
90.63	74.18	0.17	18	0	1	4	231	102.84	96.38	0.11	16	0	0	33	170	
210.99	172.44	0.17	20	1	2	5	241	92.69	68.83	0.07	7	0	0	34	140	
242.92	188.80	0.08	4	0	2	6	224	76.99	64.18	0.08	11	0	0	35	142	
154.85	120.72	0.08	4	0	2	7	191	70.79	59.87	0.09	8	0	0	36	125	
100.39	89.86	0.09	27	0	2	8	187	55.24	32.53	0.06	5	0	0	37	152	
93.26	73.70	0.09	15	0	2	9	174	84.05	61.50	0.18	100	1	1	38	336	
95.58	154.79	0.08	3	0	2	10	180	121.61	111.70	0.06	6	0	1	39	130	
63.35	54.19	0.22	40	2	4	11	167	102.99	94.40	0.07	2	0	1	40	135	
135.96	99.47	0.09	21	0	4	12	203	68.62	75.01	0.05	3	0	1	41	158	
62.72	78.32	0.07	6	0	4	13	159	96.51	134.19	0.07	2	0	1	42	127	
74.28	60.44	0.10	2	0	4	14	150	58.25	56.53	NA	0	0	1	43	139	
91.47	86.57	0.06	4	0	4	15	142	68.49	52.05	NA	0	0	1	44	116	
62.11	57.48	0.07	2	0	4	16	172	75.63	59.02	0.06	2	0	1	45	146	
94.76	67.59	0.09	1	0	4	17	145	55.93	72.25	0.07	1	0	1	46	134	
86.35	108.33	0.09	12	0	4	18	140	75.29	102.97	NA	0	0	1	47	150	
59.66	71.17	0.20	77	1	5	19	158	34.94	36.20	0.23	9	0	1	48	130	
74.03	84.52	0.08	8	1	6	20	335	39.56	39.38	0.06	4	0	1	49	166	
98.90	85.92	0.08	3	0	6	21	167	45.90	58.19	0.06	7	1	2	50	151	

Figura 5.1 – Struttura del database ottenuto su Excel.

Attraverso l'utilizzo del software è stato inoltre costruito un ulteriore database nel quale per ogni prova è stata riportata: la tipologia dell'errore, da chi è stato commesso (se dall'uomo o dal robot) e un identificatore alfabetico .

			GRUPPO1								
Matt1-Manuale			Matt2-Manuale			Pom1-HRC			Pom2-HRC		
Nprov	Tipologia errore	Identificatore	Nprov	Tipologia errore	Identificat	Nprov	Tipologia errore	Identificator	Nprov	Tipologia errore	Identificatore
1			29			1			29		
2			30			2			30		
3	U	I	31			3			31		
4			32			4			32	U	G
5	U	D	33			5			33		
6			34			6			34		
7			35			7			35		
8			36			8			36		
9			37			9			37		
10			38			10			38		
11	U	B,E	39	U	D	11			39		
12			40			12			40		
13			41			13			41		
14			42			14			42		
15			43			15			43		
16			44			16			44	U	A
17			45			17			45		
18			46			18			46		
19	U	G	47			19			47		
20			48			20			48		
21	U	G	49			21	U	A	49		
22			50			22			50		
23			51	U	D	23	U	B	51	R	G
24			52			24			52	R	A,G
25			53			25			53		
26			54			26			54		
27			55	U	D	27			55		
28			56			28			56		

Figura 5.2 – Esempio database degli errori, con suddivisione tra errori uomo e del robot e i rispettivi identificatori.

5.1 Analisi dei difetti

I difetti occorsi durante lo svolgimento delle prove sono da suddividere in due macrocategorie:

- *Difetti uomo(U):* dovuti a errori di natura prettamente umana, le cui cause possono essere molteplici, ma sempre riconducibili all'operatore. Possono provocare un'interruzione del processo, con conseguente riavvio del programma di assemblaggio del cobot, oppure un semplice rallentamento. Questa tipologia può emergere anche nell'assemblaggio collaborativo, a patto che il cobot non venga coinvolto direttamente nel difetto. L'unica eccezione, come vedremo poi nella tab 5.1, è l'input errato al cobot, in cui quest'ultimo è invece indirettamente coinvolto in un errore dell'uomo.
- *Difetti dovuti al cobot (R):* presentano il diretto coinvolgimento del cobot, ciò non significa che non ci sia una responsabilità intrinseca dell'operatore, ad esempio nel posizionamento dei pezzi su cui il cobot deve effettuare una presa, oppure nella movimentazione scorretta dei pezzi sostenuti dall'end effector durante la fase di avvitatura. Il fattore che però li distingue dai difetti uomo è che a provocare l'interruzione del processo è il cobot. Questa tipologia nella maggior parte dei casi costringe l'operatore a riavviare il programma o nell'ipotesi più fortunata a tornare alla task precedente. Sono errori che hanno un impatto maggiore sulla durata del processo rispetto ai difetti dell'uomo e sono molto spesso riconducibili alla limitatezza cognitiva del cobot UR3e, il quale ad esempio non riesce a riconoscere posizioni diverse dei pezzi su cui deve effettuare una presa rispetto a quelle prestabilite in fase di programmazione. In commercio sono comunque presenti cobot in grado di superare questo tipo di problematica attraverso l'implementazione di fotocamere in grado di riconoscere la forma dei pezzi e di muovere l'end effector in funzione della posizione ottimale definita in fase di programmazione.

Durante la fase di progettazione dell'esperimento, successivamente alla definizione delle attività operative e alla loro assegnazione, è stata effettuata la programmazione del cobot. È stata infine eseguita una fase di testing della prova di assemblaggio, per determinare la fluidità dell'esperimento, ma soprattutto per definire gli errori principali che ne derivavano;

ciò ha permesso di costruire il report compilato poi dagli studenti durante l'esperimento. Di seguito le tabelle con l'identificatore e la descrizione degli errori inseriti nel report:

Tipologia difetto	Identificatore difetto	Nome difetto	Descrizione
Cobot	A	Mancata presa pezzo	L'operatore commette un errore nella selezione del pezzo corretto da prendere secondo la sequenza di assemblaggio. Non è necessaria l'avvitatura del pezzo, si considera errore anche la presa del pezzo errato dal piano di lavoro.
Uomo	B	Caduta pezzo	L'operatore provoca la caduta di un componente coinvolto nel processo di assemblaggio.
Uomo	C	Posizionamento errato di un componente	L'operatore posiziona un componente in maniera scorretta rispetto a quanto ri chiesto dalla morfologia della task. Non è necessaria l'avvitatura per incorrere in questo difetto (in quel caso si tratta di un"montaggio errato").
Uomo	D	Montaggio errato di un componente	L'operatore non rispetta le regole o le sequenze di assemblaggio durante il mon taggio di un componente.
Uomo	E	Danneggiamento	L'operatore provoca un danno strutturale al componente.
Uomo	F/G/H	Caduta vite/dado o rondella/cacciavite	L'operatore provoca la caduta della vite, del dado o della rondella,del cacciavite.
Uomo	I	Selezione errata vite/dado	L'operatore commette un errore nella selezione della vite o del dado corretti da prendere secondo la sequenza di assemblaggio.
Uomo	L	Posizionamento errato vite/dado	L'operatore posiziona una vite o un dado in maniera scorretta rispetto a quanto ri chiesto dalla morfologia della task.
Uomo	M	Montaggio errato vite/dado	L'operatore effettua l'avvitatura con la vite o il dado scorretti.

Tabella 5.1 – Tabella descrittiva degli errori causati dall'uomo.

Tipologia difetto	Identificatore difetto	Nome difetto	Descrizione
Cobot	A	Mancata presa pezzo	Il pezzo è stato posizionato male in fase di asservimento e il robot non riesce ad effettuare la presa.
Cobot	B	Caduta pezzo/assemblato	Il Robot non riesce a mantenere una presa salda sul pezzo provocando la caduta dello stesso.
Cobot	C	Presa errata pezzo/assemblato	La presa sul prezzo non è corretta, la posizione reciproca tra il componente e la pinza del cobot rende difficile l'avvitatura.
Cobot	D	Posizionamento errato pezzo	Il cobot posiziona in maniera errata il componente rispetto alle sedi previste dalla task, provocando un blocco del sistema oppure generando errori nello svolgimento delle task successive.
Cobot	E	Danneggiamento pezzo	Il cobot provoca un danno strutturale ad un componente.
Cobot	F	Contatto/impatto con oggetti	La traiettoria del braccio robotico del cobot genera un impatto con un qualsiasi elemento del piano di lavoro.
Cobot	G	Blocco emergenziale	Il sistema entra in uno stato di blocco emergenziale che impedisce lo svolgimento delle task successive.
Cobot	H	Contatto/impatto con l'operatore	La traiettoria del braccio robotico del cobot genera un impatto con l'operatore.
Cobot	I	Pinzamento operatore	Durante la fase di avvitatura di un componente, mantenuto in pozione dal cobot, l'operatore viene toccato dalle pinze durante la loro fase di chiusura.

Tabella 5.2 – Tabella descrittiva degli errori causati dal cobot.

La prima analisi svolta riguarda i difetti valutati in base alla loro frequenza assoluta, nella seguente tabella vengono quantificati gli errori dell'uomo in base all'identificatore, definendo quindi quale difetto avvenga con una frequenza assoluta maggiore:

	Man	HRC	Totale
A	21	10	31
B	55	19	74
C	93	32	125
D	45	26	71
E	1	0	1
F	16	16	32
G	72	73	145
H	1	1	2
I	16	7	23
L	15	0	15
M	4	0	4

Tabella 5.3 – Frequenza assoluta dell'occorrenza degli errori per ogni difetto uomo.

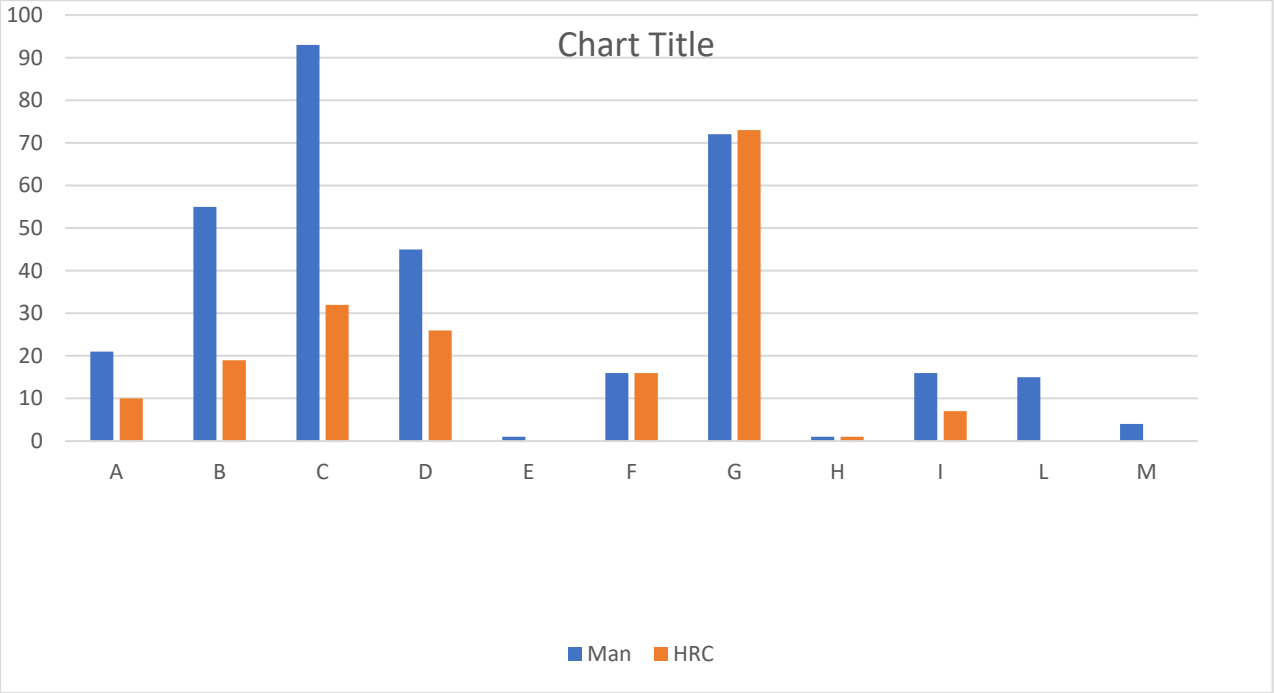


Figura 5.3 – Istogramma delle frequenze dei difetti uomo.

Il numero di prove totali di assemblaggio manuale è 941, mentre in modalità collaborativa sono state svolte 718 prove. La moda nel caso di assemblaggio manuale è rappresentata dalla categoria C, che identifica il posizionamento errato di un componente. Il numero di occorrenze del difetto C è molto minore nell'assemblaggio collaborativo, questo è dovuto al fatto che la sequenza delle attività è stabilità dal cobot, il quale prendendo i componenti in maniera autonoma di fatto suggerisce l'attività di assemblaggio successiva da svolgere, limitando l'incertezza dell'operatore. Questo effetto è accentuato soprattutto in una fase iniziale di apprendimento e quando subentra lo stress emotivo che tende a deconcentrare l'operatore.

La moda, per quanto riguarda l'assemblaggio collaborativo, è rappresentata dalla categoria G che identifica la caduta di un dado o di una rondella. Questo risultato è dovuto alla difficoltà incontrata dagli operatori nell'avvitatura di alcuni componenti con l'ausilio del cobot; ciò avviene perché in alcune situazioni la posizione dei pezzi non è perfetta all'interno delle pinze, diminuendo così lo spazio per inserire il dado o la rondella. La dimensione di questi due componenti ausiliari inoltre è molto ridotta, ciò richiede un'elevata destrezza dell'operatore.

5.1.1 Analisi di difetti uomo nelle prove con assemblaggio manuale e collaborativo

Dopo l'analisi preliminare del sottoparagrafo precedente sono state valutate le differenze nel numero medio di difetti uomo tra le due modalità di assemblaggio. L'ipotesi nulla è che le popolazioni abbiano la stessa distribuzione del numero di difetti, sono stati quindi divisi i dati del database nelle due popolazioni e con l'ausilio del software statistico SPSS sono state svolte le opportune analisi.

Test di normalità per le due popolazioni

In prima battuta sono stati svolti due test di normalità (Fig.5.5), con l'ipotesi nulla che le due popolazioni avessero una distribuzione normale dei difetti. Il primo test di normalità effettuato è Kolmogorov – Smirnov con correzione di normalità di Lilliefors, il quale può essere utilizzato anche come test per valutare l'uguaglianza tra due distribuzioni, in questo caso invece è stato svolto in entrambi i campioni per valutare se la distribuzione dei difetti possa essere o meno considerata, con livello di significatività del 5%, normale. Questo test utilizza la frequenza relativa dei dati del campione $F(x)$, confrontandola con la funzione di distribuzione ipotizzata $\Phi(x)$ per trovare il massimo scarto in valore assoluto. Viene quindi determinata la probabilità di ottenere in maniera casuale questo valore dello scarto. Il secondo test è di Shapiro – Wilk che utilizza il rapporto tra stimatori della varianza σ^{2},. il primo è non parametrico e deriva dalla combinazione lineare dei percentili di una variabile aleatoria con distribuzione normale e si trova al numeratore, il secondo è al denominatore ed è la varianza campionaria. Sono state inoltre ottenute le statistiche descrittive dei due campioni (Fig 5.4) e gli istogrammi delle frequenze relative (Grafico 5.2 e Grafico 5.3).

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
Unumer	HRC	Medio		,2660	,02133
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,2241	
			Limite superiore	,3079	
		Media ritagliata al 5%		,1828	
		Mediana		,0000	
		Varianza		,327	
		Deviazione std.		,57151	
		Minimo		,00	
		Massimo		4,00	
		Intervallo		4,00	
		Intervallo interquartile		,00	
		Asimmetria		2,537	,091
		Curtosi		7,609	,182
	MAN	Medio		,3528	,02150
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,3106	
			Limite superiore	,3950	
		Media ritagliata al 5%		,2573	
		Mediana		,0000	
		Varianza		,435	
		Deviazione std.		,65952	
		Minimo		,00	
		Massimo		5,00	
		Intervallo		5,00	
		Intervallo interquartile		1,00	
		Asimmetria		2,415	,080
		Curtosi		7,906	,159

Tabella 5.4 – Statistiche descrittive dei due campioni; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

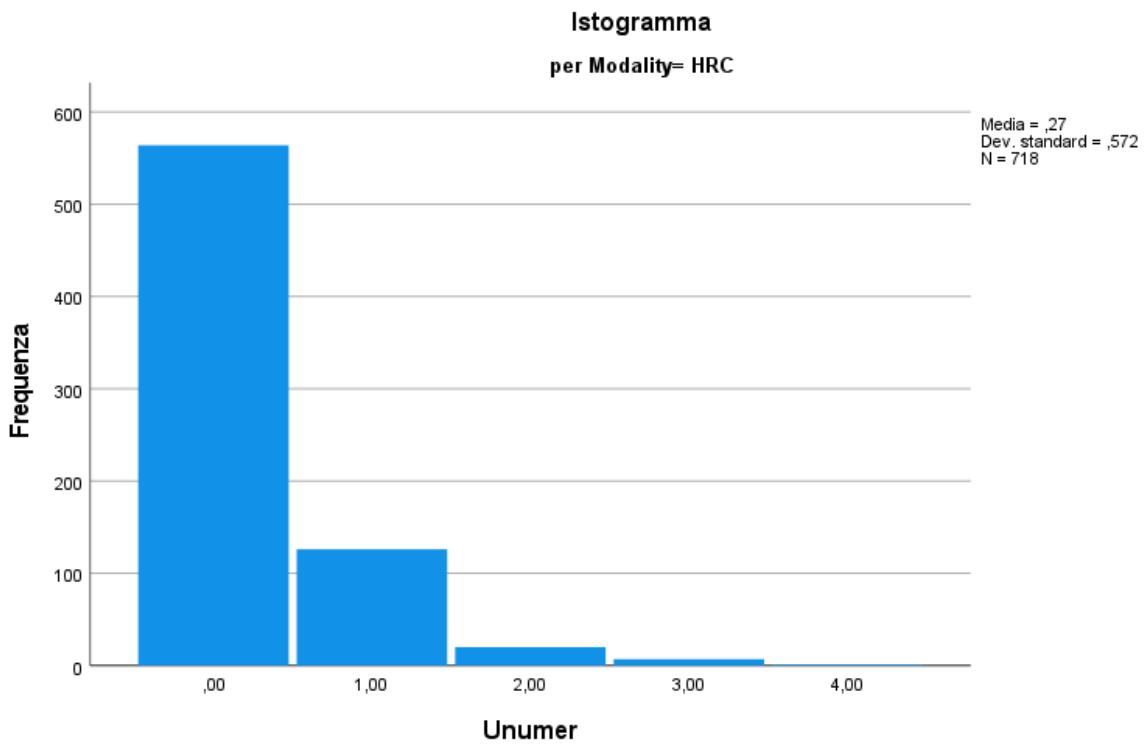


Figura 5.4 – Istogramma delle frequenze relative degli errori in modalità collaborativa; Unumer: Numero di errori.

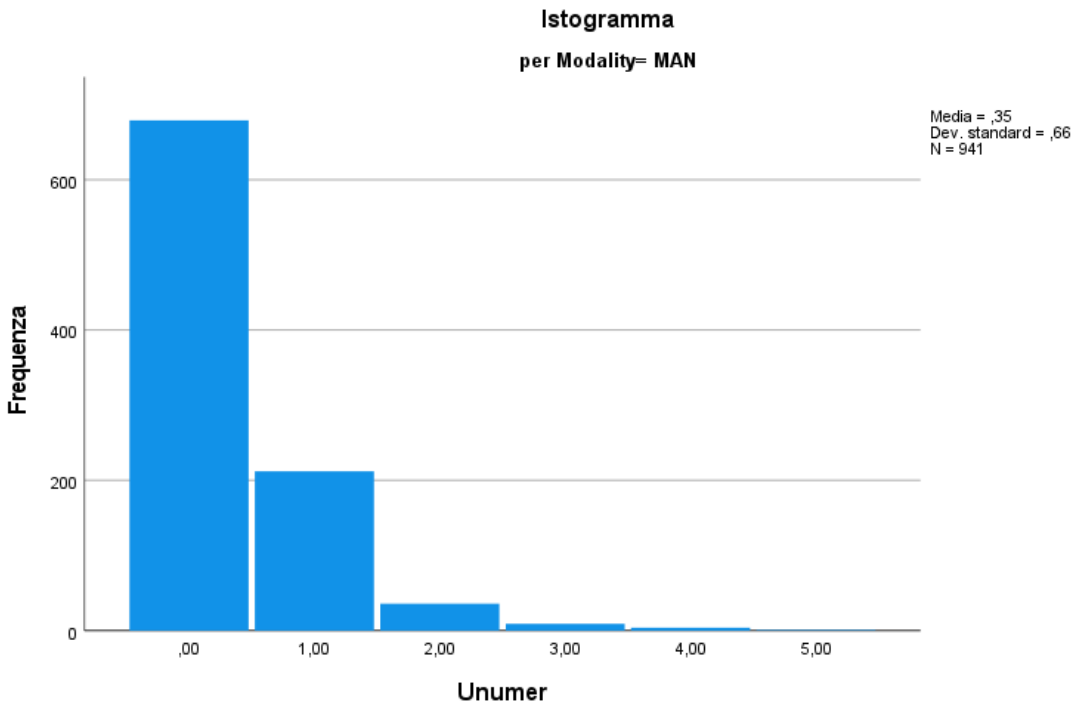


Figura 5.5 – Istogramma delle frequenze relative degli errori in modalità manuale; Unumer: Numero di errori.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
Unumer	HRC	,465	718	,000	,516	718	<,001
	MAN	,425	941	,000	,576	941	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.5 – Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

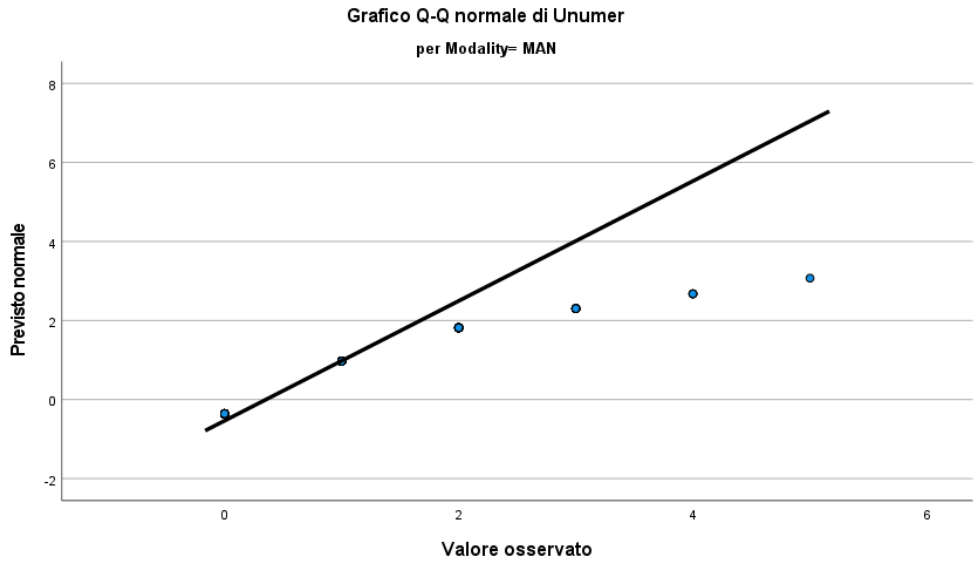


Figura 5.6 – Grafico Q-Q normale della distribuzione dei difetti uomo per le prove svolte in modalità manuale.

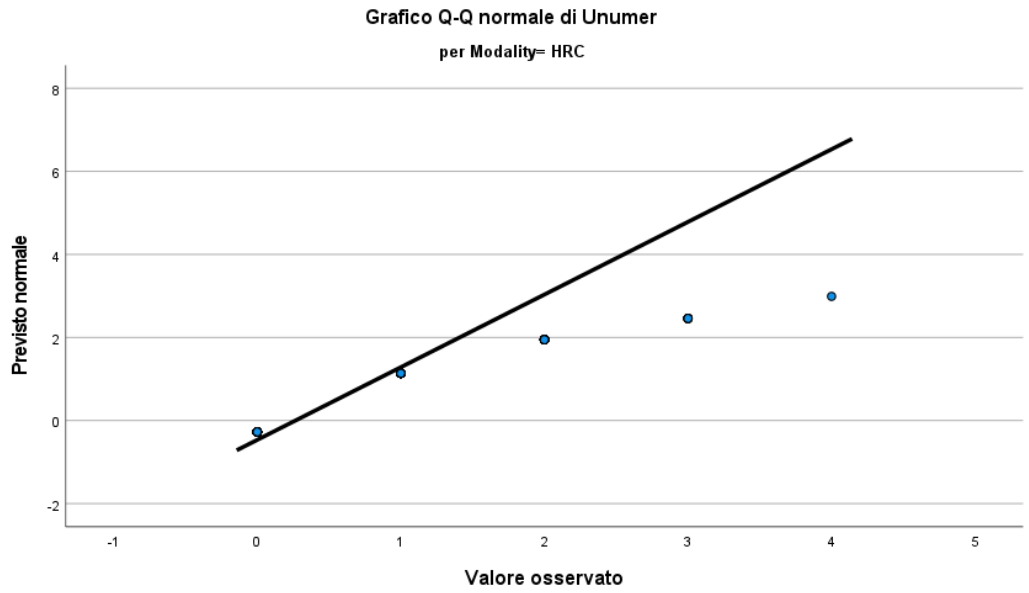


Figura 5.7 – Grafico Q-Q normale della distribuzione dei difetti uomo per le prove svolte in modalità collaborativa.

Entrambi test rifiutano l'ipotesi nulla di normalità delle distribuzioni degli errori nei due campioni, in quanto il p - value è inferiore allo 0,01% e quindi minore del livello di significatività α. Il risultato è confermato anche dai grafici quantile-quantile (Q-Q plot), che rappresentano la distanza tra i quantili di una distribuzione normale, identificati dalla bisettrice rappresentata e i quantili della distribuzione testata. Per entrambe è evidente la distanza con l'andamento della distribuzione normale. Le statistiche descrittive confermano quanto dimostrato dai test d'ipotesi, il coefficiente di asimmetria è positivo per entrambe le popolazioni, si può quindi parlare di asimmetria positiva, la mediana è infatti inferiore alla media, la coda lunga è a destra. L'asimmetria della distribuzione è maggiore per la popolazione delle prove svolte in modalità manuale. Le valutazioni appena effettuate potevano essere dedotte anche dalla semplice osservazione dell'istogramma delle frequenze. La mediana è la medesima per entrambe le modalità, ed è di zero errori, mentre la media campionaria differisce ed è minore nella popolazione delle prove svolte con l'ausilio del cobot.

Test non parametrico a campioni indipendenti

Una volta rigettata l'ipotesi di normalità per entrambe le popolazioni viene effettuato un test non parametrico per determinare l'appartenenza alla stessa distribuzione degli errori. Il test d'ipotesi effettuato è il test U di Mann-Withney, l'ipotesi nulla è come detto precedentemente quella di avere la stessa distribuzione degli errori per entrambe le modalità di esecuzione delle prove, le ipotesi necessarie per effettuare il test sono rispettate in quanto i campioni sono indipendenti e la scala di misurazione è almeno ordinale. Il livello di significatività adottato per il test non parametrico è $\alpha = 5\%$.

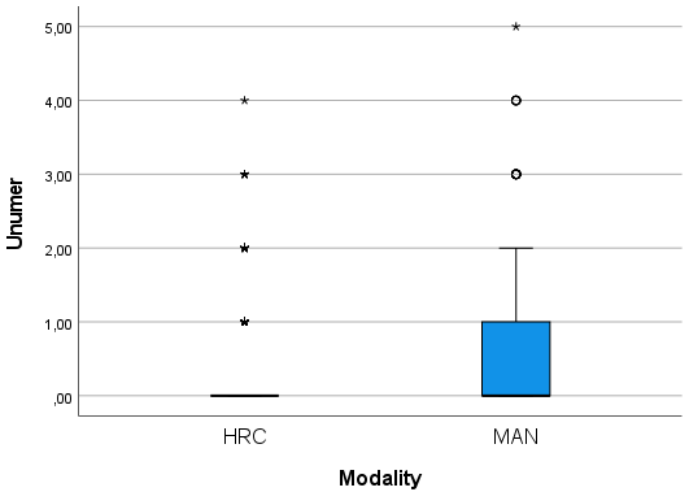


Figura 5.8 – Box plot degli errori dell'uomo nelle due popolazioni

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1659
U di Mann-Whitney	359611,500
W di Wilcoxon	802822,500
Statistica del test	359611,500
Errore standard	7304,662
Statistica del test standardizzato	2,983
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,003

Tabella 5.6 - Tabella riepilogativa Test di Mann-Whitney

Il test U di Mann-Whitney ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla di avere la stessa distribuzione degli errori per entrambe le modalità delle prove, con una significatività pari allo 0,3%, quindi molto minore rispetto al valore α ipotizzato come soglia, l'errore di prima specie è estremamente basso. Dal grafico 5.8 la differenza tra le due distribuzioni è difficilmente visibile, ma il valore della media (Tab 5.4) ci permette di dire che la modalità collaborativa consenta di ridurre il numero medio di difetti uomo. Questò è dovuto alla maggiore intuitività garantita dalla collaborazione, in quanto il cobot suggerisce l'attività successiva da svolgere. A conferma di ciò, come si può notare dalla tabella 5.3, diminuisce la numerosità di errori tipicamente dovuti all'incertezza sull'attività da svolgere, come ad esempio il montaggio errato o la selezione errata di un pezzo.

5.1.2 Analisi di difetti uomo e del robot nelle prove con assemblaggio manuale e collaborativo

Dopo aver dimostrato la presenza di differenze nel numero medio di difetti dell'uomo tra prove svolte in modalità collaborativa e manuale si ricerca la presenza di differenze significative nel numero di difetti generale, cioè senza distinguere i difetti dell'uomo da quelli generati dal cobot. I dati sono stati nuovamente suddivisi in due popolazioni in funzione della modalità di esecuzione della prova. In prima istanza è stato effettuato un test di normalità per i due campioni, e infine un test d'ipotesi con l'ipotesi nulla che i due campioni avessero la stessa distribuzione.

Test di normalità per le due popolazioni

Anche in questo caso sono stati svolti i due test di normalità Kolmogorov – Smirnov e Shapiro Wilk i cui risultati sono mostrati nella Tabella 5.8. Sono state inoltre determinate le statistiche descrittive dei due campioni, per valutare i parametri e la forma della distribuzione.

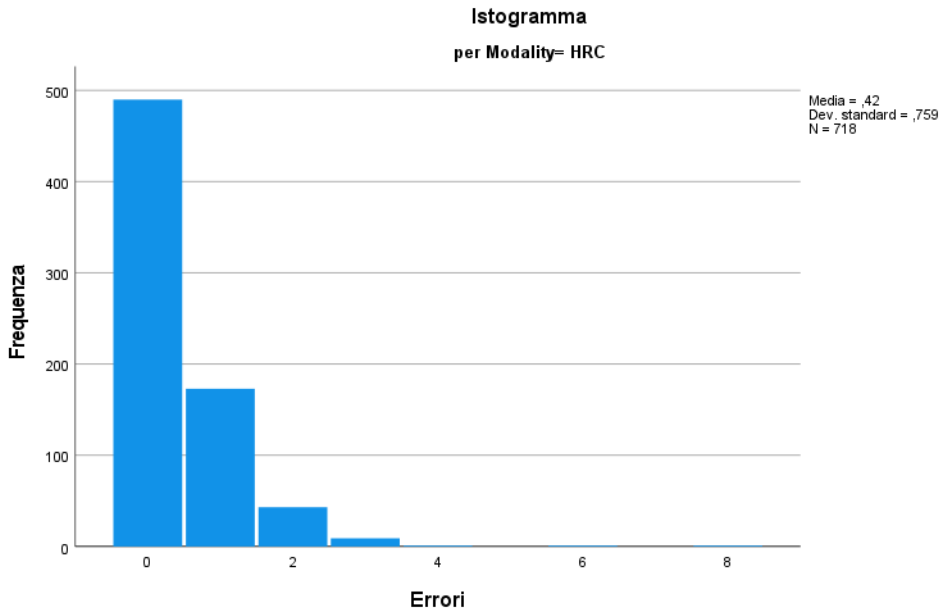


Figura 5.9- Istogramma delle frequenze relative degli errori in modalità collaborativa; Errori: Numero di errori.

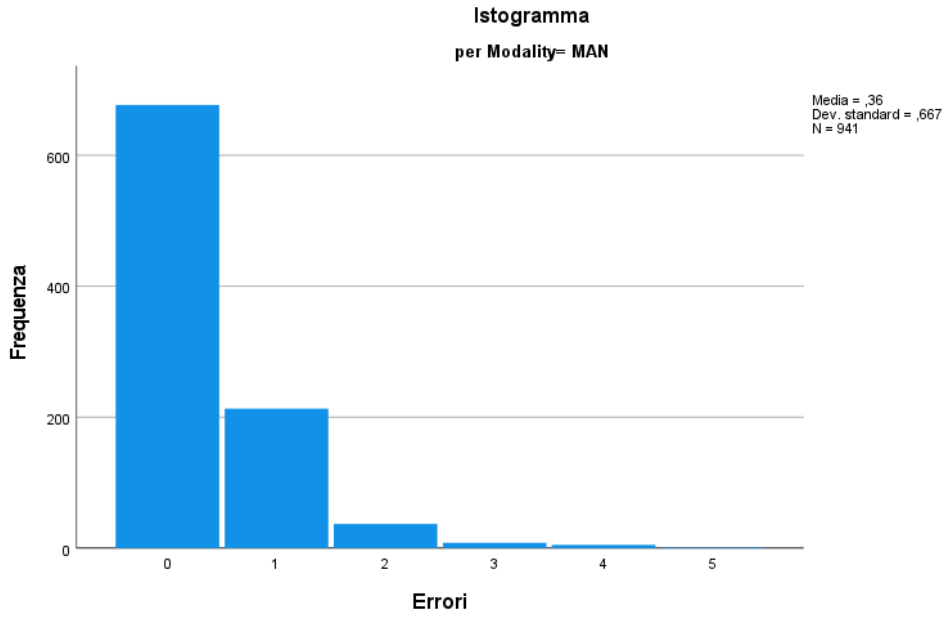


Figura 5.10 - Istogramma delle frequenze relative degli errori in modalità collaborativa; Errori: Numero di errori.

Dai grafici 5.9 e 5.10 è immediatamente visibile la forte asimmetria della distribuzione, che è maggiormente concentrata sulla categoria 0 errori. Il numero di prove svolte in modalità collaborativa è sensibilmente minore, infatti $N_{HRC} = 718$ e $N_{MAN} = 941$, questo spiega parte delle differenze nelle frequenze osservate degli errori.

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
Errori	HRC	Medio		,42	,028
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,37	
			Limite superiore	,48	
		Media ritagliata al 5%		,33	
		Mediana		,00	
		Varianza		,576	
		Deviazione std.		,759	
		Minimo		0	
		Massimo		8	
		Intervallo		8	
		Intervallo interquartile		1	
		Asimmetria		3,108	,091
		Curtosi		18,674	,182
	MAN	Medio		,36	,022
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,31	
			Limite superiore	,40	
		Media ritagliata al 5%		,26	
		Mediana		,00	
		Varianza		,445	
		Deviazione std.		,667	
		Minimo		0	
		Massimo		5	
		Intervallo		5	
		Intervallo interquartile		1	
		Asimmetria		2,442	,080
		Curtosi		8,103	,159

Tabella 5.7 – Statistiche descrittive dei due campioni; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

La tabella 5.7 fornisce informazioni importanti riguardo la media e la mediana delle due distribuzioni, in entrambe infatti la prima è superiore. Si tratta quindi di una distribuzione che presenta un'asimmetria positiva, come confermato anche dal relativo coefficiente. L'intervallo interquartile è uguale a 1 per entrambe le distribuzioni, in quanto il primo quartile si trova sul valore 0, mentre il terzo sul valore 1, la dispersione dei dati è quindi contenuta.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
Errori	HRC	,394	718	<,001	,586	718	<,001
	MAN	,423	941	,000	,577	941	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.8– Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

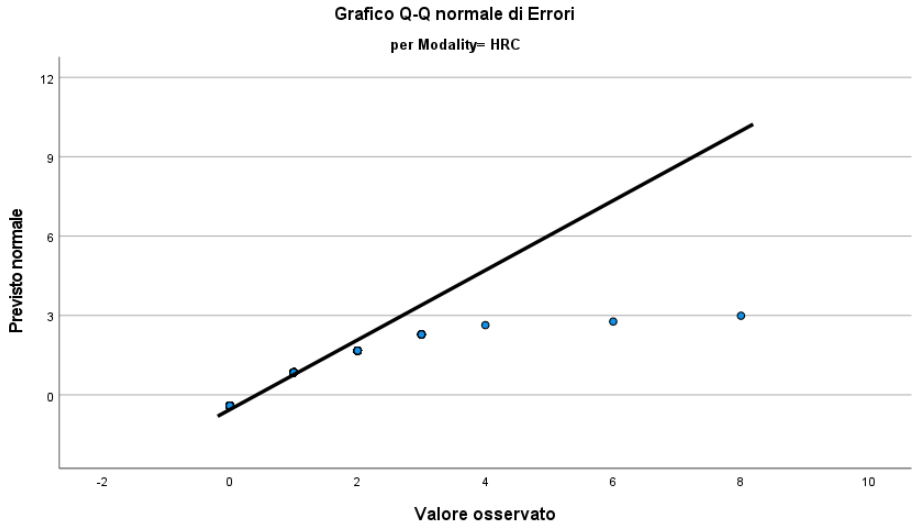


Figura 5.11 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dei difetti per le prove svolte in modalità collaborativa.

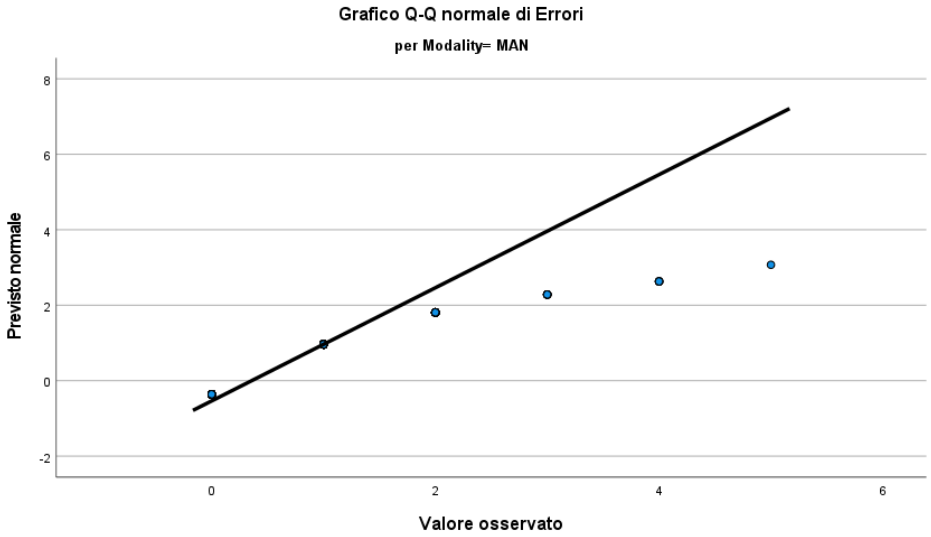


Figura 5.12 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dei difetti uomo per le prove svolte in modalità manuale.

Il test di normalità conferma quanto presentato dagli istogrammi e dalle statistiche descrittive. Sia il test di Kolmogorov - Smirnov che di Shapiro - Wilk permettono di rigettare l'ipotesi nulla di normalità delle due distribuzioni, con un P-value inferiore allo 0,01% per entrambe. L'errore di prima specie nel rifiuto dell'ipotesi nulla è molto basso. Il risultato è confermato anche dai grafici Q-Q dai quali si può notare la sensibile distanza tra la posizione dei quantili di una normale confrontata con quella delle due distribuzioni studiate. In entrambe soltanto il primo quantile è posizionato come in una distribuzione normale, dal secondo in poi inizia ad aumentare il gap tra la bisettrice i quantili delle distribuzioni considerate.

Test non parametrico a campioni indipendenti

Dopo aver rigettato l'ipotesi nulla di normalità per le distribuzioni dei due campioni queste vengono confrontate per valutare l'ipotesi nulla secondo cui la distribuzione degli errori sia la stessa per entrambe le modalità di esecuzione. Il test non parametrico utilizzato è di Mann-Whitney, le ipotesi necessarie sono l'indipendenza dei campioni e la scala di misura dei dati almeno ordinale e sono entrambe rispettate, i risultati sono presentati nella Tabella 5.9.

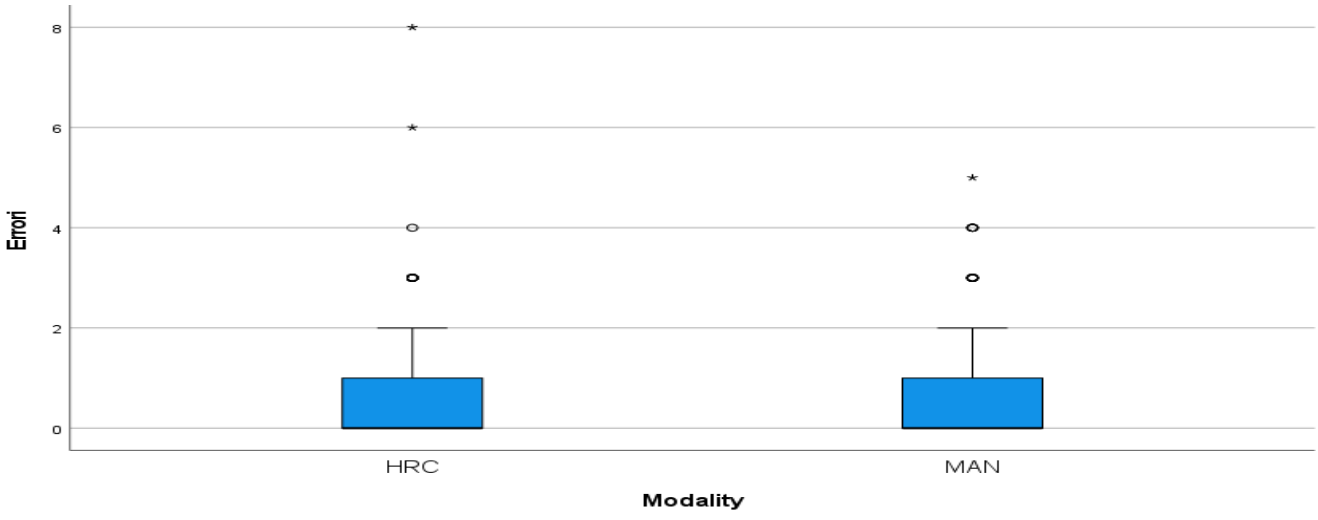


Figura 5.13 - **Box plot degli errori nelle due popolazioni.**

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1659
U di Mann-Whitney	324266,000
W di Wilcoxon	767477,000
Statistica del test	324266,000
Errore standard	7734,207
Statistica del test standardizzato	-1,752
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,080

Tabella 5.9 – Tabella riepilogativa dei risultati del test di Mann – Whitney.

I risultati del test di Mann – Withney mostrano un P-value superiore al valore soglia di significatività stabilito per il rifiuto dell'ipotesi nulla $\alpha = 5\%$. Non è quindi possibile rifiutare l'ipotesi nulla che la difettosità generale delle prove svolte in modalità collaborativa sia uguale a quella delle prove svolte in modalità manuale. La media dei difetti per prova sale, nell'assemblaggio collaborativo, rispetto all'analisi precedente in quanto vengono considerati anche quelli dovuti al cobot, superando così il numero medio di difetti del campione riguardante le prove in assemblaggio manuale. La differenza non è statisticamente significativa, ma proviamo comunque a dargli una spiegazione.

Essa può avere cause di natura diversa: in primo luogo la programmazione delle attività svolte dal cobot deve essere ottimale per rendere efficiente il lavoro dell'operatore umano. Nel processo di assemblaggio in questione, il numero maggiore di difetti è stato riscontrato nella Fase 2, ciò è dovuto alla destrezza necessaria per l'avvitatura in fessure piuttosto strette e alla dimensione dei componenti. Le pinze del cobot hanno ridotto lo spazio di movimento della mano nell'assemblaggio portando l'operatore a muovere il componente bloccato dalle pinze, provocando direttamente gli errori del cobot. La forma del componente utilizzato in questa fase è stata inoltre fonte di problemi, in quanto la presa sarebbe dovuta avvenire in una posizione del componente C2 ben precisa, con una bassissima tolleranza. Imprecisioni anche piccole in fase di asservimento dei componenti sul vassoio hanno provocato errori del robot facilmente evitabili.

5.1.3 Analisi dell'impatto del processo di apprendimento sulla difettosità

Durante l'esperimento osservando gli operatori è stato evidente come la confidenza con il processo di assemblaggio aumentasse durante la sessione, sia dal punto di vista delle velocità che del numero di difetti che è sembrata diminuire sensibilmente nel tempo, con entrambe le modalità di assemblaggio. L'analisi successiva ha l'obiettivo di validare queste osservazioni, attraverso una regressione lineare si va a valutare l'evoluzione della difettosità all'aumentare delle prove. Il modello utilizzato è lineare di probabilità, è stata creata un variabile dipendente dicotomica chiamata "Errore01" a cui è stato assegnato il valore 0 nel caso in cui la prova non presentasse difetti e il valore 1 nel caso in cui ne presentasse almeno uno. La variabile indipendente invece è "Trial" che identifica il numero della prova. La funzione risultato è la seguente, con X che è il numero di prove e Y che invece rappresenta la difettosità, cioè la probabilità di effettuare una prova con almeno un difetto:

$$Y^* = \beta_o + \beta_1 X$$

β_o rappresenta l'intercetta, cioè il valore della difettosità per X = 0, β_1 invece è la variazione attesa di Y quando X varia di un'unità. Il metodo utilizzato dal software SPSS per stimare i valori dei coefficienti a partire da dei dati sperimentali è il metodo dei minimi quadrati ordinari. I valori di β_o e β_1 sono cioè stimati in maniera tale da minimizzare la funzione RSS (somma dei quadrati residui).

$$RSS=$$

$$e_i = Y_i - Y^* = Y_i - \beta_o + \beta_1 X$$

Il software ha inoltre svolto un test d'ipotesi con H_o: $\beta_1 = 0$ e H_1: $\beta_1 \neq 0$, ciò ha permesso di valutare l'esistenza di un'influenza effettiva della variabile X sulla Y.

5.1.3.1 Analisi dell'evoluzione della difettosità senza distinzione tra le modalità di svolgimento delle prove

La prima analisi ha indagato la difettosità senza distinzioni tra i processi svolti in modalità collaborativa o manuale ed ha presentato i seguenti risultati:

Riepilogo elaborazione casi

	N
Casi totali	1659
Casi esclusi[a]	0
Casi previsti	0
Casi di nuova creazione	0

a. I casi con un valore mancante in qualsiasi variabile vengono esclusi dall'analisi.

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: Errori01

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri	
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1
Lineare	,015	26,070	1	1657	<,001	,386	-,003

La variabile indipendente è Trial.

Tabella 5.10 Stime dei parametri del modello lineare di probabilità.

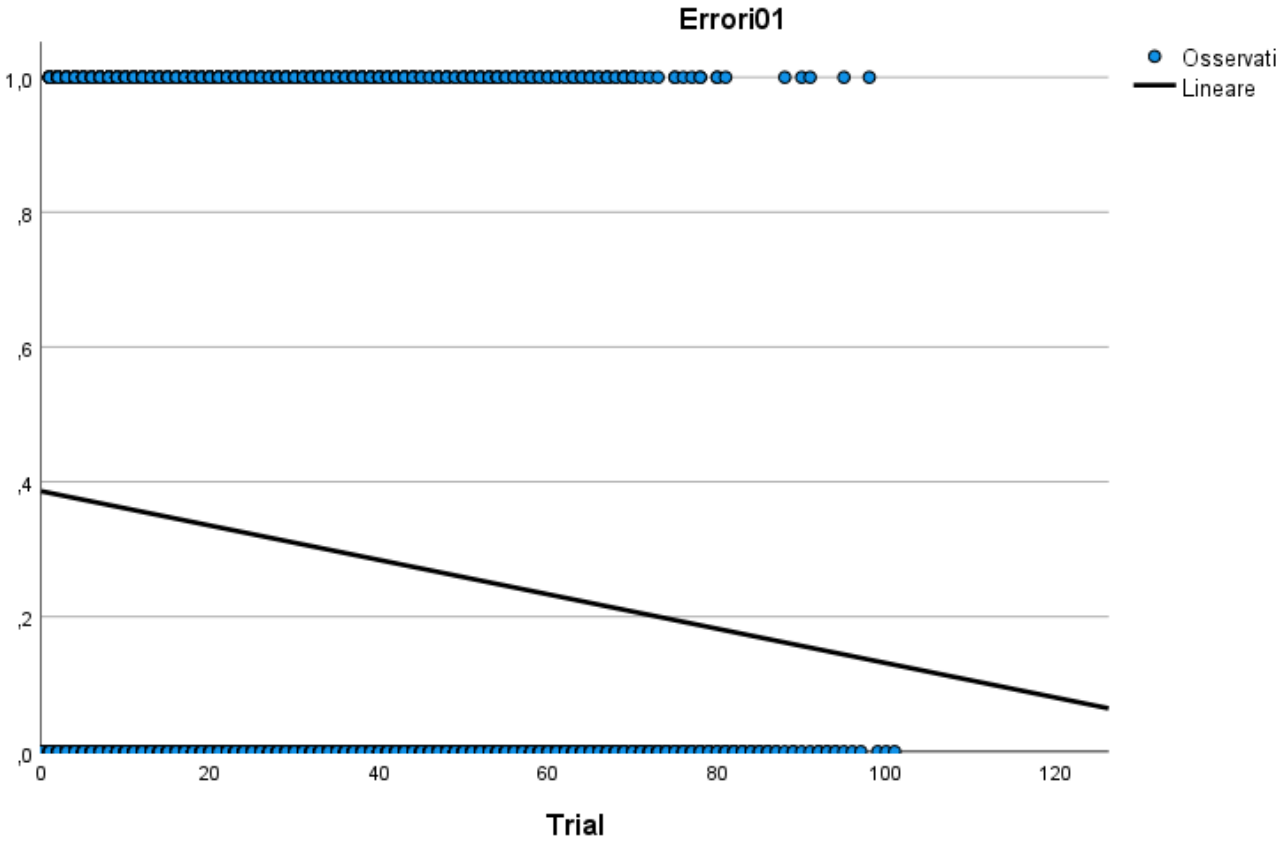


Figura 5.14 – Modello lineare della difettosità all'aumentare del numero di prove.

I risultati della Tabella 5.1 ci hanno permesso di rifiutare l'ipotesi nulla H_o: $\beta_1 = 0$, in quanto il P- value è inferiore allo 0,1% e quindi minore del livello di significatività α. L'errore di prima specie nel rifiutare l'ipotesi nulla è molto basso. Si può quindi affermare che il numero di prove già effettuate influenzi la probabilità di svolgere un assemblaggio con almeno un difetto. Il coefficiente è $\beta_1 = -0{,}003$, come si può notare anche dalla retta del Grafico 5.13 la difettosità e il numero delle prove sono inversamente proporzionali, l'operatore è soggetto ad un processo di apprendimento che gli permette di migliorare la propria destrezza, memorizzare la sequenza delle attività e delle regole di assemblaggio, per questo motivo la probabilità di incorrere in almeno un difetto diminuisce dello 0,3% ad ogni prova.

5.1.3.2 Analisi dell'evoluzione della difettosità in modalità HRC e MAN

L'analisi prosegue dividendo in due parti il database in funzione della variabile "Modality" che indica la modalità di esecuzione della prova. Il confronto mira a quantificare eventuali differenze nel processo di apprendimento dell'operatore.

Per entrambe è stata svolta una regressione lineare dei dati a disposizione attraverso il software statistico SPSS, è stato utilizzato il modello lineare di probabilità. La regressione ha portato alla determinazione dei coefficienti delle rette, e al rigetto dell'ipotesi nulla H_0: $\beta_1 = 0$ attraverso un test F. Di seguito sono riportati i risultati delle analisi svolte:

Modalità collaborativa

Riepilogo elaborazione casi

	N
Casi totali	718
Casi esclusi[a]	0
Casi previsti	0
Casi di nuova creazione	0

a. I casi con un valore mancante in qualsiasi variabile vengono esclusi dall'analisi.

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: Errori01

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri	
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1
Lineare	,007	5,346	1	716	,021	,380	-,002

La variabile indipendente è Trial.

Tabella 5.11 – Riepilogo del modello e stime dei parametri della regressione lineare per i dati delle prove svolte in modalità HRC.

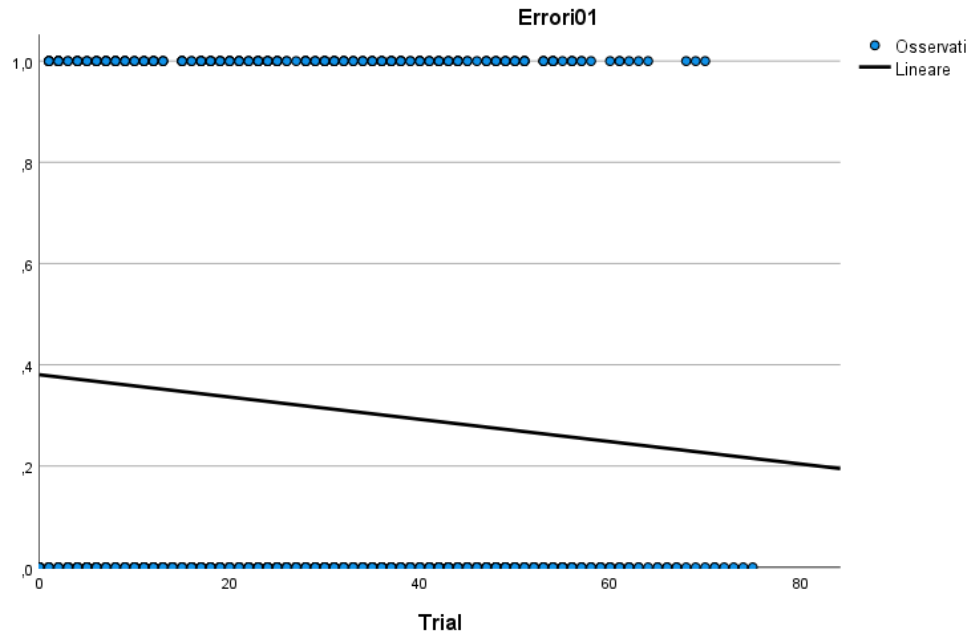


Figura 5.15 – Modello lineare della difettosità all'aumentare del numero di prove svolte in modalità HRC.

I risultati della Tabella 5.11 e del Grafico 5.14 dimostrano la presenza di un processo di apprendimento anche nelle prove svolte in modalità collaborativa, infatti il Test F ci permette di ottenere un P-value=0,021 , che è minore del livello di significativà minimo richiesto per rigettare l'ipotesi nulla. Il coefficiente β_1 è significativamente diverso da zero, ciò testimonia l'influenza della variabile indipendente sulla dipendente. In particolare β_1 è minore di zero, ciò significa che la difettosità diminuisce all'aumentare del numero di prove, tale valore è però inferiore al valore trovato nell'analisi complessiva effettuata senza distinzione tra le modalità.

Modalità manuale

Riepilogo elaborazione casi

	N
Casi totali	941
Casi esclusi[a]	0
Casi previsti	0
Casi di nuova creazione	0

a. I casi con un valore mancante in qualsiasi variabile vengono esclusi dall'analisi.

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: Errori01

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri	
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1
Lineare	,020	19,226	1	939	<,001	,386	-,003

La variabile indipendente è Trial.

Tabella 5.12 – Riepilogo del modello e stime dei parametri della regressione lineare per i dati delle prove svolte in modalità Manuale.

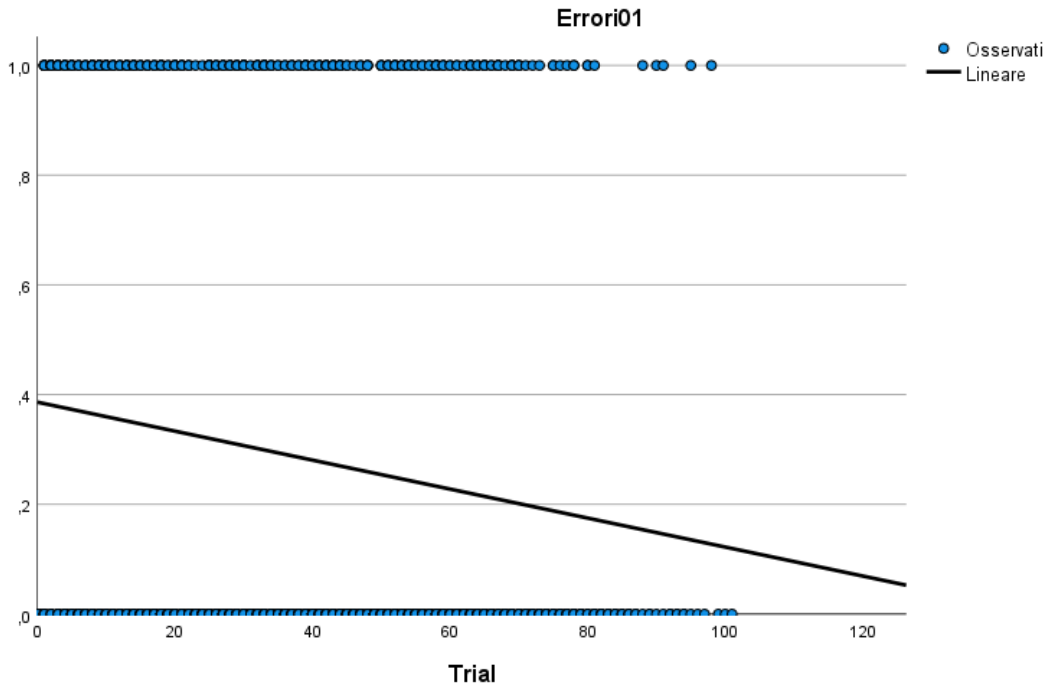


Figura 5.16 – Modello lineare della difettosità all'aumentare del numero di prove svolte in modalità Manuale.

La Tabella 5.12 e il Grafico 5.15 dimostrano la presenza di un processo di apprendimento anche nelle prove svolte in modalità manuale. Il test T ha un P-value minore di 0,001; quindi molto inferiore al livello di significatività richiesto α=0,05 per rigettare l'ipotesi nulla, l'errore di prima specie è estremamente basso, ed è quindi possibile affermare che il coefficiente β_1 sia significativamente diverso da zero. Come nel caso della modalità collaborativa anche in questo caso la difettosità è inversamente proporzionale al numero di prove svolte, in quanto β_1=-0,003. L'effetto sulla difettosità dovuto all'apprendimento sembra essere minore nelle prove svolte in modalità collaborativa.

5.2 Analisi dei parametri fisiologici

Le analisi effettuate in questo sottoparagrafo hanno come obiettivo la valutazione dello stato emotivo dell'operatore, sono indagate eventuali differenze dovute alla modalità di svolgimento delle prove oppure alla presenza o assenza di errori. Ciò permette di capire se la presenza di difetti abbia un effetto sullo stato emotivo dell'operatore, causando uno stato d'ansia dovuto alla performance. I parametri indagati sono quattro, due appartengono alla valutazione dell'EDA e sono il numero di risposte della conduttanza cutanea (Nscr) e la media della conduttanza cutanea durante la prova (Mean-SCR). Gli altri due invece riguardano l'HRV e sono l'RMSSD e l'SDNN.

5.2.1 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in base alla modalità di svolgimento delle prove

L'obiettivo di questa indagine è di indagare la presenza di differenze significative nel carico di lavoro sull'operatore, sia fisico che emotivo, in base alla modalità di svolgimento delle attività. Una prerogativa dell'HRC e dell'industria 5.0 è come abbiamo visto quella di spostare il carico di lavoro dall'uomo al cobot, diminuendo così lo stress fisico ed emotivo a cui l'operatore è sottoposto. Le variabili di risposta dello studio sono i quattro parametri fisiologici definiti nell'introduzione a questo capitolo. La variabile esplicativa invece è la modalità di esecuzione, definita su una scala nominale. Il database è stato diviso in due parti in funzione delle variabili esplicative e sono stati quindi definiti due campioni per ogni variabile di risposta. La prima fase dell'analisi è volta all'indagine sulla normalità delle distribuzioni trovate, come nei capitoli riguardanti gli errori il test di normalità è stato svolto dal software statistico SPSS e insieme ad esso sono state elaborate le statistiche descrittive, gli istogrammi e diagrammi Q-Q. Di seguito sono riportati i risultati, divisi per parametro fisiologico.

5.2.1.1 Parametro fisiologico RMSSD

Test di normalità e statistiche descrittive:

Riepilogo elaborazione casi

		Casi					
		Valido		Mancante		Totale	
	Modality	N	Percentuale	N	Percentuale	N	Percentuale
RMSSD	HRC	540	75,2%	178	24,8%	718	100,0%
	MAN	579	61,5%	362	38,5%	941	100,0%

Tabella 5.12 - Riepilogo elaborazione casi per la variabile di risposta *RMSSD*

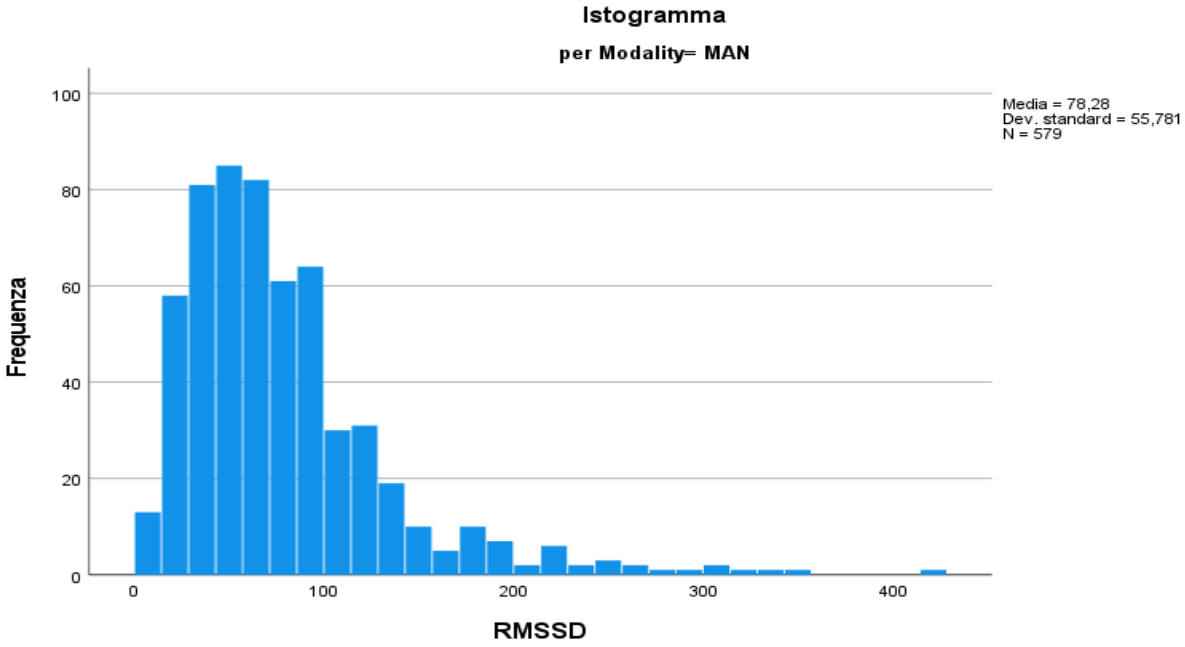


Figura 5.17 – Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico RMSSD nelle prove svolte in modalità manuale. La variabile RMSSD è misurata in millisecondi(ms).

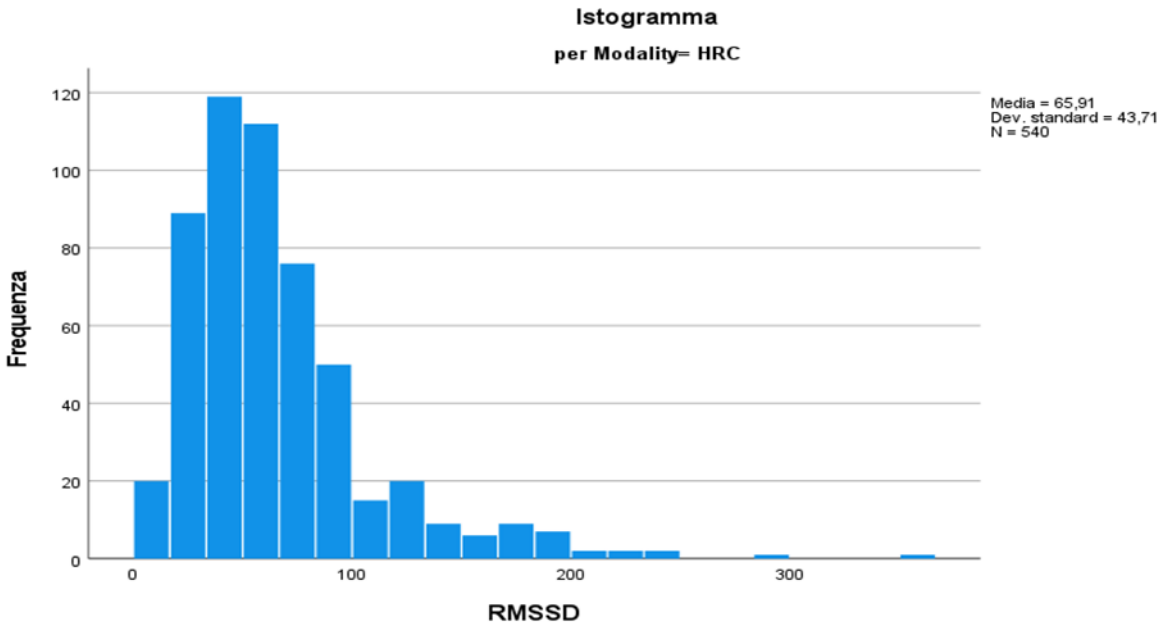


Figura 5.18 – Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico RMSSD nelle prove svolte in modalità collaborativa. La variabile RMSSD è misurata in millisecondi(ms).

Entrambi gli istogrammi presentano una certa asimmetria, con un picco per valori dell'RMSSD che stanno all'interno dell'intervallo 33,32 - 49,96, che rappresenta la moda. La distribuzione poi presenta una coda destra lunga rispetto alla sinistra, che invece è molto più concentrata, cioè contiene delle categorie con frequenze maggiori.

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
RMSSD	HRC	Medio		65,91	1,881
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	62,22	
			Limite superiore	69,61	
		Media ritagliata al 5%		61,45	
		Mediana		55,52	
		Varianza		1910,579	
		Deviazione std.		43,710	
		Minimo		0	
		Massimo		360	
		Intervallo		360	
		Intervallo interquartile		42	
		Asimmetria		2,065	,105
		Curtosi		6,791	,210
	MAN	Medio		78,28	2,318
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	73,72	
			Limite superiore	82,83	
		Media ritagliata al 5%		72,61	
		Mediana		66,29	
		Varianza		3111,545	
		Deviazione std.		55,781	
		Minimo		0	
		Massimo		418	
		Intervallo		418	
		Intervallo interquartile		55	
		Asimmetria		1,946	,102
		Curtosi		5,740	,203

Tabella 5.13 – Statistiche descrittive dei due campioni per la variabile di risposta RMSSD; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

Come si può osservare dal coefficiente di asimmetria entrambe le distribuzioni presentano un'asimmetria positiva; infatti, la media è maggiore della mediana, questo conferma quanto precedentemente detto, osservando gli istogrammi, sulla presenza di una coda lunga a destra. L'intervallo interquartile della distribuzione dell'RMSSD nelle prove in modalità manuale è maggiore rispetto a quello per le prove svolte in modalità collaborativa. La media campionaria dell'RMSSD e la mediana sono maggiori per il campione delle prove svolte in modalità manuale.

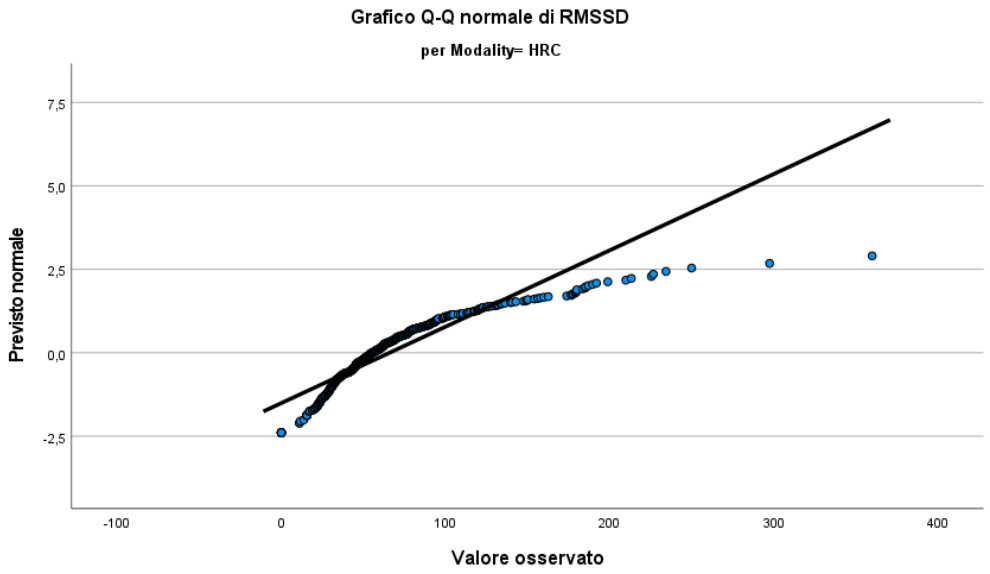


Figura 5.19 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'RMSSD per le prove svolte in modalità manuale.

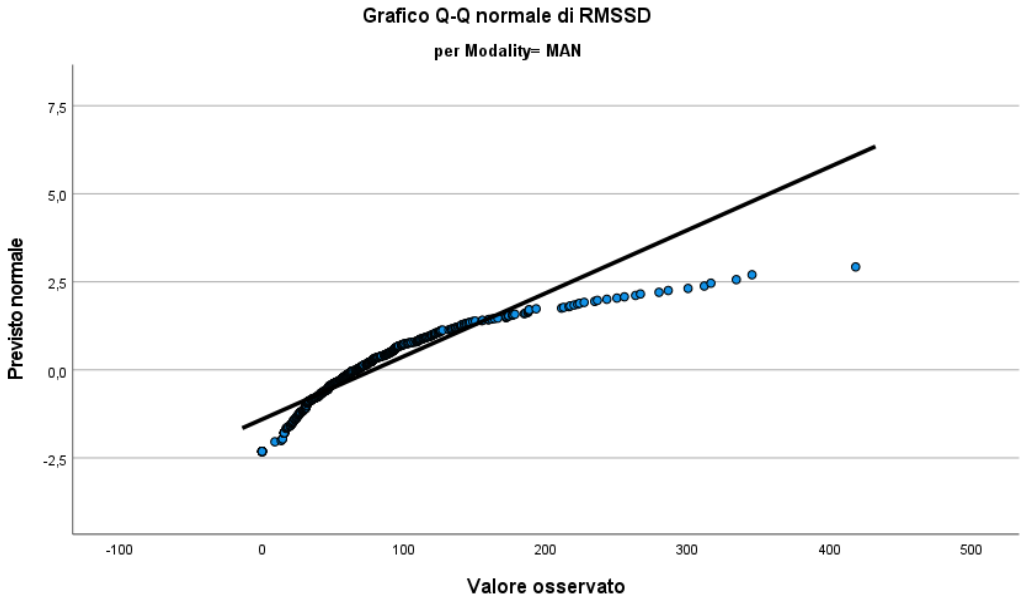


Figura 5.20 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'RMSSD per le prove svolte in modalità manuale.

I grafici Q-Q ci permettono di effettuare una valutazione visiva sulla normalità delle due distribuzioni, entrambe si discostano significativamente dai quantili della normale e lo fanno

in maniera sempre più evidente all'aumentare dei quantili, ciò è dovuto alla coda lunga della distribuzione a destra, che sembra far differire la distribuzione da una normale.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
RMSSD	HRC	,138	540	<,001	,837	540	<,001
	MAN	,127	579	<,001	,848	579	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.14– Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

Entrambi i test di normalità svolti presentano un P-value molto basso, ciò ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla di normalità in quanto il livello di significatività stabilito come soglia per il rifiuto dell'ipotesi nulla è $\alpha = 0{,}05$, in entrambi i test il p – value per entrambe le modalità è inferiore a 0,001 e quindi minore di α. In conclusione, possiamo rifiutare l'ipotesi nulla con un errore di prima specie molto piccolo.

Test non parametrico a campioni indipendenti del parametro fisiologico RMSSD:

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1119
U di Mann-Whitney	177355,000
W di Wilcoxon	345265,000
Statistica del test	177355,000
Errore standard	5401,906
Statistica del test standardizzato	3,892
Sign. asintotica (test a 2 vie)	<,001

Tabella 5.15 – Risultati del test U di Mann-Whitney per la distribuzione di RMSSD sui due campioni.

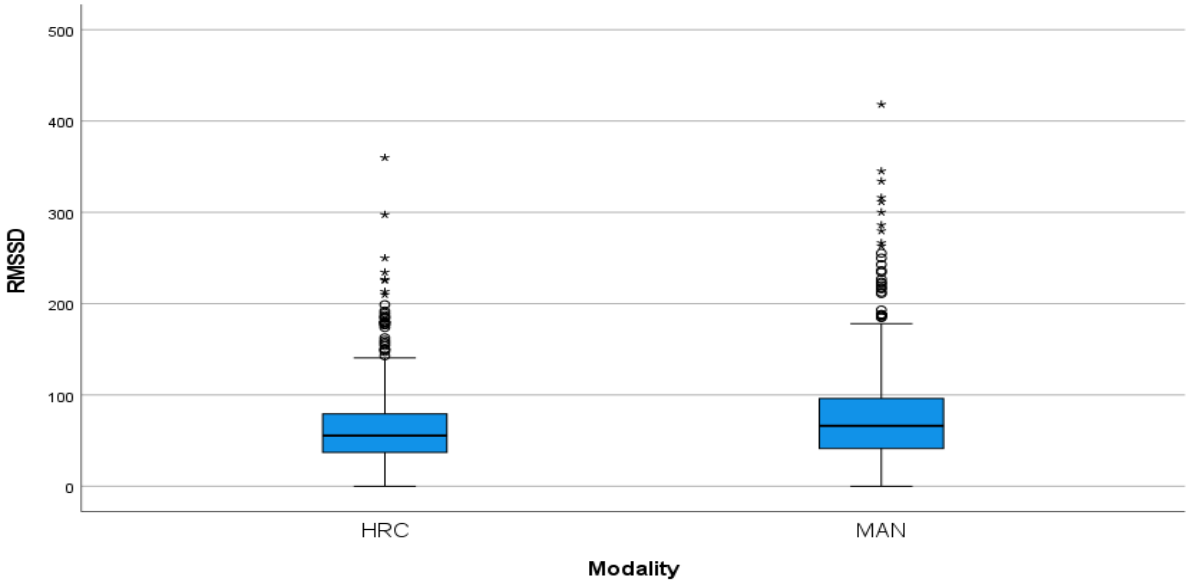


Figura 5.21 – Box plot della distribuzione di RMSSD sui due campioni. La variabile RMSSD è misurata in millisecondi(ms).

Per la valutazione della distribuzione di RMSSD sui due campioni, è stato utilizzato un test non parametrico, in quanto è stata rigettata l'ipotesi di normalità delle due distribuzioni analizzate. Il test U di Mann-Whitney ha come ipotesi l'indipendenza dei campioni e che i dati siano rappresentabili su una scala almeno ordinale, entrambe le ipotesi sono rispettate per le distribuzioni testate. Il P-value del test è inferiore al livello di significatività $\alpha = 0{,}05$, è quindi possibile rigettare l'ipotesi nulla per cui la distribuzione di RMSSD sia la stessa in entrambi i campioni, è quindi presente una differenza statisticamente significativa. Il valore dell'RMSSD è statisticamente inferiore nell'assemblaggio effettuato con l'ausilio del robot, come detto in precedenza valori più bassi di questo parametro segnalano un maggiore stress psicofisico. La differenza tra i due valori può essere dovuta all'iniziale mancanza di fiducia nei confronti del movimento del robot, che può indurre uno stato di stress; tuttavia, entrambi i valori della media campionaria risultano perfettamente dentro il range auspicabile dell'RMSSD [50].

5.2.1.2 Parametro fisiologico SDNN

Test di normalità e statistiche descrittive

Riepilogo elaborazione casi

		Casi					
		Valido		Mancante		Totale	
	Modality	N	Percentuale	N	Percentuale	N	Percentuale
SDNN	HRC	532	74,1%	186	25,9%	718	100,0%
	MAN	569	60,5%	372	39,5%	941	100,0%

Tabella 5.16 – Tabella di riepilogo dei dati utilizzati per il test di normalità.

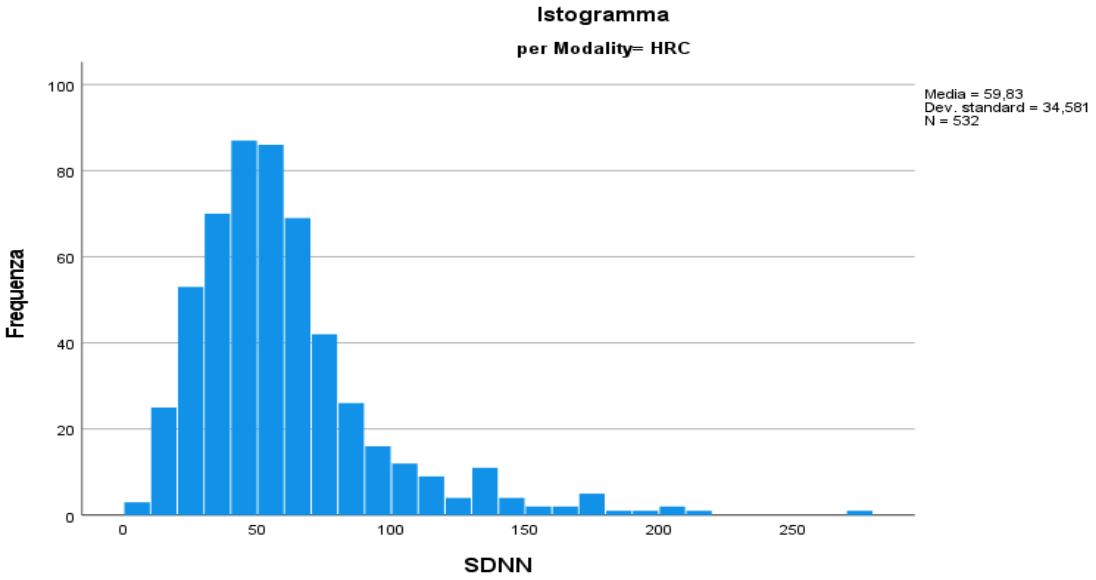


Figura 5.22 - Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico SDNN nelle prove svolte in modalità collaborativa. La variabile SDNN è misurata in millisecondi(ms).

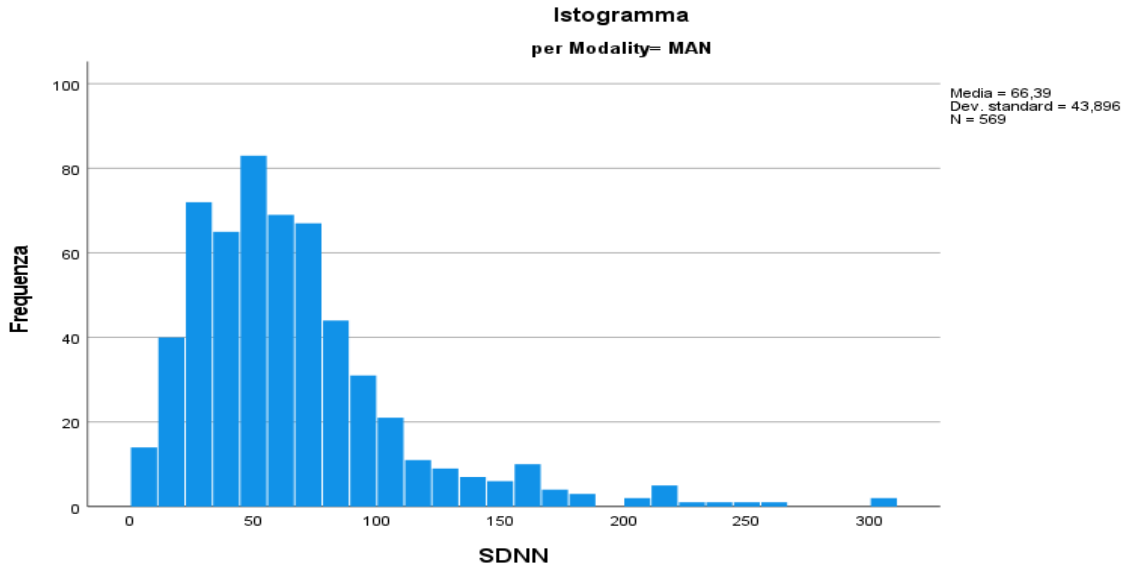


Figura 5.23 - Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico SDNN nelle prove svolte in modalità collaborativa. La variabile SDNN è misurata in millisecondi(ms).

Gli istogrammi mostrano come le distribuzioni dell'SDNN indipendentemente dalla variabile esplicativa presentino un'asimmetria positiva; infatti, in entrambe le distribuzioni la mediana è minore della media campionaria. La distribuzione dell'SDNN nella popolazione con prove svolte in modalità collaborativa sembra avere una maggiore simmetria rispetto a quella con prove svolte in modalità manuale.

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
SDNN	HRC	Medio		59,83	1,499
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	56,88	
			Limite superiore	62,77	
		Media ritagliata al 5%		56,56	
		Mediana		53,27	
		Varianza		1195,824	
		Deviazione std.		34,581	
		Minimo		9	
		Massimo		272	
		Intervallo		263	
		Intervallo interquartile		33	
		Asimmetria		1,829	,106
		Curtosi		5,214	,211
	MAN	Medio		66,39	1,840
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	62,77	
			Limite superiore	70,00	
		Media ritagliata al 5%		61,92	
		Mediana		56,76	
		Varianza		1926,895	
		Deviazione std.		43,896	
		Minimo		0	
		Massimo		307	
		Intervallo		307	
		Intervallo interquartile		46	
		Asimmetria		1,880	,102
		Curtosi		5,164	,204

Tabella 5.17 – Statistiche descrittive dei due campioni per la variabile di risposta SDNN (ms); MAN: prove manuali, HRC: prove collaborative.

Le statistiche descrittive confermano quanto già osservabile dagli istogrammi delle frequenze, con un coefficiente di asimmetria simile anche se leggermente minore per la distribuzione dell'SDNN nelle prove collaborative. Il coefficiente di asimmetria è inoltre sensibilmente

minore per entrambe le distribuzioni rispetto a quello dell'RMSSD, ciò è osservabile anche dal semplice confronto tra gli istogrammi delle frequenze. Le mediane delle due distribuzioni sono più vicine rispetto a quanto lo fossero quelle dell'RMSSD, ma l'assemblaggio manuale continua a presentare valori della media campionaria e della mediana migliori rispetto all'HRC.

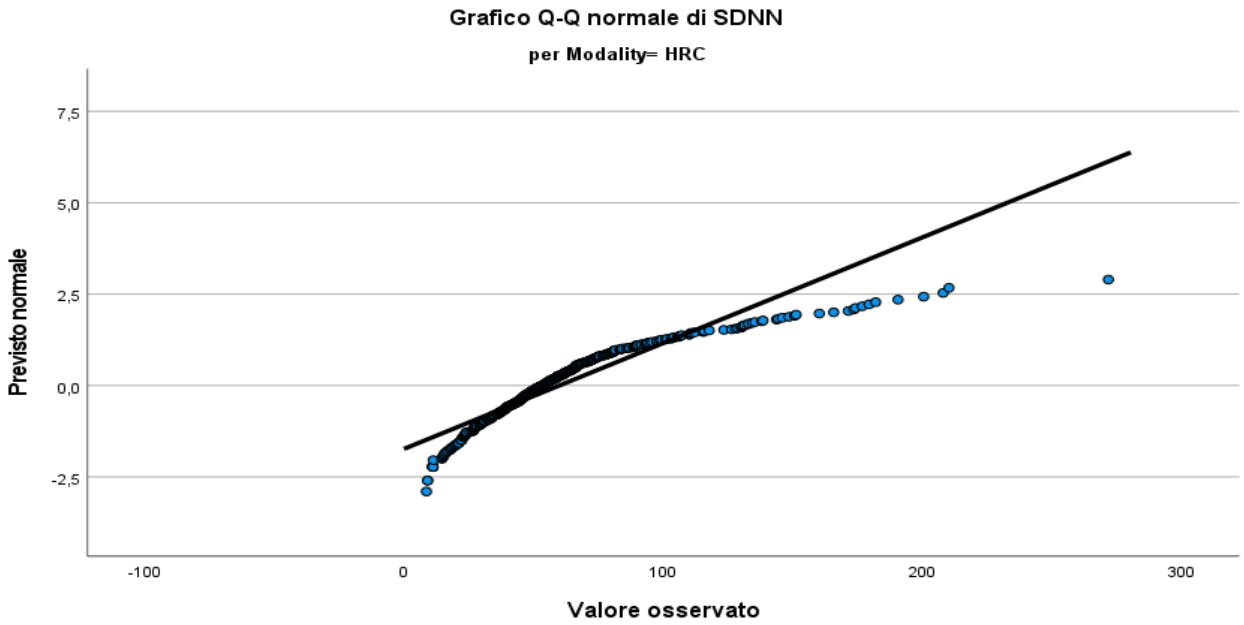


Figura 5.24 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'SDNN per le prove svolte in modalità manuale. manuale.

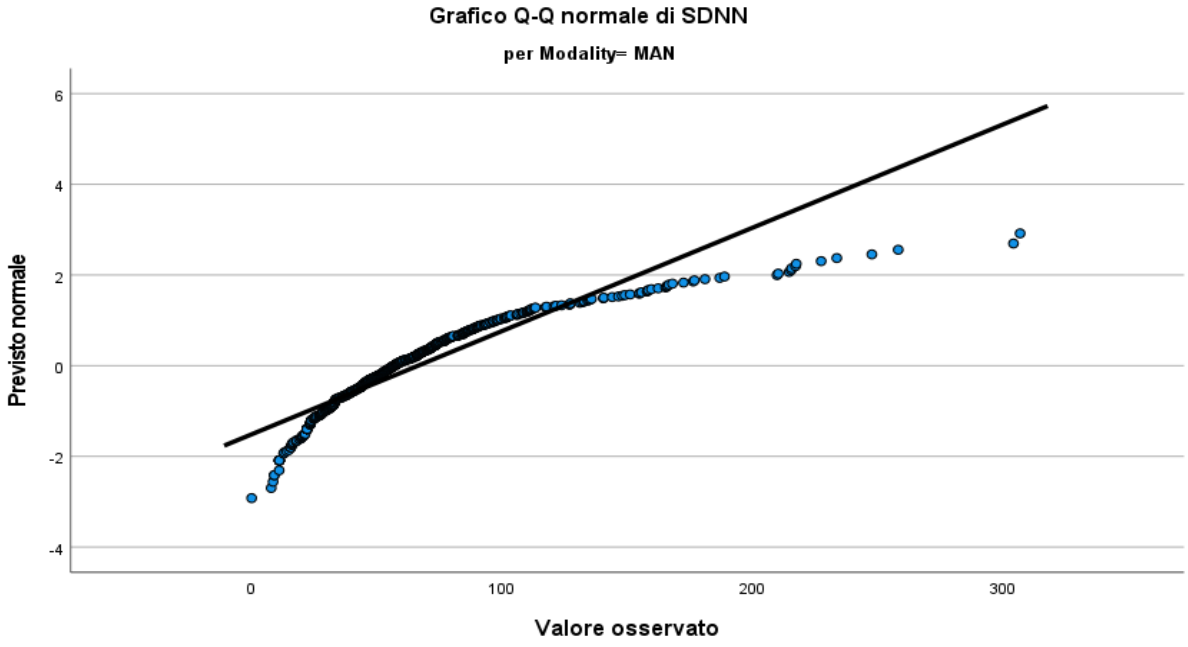


Figura 5.25 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'SDNN per le prove svolte in modalità manuale.

I grafici Q-Q ci permettono di effettuare una valutazione visiva sulla normalità delle due distribuzioni, entrambe si discostano sensibilmente della normale e lo fanno in maniera sempre più evidente all'aumentare dei quantili, ciò è dovuto alla coda lunga della distribuzione a destra.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
SDNN	HRC	,135	532	<,001	,863	532	<,001
	MAN	,124	569	<,001	,851	569	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.18– Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

I due test di normalità confermano quanto osservato dai grafici precedentemente descritti, viene infatti rigettata l'ipotesi nulla di normalità per entrambe le distribuzioni, il p-value è minore del livello di significatività $\alpha = 0{,}05$ adottato.

Test non parametrico a campioni indipendenti di Mann-Whitney

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1101
U di Mann-Whitney	161846,000
W di Wilcoxon	324011,000
Statistica del test	161846,000
Errore standard	5272,386
Statistica del test standardizzato	1,990
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,047

Tabella 5.19 – Risultati del test U di Mann-Whitney per la distribuzione di SDNN sui due campioni.

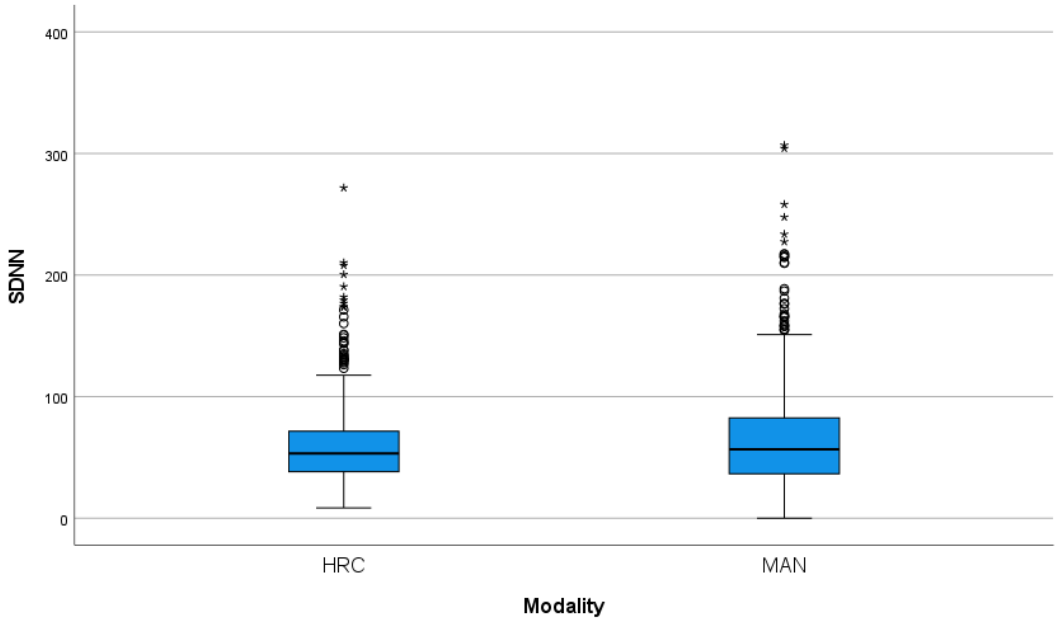


Figura 5.26 – Box plot della distribuzione di SDNN sui due campioni. Asse x : Modalità della prova; Asse y: SDNN(ms).

Dopo aver rifiutato l'ipotesi di normalità si procede al confronto tra le due popolazioni per testare l'ipotesi nulla che abbiano la stessa distribuzione di SDNN. Il test U di Mann-Whitney ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla, in quanto il p-value del test è inferiore al livello di significatività $\alpha=0,05$ definito come valore soglia per il rifuto. Dal grafico 5.4 è osservabile che la distribuzione dell'SDNN per le prove svolte in modalità manuale ha una mediana maggiore. Ciò conferma quanto provato per l'RMSSD , possiamo dire che isolando l'HRV gli operatori abbiano mostrato una migliore tolleranza alle prove svolte in modalità manuale. Come nel caso dell'RMSSD anche il valore medio dell'SDNN ottenuto rientra comunque nel range di normalità fisiologica anche per l'assemblaggio collaborativo [50].

5.2.1.3 Parametro fisiologico SCR medio per prova

Test di normalità e statistiche descrittive:

Riepilogo elaborazione casi

		Casi					
		Valido		Mancante		Totale	
	Modality	N	Percentuale	N	Percentuale	N	Percentuale
Mean_SCR	HRC	559	77,9%	159	22,1%	718	100,0%
	MAN	709	75,3%	232	24,7%	941	100,0%

Tabella 5.20 – Tabella riepilogo casi.

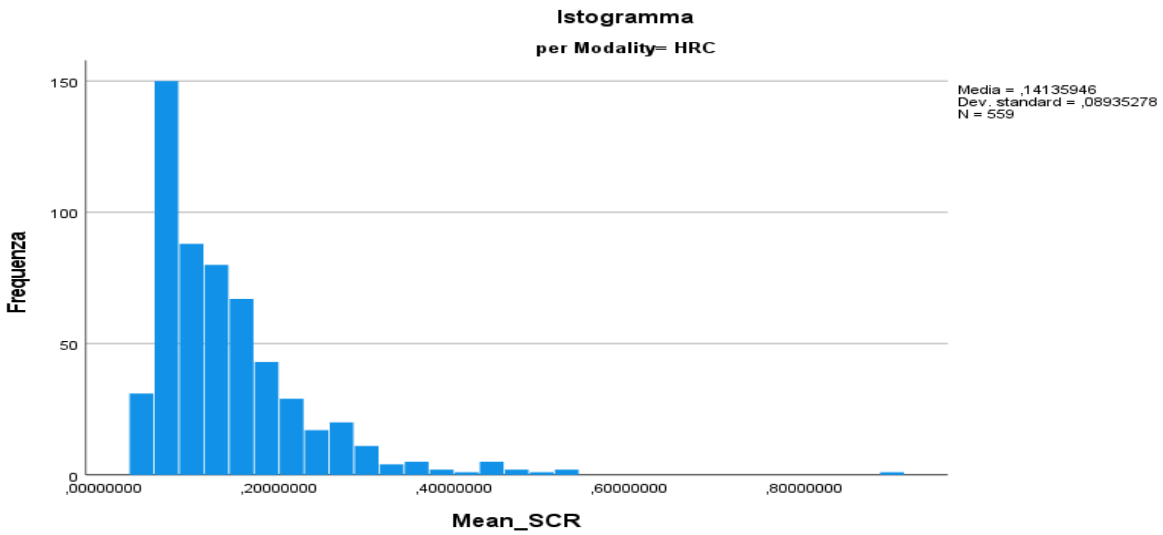


Figura 5.27 - Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico SCR nelle prove svolte in modalità collaborativa. La variabile SCR medio è misurata in Microsiemens (µS).

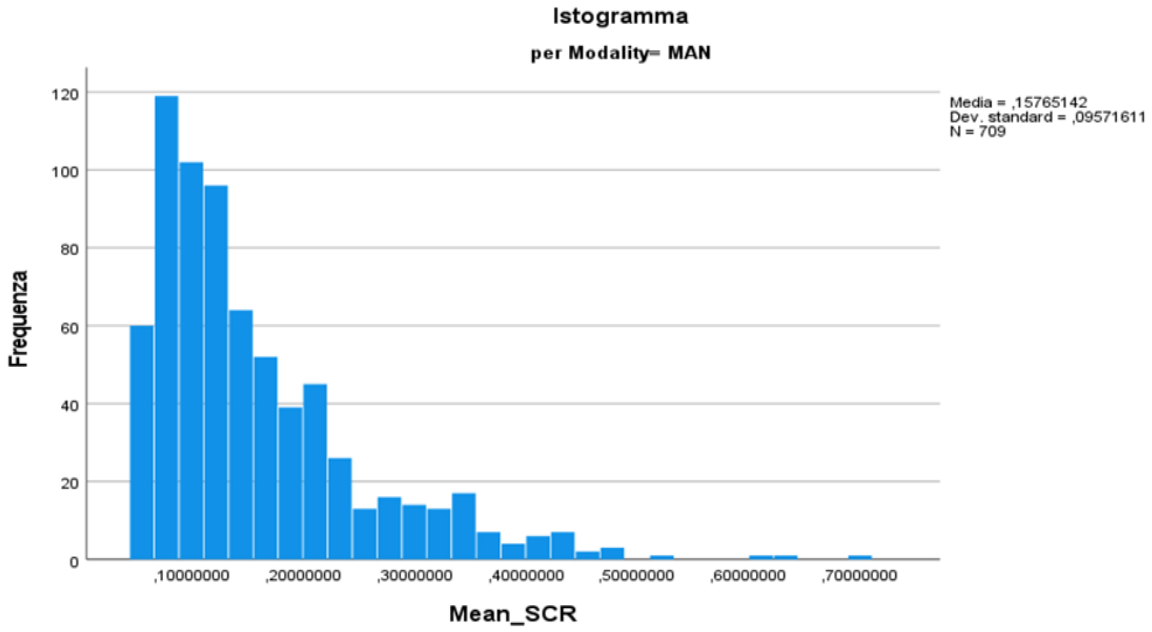


Figura 5.28 - Istogramma delle frequenze del parametro fisiologico SCR nelle prove svolte in modalità manuale. La variabile SCR medio è misurata in Microsiemens (µS).

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
Mean_SCR	HRC	Medio		,1413594635	,00377921979
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,1339362276	
			Limite superiore	,1487826994	
		Media ritagliata al 5%		,1313866262	
		Mediana		,1173200000	
		Varianza		,008	
		Deviazione std.		,08935277700	
		Minimo		,05010000	
		Massimo		,91280000	
		Intervallo		,86270000	
		Intervallo interquartile		,09501111	
		Asimmetria		2,529	,103
		Curtosi		12,096	,206
	MAN	Medio		,1576514246	,00359469409
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	,1505938888	
			Limite superiore	,1647089604	
		Media ritagliata al 5%		,1480477739	
		Mediana		,1270500000	
		Varianza		,009	
		Deviazione std.		,09571611325	
		Minimo		,05010000	
		Massimo		,70489695	
		Intervallo		,65479695	
		Intervallo interquartile		,11140848	
		Asimmetria		1,681	,092
		Curtosi		3,593	,183

Tabella 5.21 - Statistiche descrittive dei due campioni per la variabile di risposta SCR medio; MAN: prove manuali, HRC: prove collaborative.

L'andamento della distribuzione dell'SCR medio in entrambe le modalità segue quello dei precedenti parametri. In entrambi i casi infatti la mediana è minore della media, è quindi presente un'asimmetria positiva, con una coda lunga a destra. I cofficienti di asimmetria in questo caso differiscono in maniera maggiore rispetto ai parametri fisiologici studiati finora. La distribuzione dell'SCR medio nella modalità collaborativa ha un'asimmetria minore rispetto a tutte le distribuzioni incontrate fino ad ora. Discorso opposto invece per la distribuzione dell'SCR medio per le prove manuali,che invece presenta il coefficiente di asimmetria maggiore tra tutte le distribuzioni analizzate fino ad ora. L'intervallo interquartile

evidenzia come la distribuzione dell'SCR medio con modalità manuale presenti una dispersione minore rispetto a quella delle prove con modalità collaborativa.

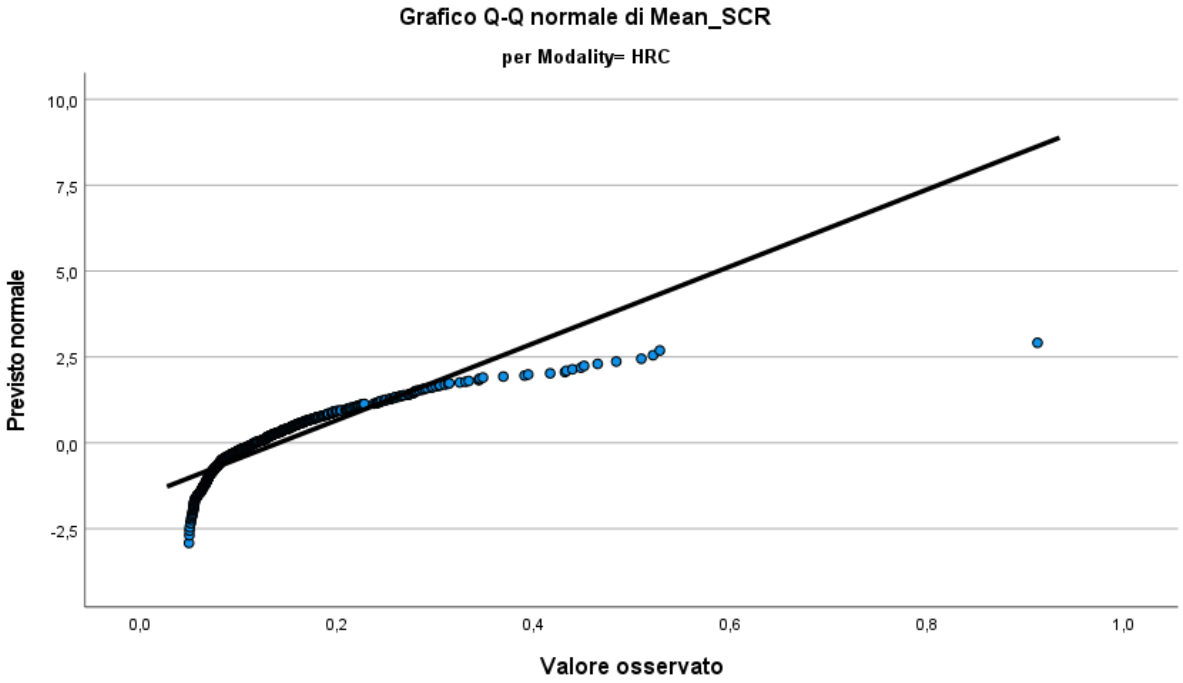


Figura 5.29 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'SCR medio nelle prove svolte in modalità collaborativa.

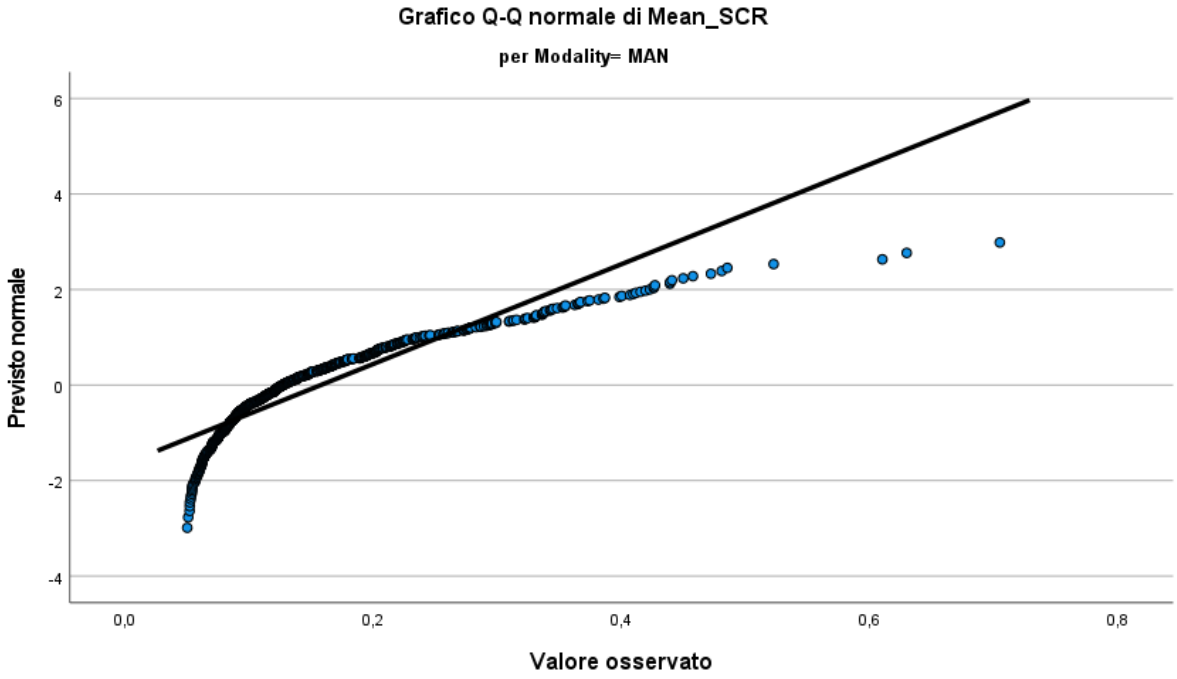


Figura 5.30 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'SCR medio nelle prove svolte in modalità manuale.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
Mean_SCR	HRC	,154	559	<,001	,791	559	<,001
	MAN	,140	709	<,001	,844	709	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.22 - Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

I test permettono di rifiutare l'ipotesi nulla di normalità della distribuzione dell'SCR medio per entrambe le popolazioni, infatti il p-value è minore del livello di significatività scelto per poter rifiutare l'ipotesi nulla. L'errore di prima specie è estremamente contenuto, infatti c'è lo 0,1% di probabilità di rifiutare l'ipotesi nulla quando invece è vera. Come detto precedentemente il p-value è nettamente inferiore al livello soglia di α. Queste considerazioni sono confermate anche dai grafici Q-Q delle due distribuzioni; infatti, la distanza tra la retta che corrisponde all'andamento di una normale e quello delle distribuzioni studiate tende ad aumentare all'aumentare dei quantili, questo a causa delle code destre, le quali contengono un numero di dati maggiore rispetto a quanto accadrebbe se fossero normali.

Test non parametrico a campioni indipendenti di Mann-Whitney

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1268
U di Mann-Whitney	220860,000
W di Wilcoxon	472555,000
Statistica del test	220860,000
Errore standard	6473,948
Statistica del test standardizzato	3,506
Sign. asintotica (test a 2 vie)	<,001

Tabella 5.23 - Risultati del test U di Mann-Whitney per la distribuzione di SCR medio per prova sui due campioni.

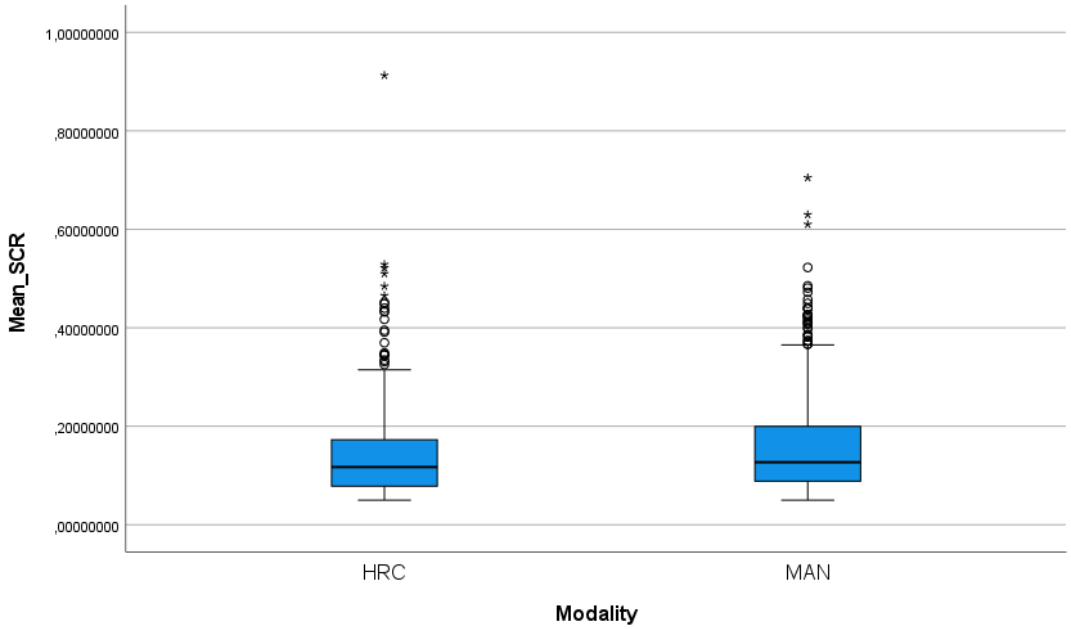


Figura 5.31– Box plot della distribuzione dell'SCR medio per prova sui due campioni. Asse x : Modalità della prova; Asse y: SCR medio (μS).

Dopo aver rifiutato l'ipotesi di normalità si procede al confronto tra le due popolazioni per testare l'ipotesi nulla che abbiano la stessa distribuzione dell'SCR medio. Il test effettuato è il test non parametrico U di Mann-Whitney che ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla in quanto il p-value del test è inferiore al livello di significatività $\alpha=0,05$ definito come valore soglia per il rifuto. Osservando il Grafico 5.24 e considerando il test d'ipotesi effettuato è possibile affermare che il valore dell'SCR medio nella modalità manuale sia statiscamente superiore. Come detto in precedenza, a differenza dei parametri fisiologici riguardanti l'HRV, in questo caso più è alto il parametro maggiore è lo stress psicofisico. Possiamo quindi affermare che l'ausilio del cobot abbia diminuito l'attività elettrodermica dell'operatore.

5.2.1.4 Parametro fisiologico NrSCR

Test di normalità e statistiche descrittive

Riepilogo elaborazione casi

		Casi					
		Valido		Mancante		Totale	
	Modality	N	Percentuale	N	Percentuale	N	Percentuale
NrSCR	HRC	560	78,0%	158	22,0%	718	100,0%
	MAN	711	75,6%	230	24,4%	941	100,0%

Tabella 5.24 – Tabella riepilogo casi

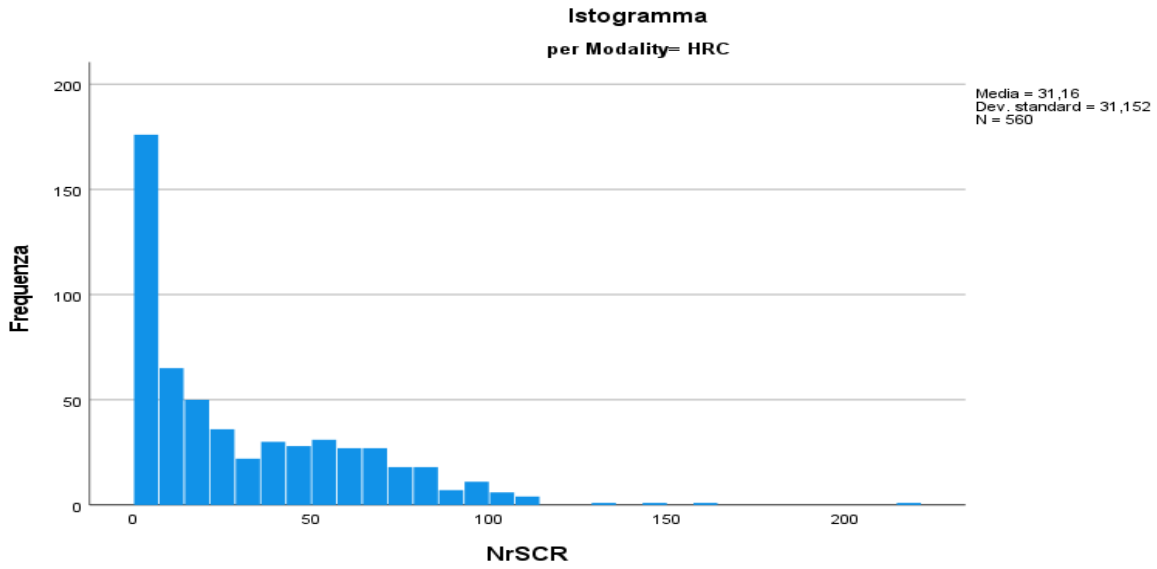


Figura 5.32 - Istogramma delle frequenze di NrSCR nelle prove svolte in modalità collaborativa.

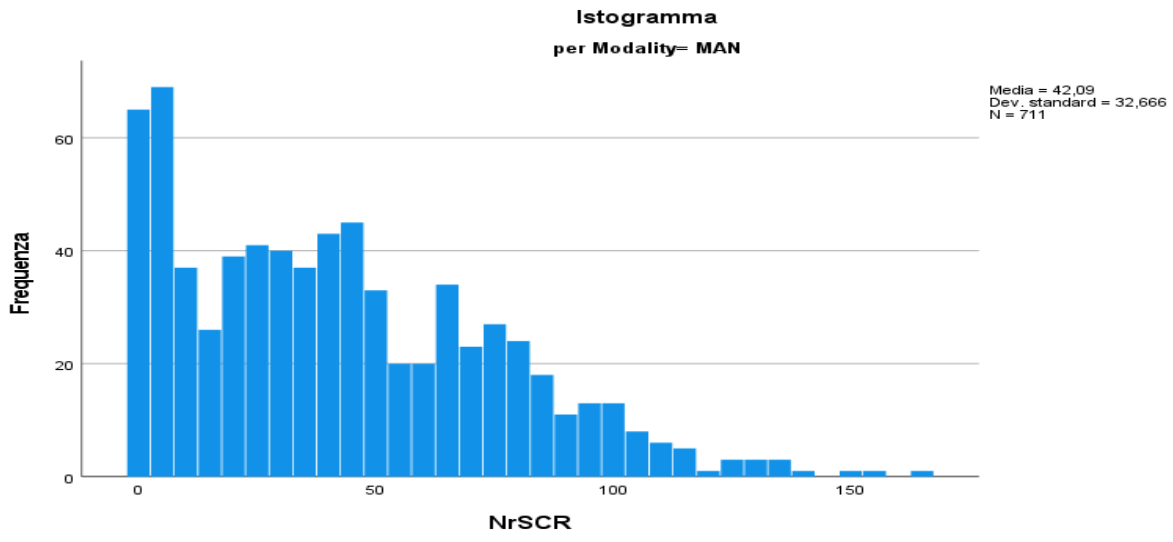


Figura 5.33 - Istogramma delle frequenze di NrSCR nelle prove svolte in modalità manuale.

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
NrSCR	HRC	Medio		31,16	1,316
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	28,58	
			Limite superiore	33,75	
		Media ritagliata al 5%		28,57	
		Mediana		20,00	
		Varianza		970,460	
		Deviazione std.		31,152	
		Minimo		0	
		Massimo		215	
		Intervallo		215	
		Intervallo interquartile		49	
		Asimmetria		1,242	,103
		Curtosi		2,134	,206
	MAN	Medio		42,09	1,225
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	39,69	
			Limite superiore	44,50	
		Media ritagliata al 5%		40,13	
		Mediana		38,00	
		Varianza		1067,096	
		Deviazione std.		32,666	
		Minimo		0	
		Massimo		164	
		Intervallo		164	
		Intervallo interquartile		51	
		Asimmetria		,710	,092
		Curtosi		-,031	,183

Tabella 5.25 – Tabella statistiche descrittive della variabile NrSCR per i due campioni; MAN: prove manuali, HRC: prove collaborative.

Anche in questo caso le distribuzioni presentano un'asimmetria positiva, in quanto la media campionaria è per entrambe maggiore della mediana, è presente una coda lunga a destra. I coefficienti di asimmetria sono comunque molto inferiori rispetto a quelli degli altri parametri fisiologici, inoltre l'asimmetria della distribuzione di NrSCR nelle prove manuali è sensibilmente inferiore a quella della modalità collaborativa. Come si può osservare attraverso il range interquartile la dispersione delle due distribuzioni è molto simile. La mediana di NrSCR nelle prove collaborative è minore rispetto a quella della modalità manuale.

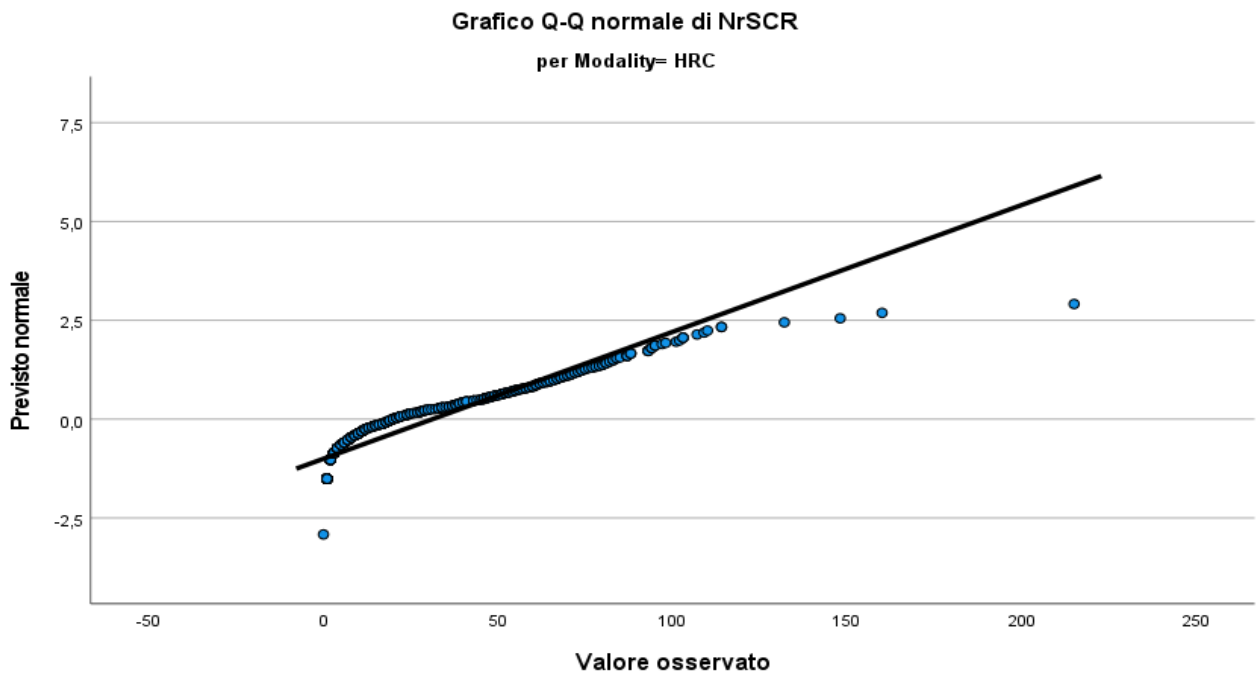


Figura 5.34 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'NrSCR nelle prove svolte in modalità collaborativa.

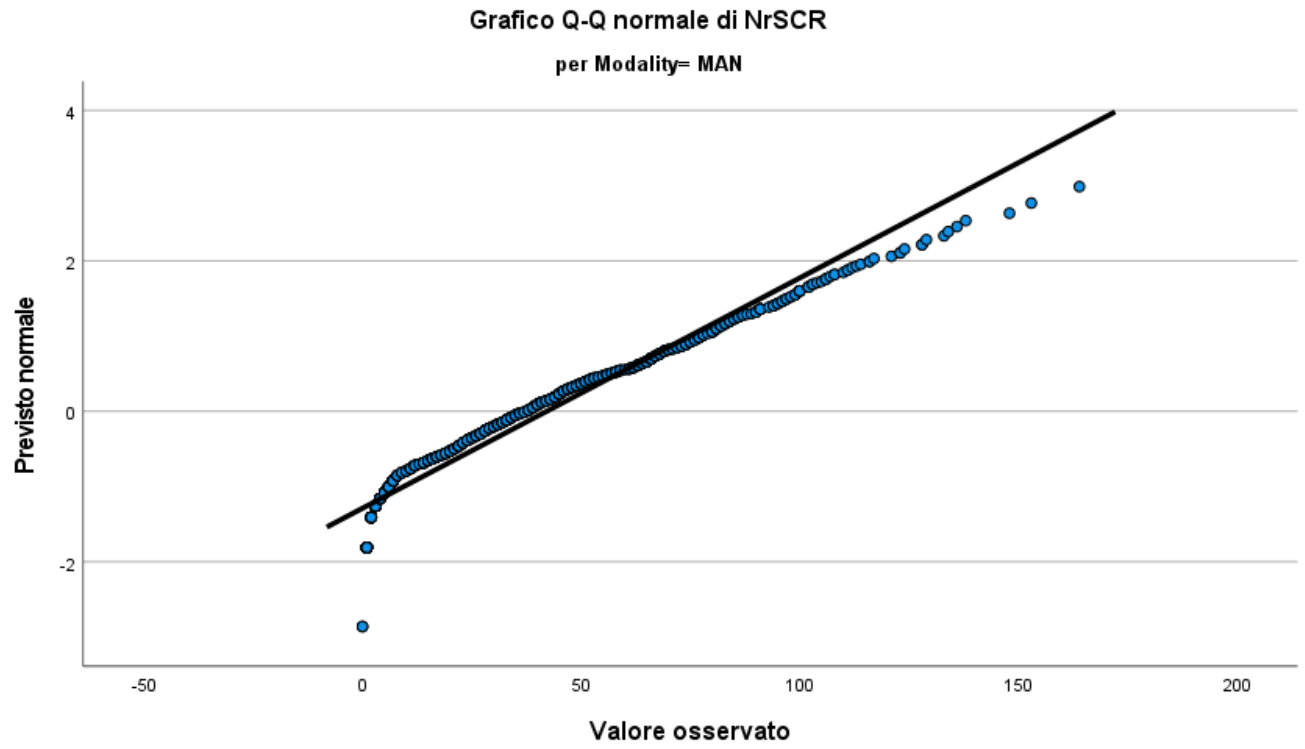


Figura 5.35 - Grafico Q-Q normale della distribuzione dell'NrSCR nelle prove svolte in modalità collaborativa.

Test di normalità

	Modality	Kolmogorov-Smirnov[a] Statistica	gl	Sign.	Shapiro-Wilk Statistica	gl	Sign.
NrSCR	HRC	,165	560	<,001	,861	560	<,001
	MAN	,101	711	<,001	,939	711	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.26 - Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

I test permettono di rifiutare l'ipotesi nulla di normalità della distribuzione dell'SCR medio per entrambe le popolazioni, infatti il p-value è minore rispetto al livello di significatività scelto per poter rifiutare l'ipotesi nulla. L'errore di prima specie è estremamente contenuto, infatti c'è lo 0,1% di probabilità di rifiutare l'ipotesi nulla quando invece è vera. Andando ad osservare i grafici Q-Q la distanza tra i quantili della distribuzione osservata e quelli di una normale sembra essere minore rispetto a quella riscontrata per gli altri parametri, anche in questo caso però, all'aumentare dei quantili, aumenta la distanza tra la posizione che dovrebbe avere la distribuzione se fosse normale e la posizione dei quantili del campione.

Test non parametrico a campioni indipendenti di Mann- Whitney

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1271
U di Mann-Whitney	241724,500
W di Wilcoxon	494840,500
Statistica del test	241724,500
Errore standard	6493,456
Statistica del test standardizzato	6,567
Sign. asintotica (test a 2 vie)	<,001

Tabella 5.23 - Risultati del test U di Mann-Whitney per la distribuzione di NrSCR sui due campioni.

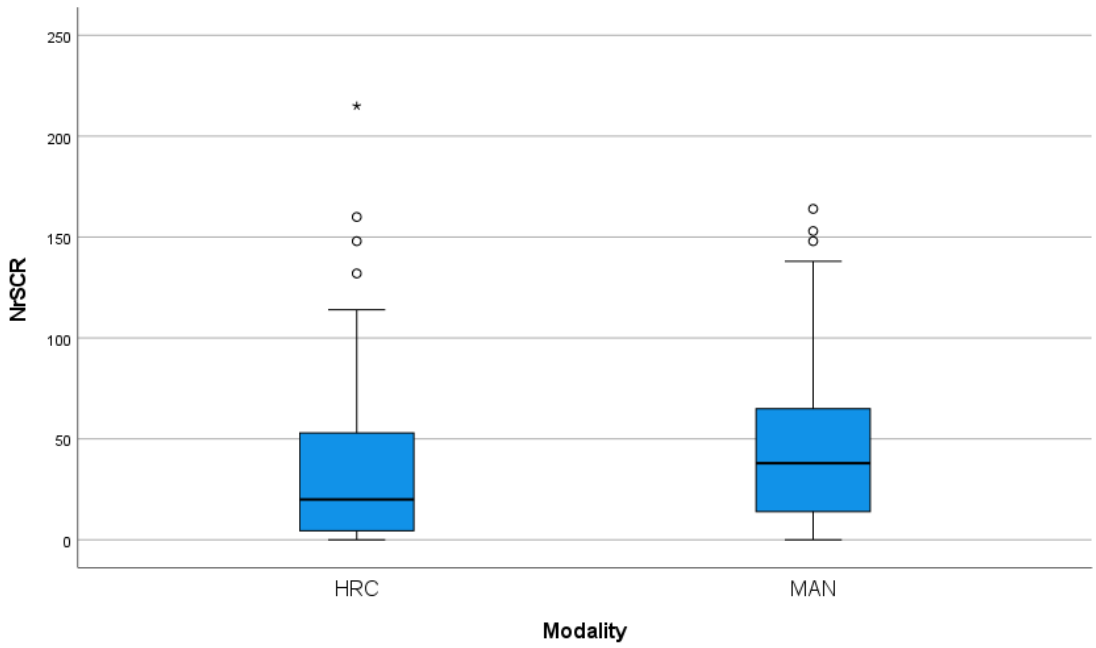


Figura 5.36– Box plot della distribuzione dell'NrSCR per prova sui due campioni. Asse x : Modalità della prova; Asse y: Numero SCR.

Dopo aver rifiutato l'ipotesi di normalità si procede al confronto tra le due popolazioni per testare l'ipotesi nulla che abbiano la stessa distribuzione dell'NrSCR. Il test effettuato è il test non parametrico U di Mann-Whitney che ci permette di rifiutare l'ipotesi nulla in quanto il p-value è inferiore al livello di significatività $\alpha=0,05$ definito come valore soglia per il rifuto. Osservando il Grafico 5.34 e considerando il test d'ipotesi effettuato è possibile affermare che il valore dell'NrSCR medio nella modalità manuale sia statiscamente superiore. Ciò conferma quanto emerso dal test non parametrico della distribuzione dell'SCR medio nelle due popolazioni. Mentre l'HRV presenta valori migliori nelle prove svolte con la modalità manuale l'attività elettrodermica riporta uno stress psicofisico minore in modalità collaborativa, andando a confermare l'ipotesi iniziale secondo cui l'ausilio del cobot migliori le condizioni di lavoro dell'operatore diminuendo lo sforzo psicofisico sostenuto.

5.2.2 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in prove con e senza errori

L'analisi successiva indaga le differenze nei parametri fisiologici in prove con e senza errori, l'obiettivo è stabilire se i difetti aumentino significativamente il carico emotivo sull'operatore. Le variabili di risposta sono i parametri fisiologici, mentre la variabile esplicativa è rappresentata dalla dicotomica "Errori01" che assume il valore 1 se la prova ha presentato almeno un difetto e 0 in caso contrario. La prima analisi svolta non distingue tra prove svolte in modalità manuale o collaborativa, successivamente verrà introdotta questa ulteriore variabile esplicativa e verranno ripetute le analisi per indagare differenze nell'impatto degli errori sul carico emotivo dell'operatore in funzione della modalità.

5.2.2.1 Analisi senza dinstizione tra la modalità delle prove

Test di normalità

Sono stati svolti i test di normalità per le distribuzioni dei parametri fisiologici nei campioni determinati dalla presenza o assenza di errori. Di seguito sono presentati i risultati :

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Errori01	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
RMSSD	0	,164	254	<,001	,794	254	<,001
	1	,138	145	<,001	,857	145	<,001
Mean_HR	0	,092	254	<,001	,915	254	<,001
	1	,105	145	<,001	,903	145	<,001
NrSCR	0	,191	254	<,001	,826	254	<,001
	1	,170	145	<,001	,885	145	<,001
SDNN	0	,162	254	<,001	,830	254	<,001
	1	,121	145	<,001	,899	145	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.24 – Test di normalità per le distribuzioni dei parametri fisiologici sulle prove con e senza errori.

Osservando i risultati dei test di normalità è possibile rifiutare l'ipotesi nulla per tutte le distribuzioni, in quanto il p – value è inferiore rispetto al livello di significatività α richiesto, per tutti i parametri fisiologici. Questo risultato ci costringe ad utilizzare un test non parametrico per confrontare una ad una le distribuzioni di ogni parametro fisiologico in presenza e assenza di errori.

Test non parametrico a campioni indipendenti

Di seguito sono riportati i risultati dei test non parametrici effettuati per ogni parametro fisiologico.

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1101
U di Mann-Whitney	139918,000
W di Wilcoxon	203108,000
Statistica del test	139918,000
Errore standard	4931,498
Statistica del test standardizzato	1,521
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,128

(a)

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1119
U di Mann-Whitney	139681,500
W di Wilcoxon	203584,500
Statistica del test	139681,500
Errore standard	5038,746
Statistica del test standardizzato	,727
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,467

(b)

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1271
U di Mann-Whitney	179545,000
W di Wilcoxon	258151,000
Statistica del test	179545,000
Errore standard	6057,574
Statistica del test standardizzato	1,039
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,299

(c)

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1268
U di Mann-Whitney	179512,000
W di Wilcoxon	258118,000
Statistica del test	179512,000
Errore standard	6042,908
Statistica del test standardizzato	1,135
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,257

(d)

Tabelle 5.25 – Risultati test parametrico : (a) Parametro fisiologico SDNN ; (b) Parametro fisiologico RMSSD; (c) Parametro fisiologico NrSCR ; (d)Parametro fisiologico SCR medio per prova;

I risultati dei test non parametrici di Mann-Whitney mostrano come non sia possibile rifiutare l'ipotesi nulla per nessun parametro fisiologico, in quanto il p-value è maggiore rispetto al livello di significatività α in ogni test svolto. Non è quindi possibile affermare che ci siano differenze significative nella distribuzione dei parametri fisiologici tra prove con e senza errori. L'implicazione importante è che la presenza di errori non sembra provocare un

aumento dello stress nell'operatore, l'accordo tra i parametri nel confermare ciò rafforza l'ipotesi appena effettuata. Successivamente è stata svolta un'ulteriore analisi con test non parametrici distinguendo tra prove svolte in modalità collaborativa e manuale e ha presentato gli stessi risultati. Non c'è quindi una differenza significativa tra le distribuzioni dei parametri fisiologici in presenza o in assenza di errori con nessuna delle due modalità di esecuzione.

5.2.3 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in funzione della tipologia di errore

L'analisi presentata nel sotto capitolo 5.2.2 è affetta da un'importante limitazione; infatti, analizza solamente la presenza o l'assenza di difetti, senza entrare in profondità sulla causa che li genera. Non sono state fatte distinzioni tra i difetti dell'uomo e i difetti del cobot, ma soprattutto non è stata analizzata l'influenza della singola tipologia di errore sui parametri fisiologici. In questo sotto capitolo sono presentati i risultati di alcune analisi svolte attraverso delle regressioni lineari multiple, che considerano come variabili indipendenti le tipologie di errore e come variabile dipendente i parametri fisiologici. Le variabili indipendenti sono dicotomiche, esse valgono 1 nel caso in cui la tipologia di difetto che rappresentano sia presente nella prova, mentre assumono il valore 0 altrimenti. Di seguito sono presentati solamente i risultati delle analisi che hanno mostrato risultati statisticamente significativi, che in quelle omesse non stati ottenuti.

L'analisi svolta ha considerato solamente gli errori dell'uomo, senza una distinzione tra le modalità di svolgimento della prova, questo a causa della mancanza di significatività nei risultati per l'analisi con i soli errori del cobot:

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	35,774	1,059		33,789	<,001
	A1	-4,822	6,732	-,021	-,716	,474
	B1	7,998	4,557	,051	1,755	,080
	D1	2,124	5,339	,012	,398	,691
	C1	13,131	3,559	,107	3,689	<,001
	F1	-8,336	7,263	-,033	-1,148	,251
	G1	-2,235	3,556	-,018	-,629	,530
	H1	-8,774	26,366	-,010	-,333	,739
	I1	-1,137	7,971	-,004	-,143	,887
	L1	33,931	11,255	,091	3,015	,003
	M1	45,937	37,094	,050	1,238	,216
	N1	-27,062	53,631	-,021	-,505	,614

a. Variabile dipendente: NrSCR

Tabella 5.26 – Regressione lineare multpla ; Variabile dipendente: NrSCR , Variabili indipendenti: Tipologie di errore.

L'unico parametro fisiologico per cui la regressione multipla ha presentato risultati significativi è NrSCR, cioè il numero di volte all'interno di una prova in cui sono stati registrati aumenti dell'EDA superiori a 0.05 μS. Solamente due tipologie di difetti presentano coefficienti significativi e sono C ed L, che rappresentano gli identificatori rispettivamente del posizionamento errato di un componente e quello di una vite/dado. Il parametro fisiologico aumenta in maniera statisticamente significativa nel caso in cui uno di questi due difetti occorra, è quindi possibile affermare che abbiano un impatto sul carico emotivo dell'operatore aumentando di fatto lo stress psicofisico a cui è soggetto. Questa analisi non distingue però tra prove svolte in modalità collaborativa e manuale, considerando gli errori dell'uomo provenienti da entrambe, nelle analisi successive verrà svolta questa ulteriore distinzione per valutare differenze significative.

Modalità manuale

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	38,795	1,360		28,526	<,001
	A1	-7,465	6,730	-,038	-1,109	,268
	B1	5,348	4,584	,041	1,167	,244
	D1	,565	5,332	,004	,106	,916
	C1	10,681	3,603	,103	2,965	,003
	F1	-9,682	7,233	-,047	-1,339	,181
	G1	-4,654	3,596	-,045	-1,294	,196
	H1	-9,625	26,208	-,013	-,367	,714
	I1	-3,230	7,951	-,014	-,406	,685
	L1	31,394	11,205	,101	2,802	,005
	M1	42,422	36,880	,056	1,150	,250
	N1	-24,547	53,312	-,023	-,460	,645

a. Variabile dipendente: NrSCR

Tabella 5.27 – Regressione lineare multpla per prove in modalità manuale ; Variabile dipendente: NrSCR , Variabili indipendenti: Tipologie di errore.

La regressione lineare multipla effettuata considerando solamente le prove in modalità manuale conferma i risultati della prima analisi, gli unici difetti che hanno un impatto significativo sul parametro NrSCR sono L e C, il valore di tale effetto inoltre è analogo a quello emerso nell'analisi precedente.

Modalità collaborativa

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	30,445	1,589		19,161	<,001
	A1	-,212	6,827	-,001	-,031	,975
	B1	12,449	4,674	,100	2,664	,008
	D1	5,057	5,404	,035	,936	,350
	C1	17,261	3,691	,176	4,676	<,001
	F1	-5,690	7,313	-,029	-,778	,437
	G1	1,954	3,681	,020	,531	,596
	H1	-7,423	26,458	-,011	-,281	,779
	I1	2,789	8,051	,013	,346	,729
	L1	37,791	11,327	,130	3,336	<,001
	M1	51,234	37,241	,073	1,376	,169
	N1	-30,984	53,824	-,031	-,576	,565

a. Variabile dipendente: NrSCR

Tabella 5.28 – Regressione lineare multpla per prove in modalità collaborativa; Variabile dipendente: NrSCR , Variabili indipendenti: Tipologie di errore.

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	,134	,004		31,872	<,001
	A1	,018	,018	,038	1,011	,312
	B1	,014	,012	,044	1,143	,253
	D1	,011	,014	,030	,788	,431
	C1	,031	,010	,121	3,170	,002
	F1	-,038	,019	-,074	-1,942	,053
	G1	,006	,010	,024	,620	,536
	H1	-,085	,070	-,046	-1,212	,226
	I1	,023	,021	,042	1,100	,272
	L1	,073	,030	,096	2,428	,015
	M1	-,022	,098	-,012	-,220	,826
	N1	,036	,142	,014	,251	,802

a. Variabile dipendente: Mean_SCR

Tabella 5.29 – Regressione lineare multpla per prove in modalità collaborativa; Variabile dipendente: SCR medio per prova , Variabili indipendenti: Tipologie di errore.

Nella modalità collaborativa i risultati ottenuti per il parametro fisiologico NrSCR sono confermati anche dall'altro parametro estrapolato dall'EDA, cioè l'SCR medio, infatti gli errori C ed L sono significativi per entrambe le regressioni multiple.

5.2.4 Analisi delle differenze nei parametri fisiologici in funzione del numero di errori

Le analisi svolte finora hanno avuto l'obiettivo di valutare l'impatto complessivo dei difetti, senza considerare l'ipotesi che il numero di errori possa avere anch'esso un'influenza sullo stato emotivo dell'operatore. Le analisi di questo sotto capitolo vanno in questa direzione, è stata svolta una regressione lineare per ogni parametro fisiologico, con l'obiettivo di valutare l'impatto del numero di errori sullo stato emotivo dell'operatore. La variabile dipendente è rappresentata dal parametro fisiologico d'interesse, mentre quella indipendente "Errori" è il contatore del numero di difetti per prova. Le regressioni non hanno presentato risultati significativi in nessun parametro fisiologico per le analisi svolte senza distinguere la modalità di esecuzione delle prove e per le prove svolte con l'ausilio del cobot. Le regressioni per la modalità manuale invece hanno presentato risultati significativi per quanto riguarda il parametro fisiologico NrSCR.

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: NrSCR

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri	
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1
Lineare	,016	11,253	1	709	<,001	39,864	6,049

La variabile indipendente è Errori.

Tabella 5.30 - Stime dei parametri della regressione lineare in modalità di assemblaggio manuale.

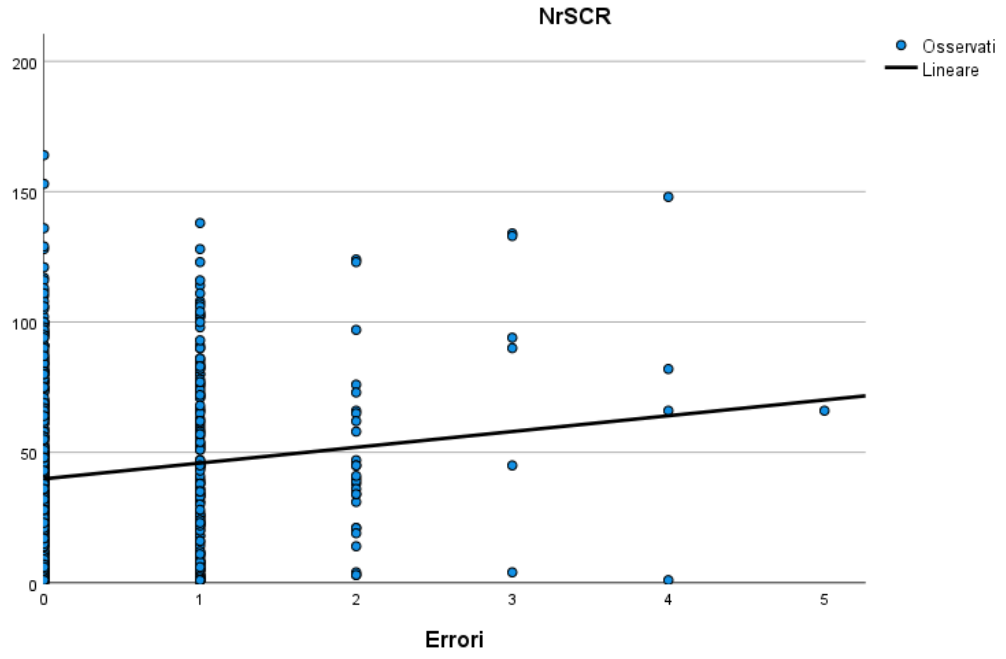


Figura 5.37 – Modello di regressione lineare della NrSCR all'aumentare degli errori in modalità di assemblaggio manuale.

La regressione è significativa e dimostra che all'aumentare del numero di difetti nelle prove svolte in modalità manuale aumenta anche NrSCR. Questo risultato può essere legato alla percezione dell'operatore riguardo la propria performance, infatti l'aumentare del numero di errori può provocare una sensazione di inadeguatezza nell'operatore, ciò determina un aumento dello stress psicofisico. La regressione svolta cerca di rispecchiare seppur in maniera approssimata questo fenomeno.

5.2.5 Andamento dei parametri fisiologici in funzione del numero di prove

Le analisi svolte fino a questo punto non hanno tenuto conto del fattore stanchezza e del suo impatto nei parametri fisiologici, è plausibile che all'aumentare del numero di prove ci sia un aumento dello stress, dovuto alla stanchezza e alla ripetitività dell'assemblaggio. Per confermare o rigettare questa ipotesi sono state svolte due regressioni, una lineare con variabile dipendente il parametro fisiologico studiato e come variabile indipendente il numero della prova e una quadratica, che presenta anche il quadrato del numero di prove svolte. Essa ci serve per cogliere in maniera più fine, rispetto alla lineare, eventuali tendenze della variabile dipendente. Le analisi sono state svolte in prima battuta senza distinzioni tra le modalità delle prove, per poi distinguere tra quelle svolte con e senza l'ausilio del cobot. Per semplicità di seguito sono riportati i risultati delle analisi che hanno presentato risultati significativi.

5.2.5.1 Regressioni dei parametri fisiologici senza distinzione tra le modalità di esecuzione delle prove

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: Mean_SCR

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri		
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1	b2
Lineare	,006	7,054	1	1266	,008	,161	-,000312	
Quadratico	,007	4,314	2	1265	,014	,167	-,001	5,831E-6

La variabile indipendente è Trial.

Tabella 5.31 - Stime dei parametri della regressione lineare per la variabile dipendente SCR medio per prova(μS).

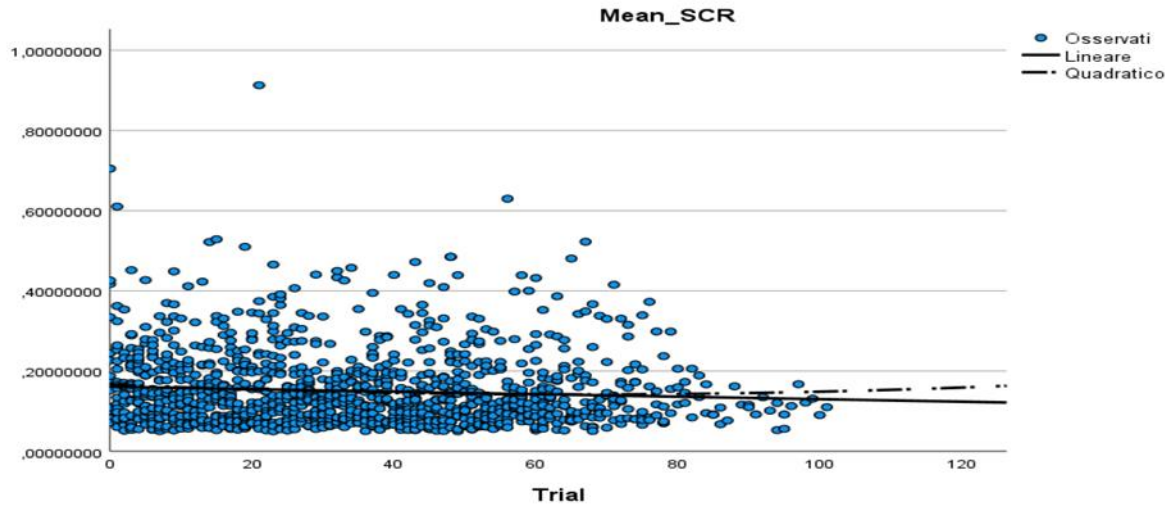


Figura 5.38 - Modello di regressione lineare dell'SCR medio per prova all'aumentare del numero di prove. Asse x: prova; Asse y: SCR medio per prova (µS).

Riepilogo modello e stime dei parametri

Variabile dipendente: NrSCR

	Riepilogo del modello					Stime dei parametri		
Equazione	R-quadrato	F	gl1	gl2	Sign.	Costante	b1	b2
Lineare	,006	7,203	1	1269	,007	41,073	-,110	
Quadratico	,010	6,317	2	1268	,002	44,840	-,402	,004

La variabile indipendente è Trial.

Tabella 5.32 - Stime dei parametri della regressione lineare per la variabile dipendente NrSCR .

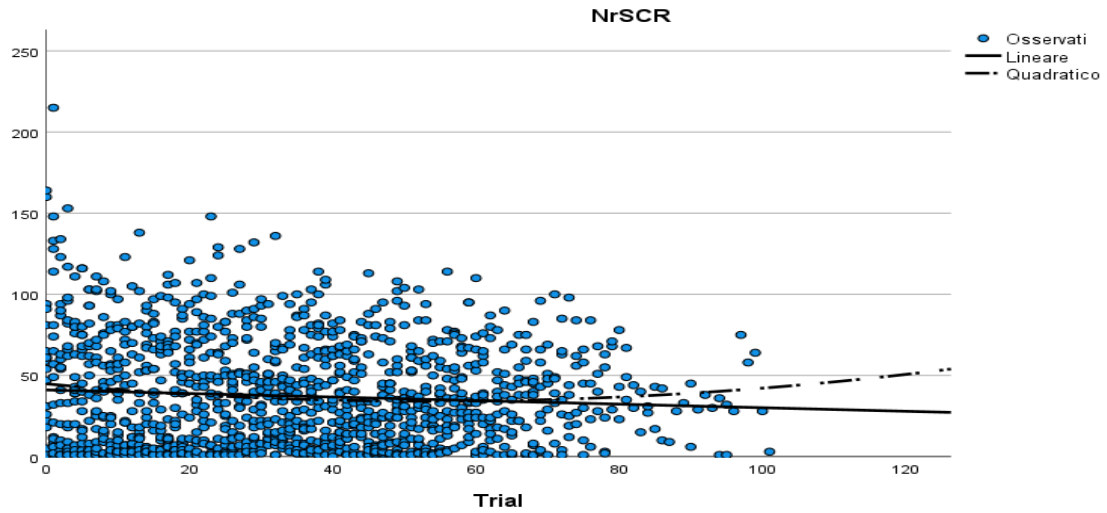


Figura 5.39 - Modello di regressione lineare del numero di SCR all'aumentare del numero di prove. Asse x: prova; Asse y: Numero di SCR per prova .

I due parametri fisiologici per cui i coefficienti della variabile indipendente sono significativi sono NrSCR e l'SCR medio per prova. I coefficienti della variabile indipendente di primo grado sono negativi per entrambi i parametri e le tipologie di regressione, ciò dimostra che il trend principale è decrescente all'aumentare delle prove, i due parametri tendono a migliorare andando avanti nella sessione. Ciò può essere dovuto ad un fattore di apprendimento che aumenta la familiarità con le task e la destrezza dell'operatore, diminuendo così lo sforzo mentale necessario per svolgere l'assemblaggio. Al tempo stesso però i coefficienti delle variabili indipendenti di secondo grado sono positivi per entrambi i parametri fisiologici, questo dimostra che la diminuzione è a tasso decrescente(in valore assoluto) , la curva di regressione ha infatti un punto di flesso e un'inversione di tendenza che vede l'aumento dei parametri fisiologici. Questo può essere dovuto al fatto che a contrastare l'effetto della sempre maggiore confidenza con le attività è presente un contributo negativo dovuto alla stanchezza crescente all'aumentare del numero di prove svolte e che lentamente supera l'effetto positivo. La stessa analisi è stata svolta suddividendo le prove in base alla modalità di esecuzione, non sono però state trovate differenze significative nell'evoluzione dei parametri fisiologici rispetto ai risulti ottenuti nell'analisi aggregata, si può concludere che la modalità di esecuzione non influenzi l'andamento dei parametri fisiologici durante l'esecuzione, ma solamente il valore assoluto(come dimostrato nelle analisi del sottocapitolo 5.2.1).

5.3 Produttività del processo

A guidare l'adozione di una nuova tecnologia all'interno del settore manifatturiero c'è sicuramente la performance che essa permette di raggiungere, la produttività è infatti un tema estremamente importante in ambito industriale. In questo sottocapitolo si cerca di valutare l'effetto su questa dimensione da parte dell'assemblaggio collaborativo, confrontandolo con quello manuale. Il dato considerato come rappresentativo della produttività è la durata delle prove. La prima analisi è generale e studia la presenza di differenze significative nella distribuzione dei tempi delle prove tra l'assemblaggio manuale e quello collaborativo .

5.3.1 Differenze tra le distribuzioni dei tempi nelle due modalità di esecuzione delle attività

Test di normalità e statistiche descrittive

In primo luogo, sono state elaborate le statistiche descrittive e gli istogrammi dei due campioni dati, infine sono stati svolti i test di normalità per le due distribuzioni. La durata delle prove è misurata in secondi.

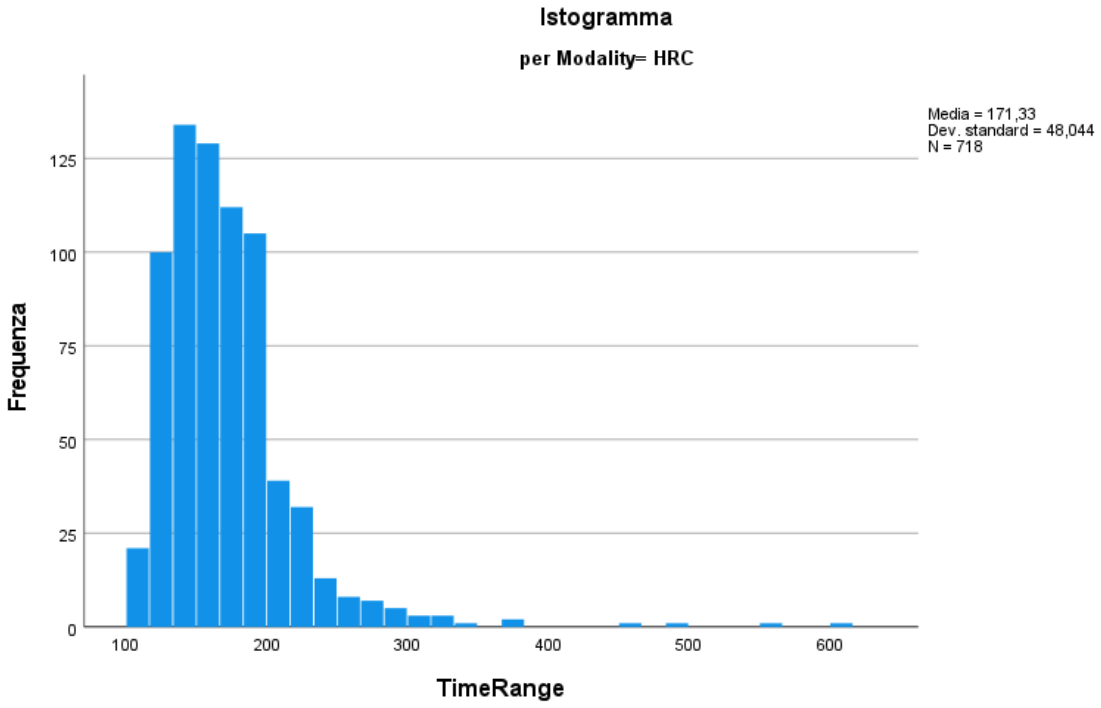


Figura 5.40 - Istogramma delle frequenze della durata delle prove svolte in modalità collaborativa. Time range: durata della prova (Secondi).

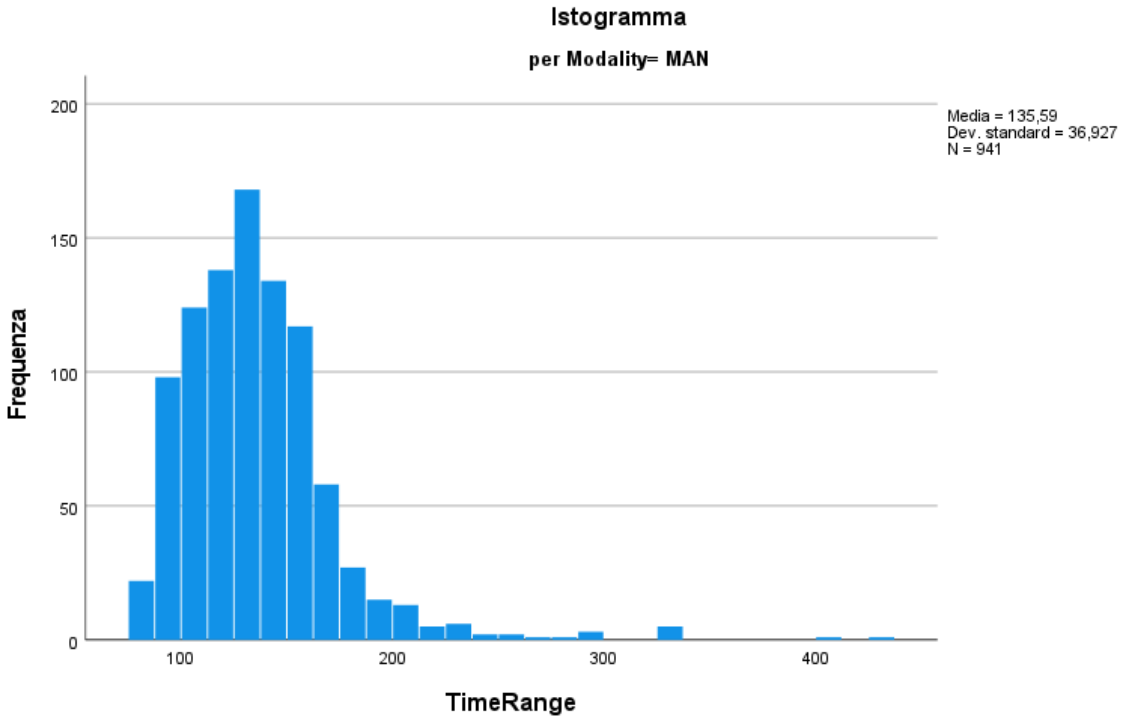


Figura 5.41 - Istogramma delle frequenze della durata delle prove svolte in modalità manuale. Time range: durata della prova (Secondi).

Descrittive

	Modality			Statistica	Errore std.
TimeRange	HRC	Medio		171,33	1,793
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	167,81	
			Limite superiore	174,85	
		Media ritagliata al 5%		166,60	
		Mediana		163,50	
		Varianza		2308,201	
		Deviazione std.		48,044	
		Minimo		101	
		Massimo		612	
		Intervallo		511	
		Intervallo interquartile		51	
		Asimmetria		3,247	,091
		Curtosi		20,460	,182
	MAN	Medio		135,59	1,204
		95% di intervallo di confidenza per la media	Limite inferiore	133,23	
			Limite superiore	137,95	
		Media ritagliata al 5%		132,32	
		Mediana		131,00	
		Varianza		1363,625	
		Deviazione std.		36,927	
		Minimo		81	
		Massimo		435	
		Intervallo		354	
		Intervallo interquartile		39	
		Asimmetria		2,422	,080
		Curtosi		12,093	,159

Tabella 5.33 – Tabella statistiche descrittive della variabile durata prova per i due campioni; MAN: prove manuali, HRC: prove collaborative.

Le statistiche descrittive confermano quanto visibile negli istogrammi delle frequenze, entrambe le distribuzioni presentano un'asimmetria evidente, con una coda lunga a destra. La media campionaria è maggiore della mediana per entrambe le distribuzioni, si può quindi parlare di asimmetria positiva. Il coefficiente di asimmetria e la dispesione rappresentata dallo scarto interquartile sono maggiori nella distribuzione dei tempi delle prove svolte in modalità collaborativa. Osservando le sole statistiche descrittive si può osservare che la mediana della distribuzione dei tempi risulti sensibilmente superiore per le prove svolte in modalità collaborativa. Questa prima osservazione non può però assicurare con certezza che le due distribuzioni siano diverse e che la durata delle prove svolte in modalità collaborativa sia significativamente maggiore.

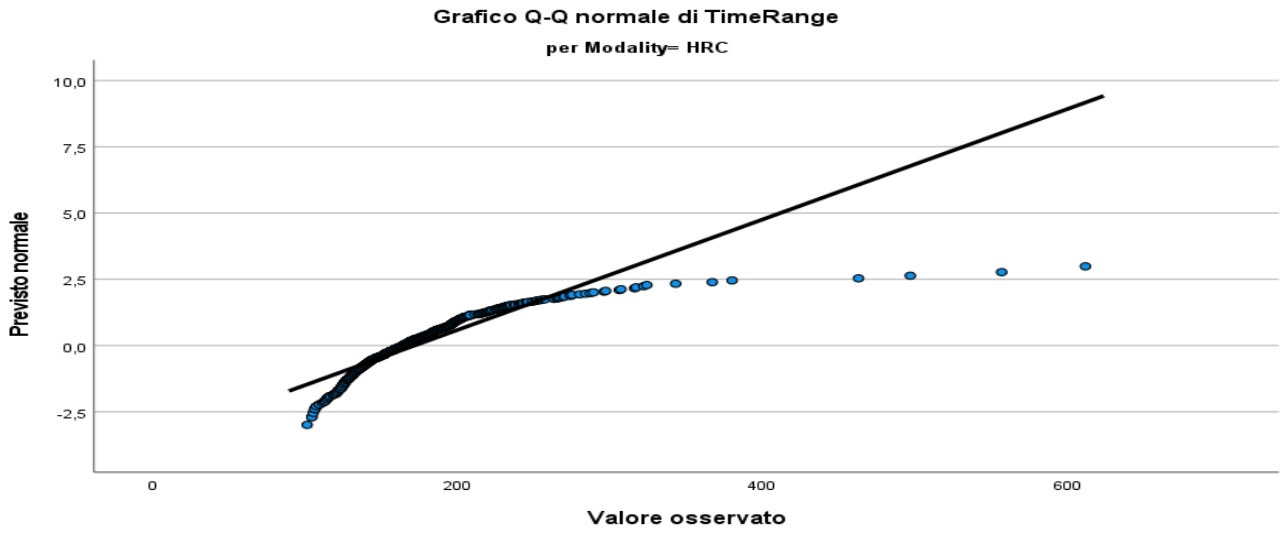


Figura 5.42 - Grafico Q-Q normale della distribuzione della durata delle prove svolte in modalità collaborativa.

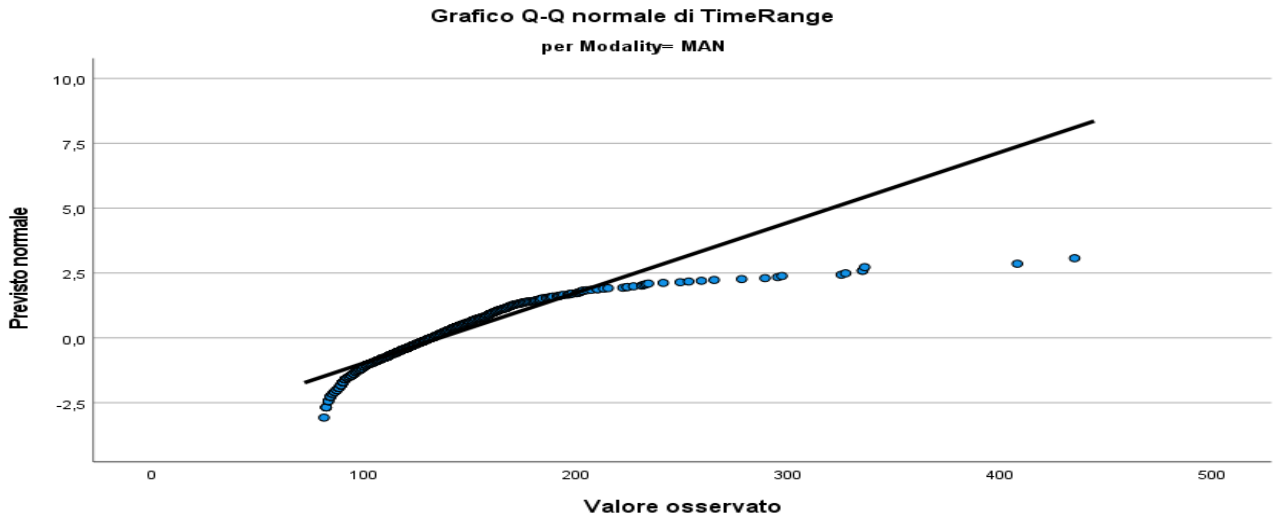


Figura 5.43 - Grafico Q-Q normale della distribuzione della durata delle prove svolte in modalità manuale.

Test di normalità

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Modality	Statistica	gl	Sign.	Statistica	gl	Sign.
TimeRange	HRC	,112	718	<,001	,777	718	<,001
	MAN	,092	941	<,001	,837	941	<,001

a. Correzione di significatività di Lilliefors

Tabella 5.34- Risultati test di normalità; MAN: prova manuali, HRC: prove collaborative.

I test permettono di rifiutare l'ipotesi nulla di normalità della distribuzione della durata delle prove per entrambe le popolazioni, infatti il p-value è minore del livello di significatività scelto per poter rifiutare l'ipotesi nulla. L'errore di prima specie è estremamente contenuto, infatti c'è lo 0,1% di probabilità di rifiutare l'ipotesi nulla quando invece è vera. Andando ad osservare i grafici Q-Q all'aumentare dei quantili aumenta la distanza tra la posizione che dovrebbe avere la distribuzione se fosse normale e la posizione dei quantili del campione.

Test U di Mann- Whitney a campioni indipendenti

Il rifiuto dell'ipotesi nulla di normalità per le due distribuzioni studiate ha reso necessario l'utilizzo di un test non parametrico per confrontare i due campioni, sotto l'ipotesi nulla che avessero la stessa distribuzione della durata delle prove. Di seguito sono riportati i risultati del test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti , è stato scelto un livello di significatività $\alpha=0,05$.

Riepilogo test U di Mann-Whitney a campioni indipendenti

Numero totale di casi	1659
U di Mann-Whitney	154016,500
W di Wilcoxon	597227,500
Statistica del test	154016,500
Errore standard	9667,183
Statistica del test standardizzato	-19,013
Sign. asintotica (test a 2 vie)	,000

Tabella 5.35 - Risultati del test U di Mann-Whitney per la distribuzione della durata delle prove sui due campioni.

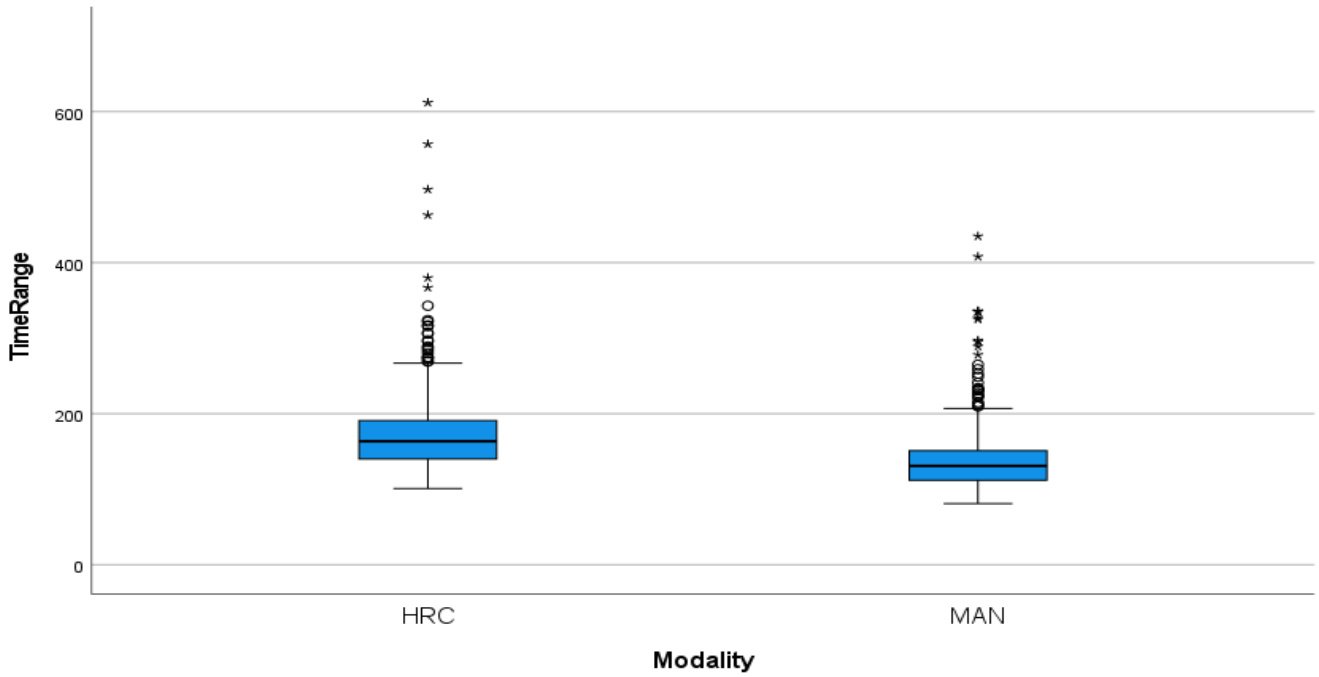


Figura 5.44 – Box plot della distribuzione della durata delle prove sui due campioni. Asse x : Durata prova (Secondi) Asse y: Modalità

Il p-value del test U di Mann-Whitney è molto inferiore rispetto al livello di significatività e ci permette quindi di rifiutare l'ipotesi nulla di uguaglianza delle distribuzioni della durata delle prove nei due campioni. Osservando i box plot è possibile affermare che la durata delle prove in modalità collaborativa sia statisticamente superiore rispetto a quelle svolte senza l'ausilio del cobot. La natura di questa differenza può essere ricercata nella progettazione dell'assemblaggio collaborativo; infatti, la velocità con cui il braccio robotico svolge le proprie attività è inferiore, per motivi di sicurezza, a quella con cui potrebbe svolgerle l'operatore. Una soluzione per ridurre i tempi operativi delle attività svolte con il cobot è quella di parallelizzarle, cambiando di fatto il ruolo del cobot, facendolo passare da sostegno all'umano a vero e proprio operatore che condivide gli spazi di lavoro. A causa della morfologia del prodotto, che impedisce al cobot di effettuare attività di montaggio vero e proprio, questa soluzione sarebbe stata difficilmente applicabile all'esperimento.

5.3.2 Analisi dell'impatto dei difetti sulla durata delle attività

Per poter migliorare un processo è senz'altro necessario capire non solo quali siano i difetti più ricorrenti,ma anche quali di questi influenzino maggiormente la produttività, ciò permette poi di mettere in atto azioni correttive efficaci. Quest'analisi ha come obiettivo proprio la definizione dell'impatto sui tempi di ogni tipologia di difetto identificato e lo fa attraverso una regressione lineare multipla, che presenta come variabile dipendente la durata della prova e come variabili indipendenti dicotomiche le tipologie di difetti occorsi. I coefficienti ci permettono di determinare quindi l'effetto sulla prova della presenza di un certo errore, mentre l'intercetta rappresenta la durata nel caso in cui non siano presenti errori e le variabili dicotmiche assumano quindi tutte il valore zero. Le analisi sono state svolte dividendo i difetti causati dall'uomo da quelli del cobot.

Regressione con difetti uomo

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	142,412	1,130		126,072	,000
	A1	4,020	7,181	,013	,560	,576
	B1	11,211	4,862	,056	2,306	,021
	D1	50,043	5,696	,214	8,786	<,001
	C1	23,328	3,797	,149	6,143	<,001
	F1	19,874	7,748	,062	2,565	,010
	G1	15,387	3,794	,098	4,056	<,001
	H1	-3,182	28,128	-,003	-,113	,910
	I1	11,418	8,504	,032	1,343	,180
	L1	11,404	12,007	,024	,950	,342
	M1	-7,412	39,573	-,006	-,187	,851
	N1	-5,404	57,215	-,003	-,094	,925

a. Variabile dipendente: TimeRange

Tabella 5.36 - Regressione lineare multpla; Variabile dipendente: durata prova ; Variabili indipendenti: Tipologie di difetti uomo.

Regressione con difetti causati dal cobot

Coefficienti[a]

Modello		Coefficienti non standardizzati		Coefficienti standardizzati		
		B	Errore standard	Beta	t	Sign.
1	(Costante)	142,294	1,102		129,175	,000
	A1	91,550	17,106	,147	5,352	<,001
	B1	44,988	15,555	,079	2,892	,004
	E1	-2,294	37,777	-,002	-,061	,952
	D1	53,262	12,635	,114	4,215	<,001
	C1	44,309	11,067	,110	4,004	<,001
	F1	8,956	13,396	,018	,669	,504
	G1	41,391	6,664	,171	6,211	<,001
	H1	-5,294	37,777	-,004	-,140	,889

a. Variabile dipendente: TimeRange

Tabella 5.37 - Regressione lineare multpla; Variabile dipendente: durata prova ; Variabili indipendenti: Tipologie di cobot.

Per quanto riguarda i difetti dovuti all'uomo le tipologie B, C, D, F e G (vedi Tabella 5.1) hanno tutte un impatto significativo sui tempi. In particolare, la tipologia D, che rappresenta il montaggio errato di un componente ha un coefficiente più che doppio rispetto a quello degli altri difetti, questo perché quando occorre è necessario interrompere il processo, effettuare uno smontaggio e poi posizionare il componente nella maniera corretta. Ciò comporta un dispendio di tempo che ammonta quasi ad un minuto. I difetti B e C riguardano la caduta e il posizionamento errato di un componente, hanno entrambi un impatto significativo sulla durata del processo e questo è dovuto al fatto che quando occorrono, seppur per un lasso di tempo inferiore rispetto al difetto D, le attività debbano essere interrotte. F e G invece rappresentano la caduta di una vite, di un dado o di una rondella e anch'essi provocano un'interruzione piuttosto prolungata del processo, necessaria al recupero del componente ausiliario caduto.

I difetti dovuti al cobot che hanno un impatto significativo sulla durata delle prove sono le tipologie A, B, C, D e G (vedi Tabella 5.2). I difetti A, B e C sono tutti in qualche modo legati alla presa scorretta del pezzo, che poi può generare errori di diversa natura in base a quanto

sia deviata rispetto alla posizione ottimale. Nei casi A, B e C il processo deve essere interrotto e attraverso l'accesso all'interfaccia di controllo si deve modificare il flusso delle attività del robot tornando indietro, ciò provoca una consistente perdita di tempo. Nell'errore D invece il processo non necessariamente deve essere interrotto; infatti, in certi casi l'operatore può continuare l'attività seppur con difficoltà, ciò provoca comunque un'ingente perdita di tempo. L'errore G invece è causato dall'attivazione dei sensori di forza del cobot, che hanno funzioni di sicurezza, anche in questo caso si deve accedere al pannello di controllo e riattivare il programma con conseguente perdita di tempo.

I coefficienti degli errori causati dal cobot sono maggiori proprio perché è spesso necessario fermare il processo per poter intervenire attraverso il pannello di controllo, ciò nel caso dell'esperimento studiato ha provocato perdite di tempo superiori rispetto agli errori dell'uomo. Da questa analisi è emersa l'importanza della qualità dell'asservimento dei pezzi per la produttività del processo; infatti, quelli più critici hanno tutti come causa un posizionamento scorretto dei componenti in fase di asservimento. La fase di programmazione del cobot e di progettazione delle attività è altresì estremamente importante sotto questo punto di vista, è infatti possibile limitare la problematica dell'asservimento rendendo meno sensibile il cobot alla posizione dei componenti. Questo può essere fatto programmando la presa per essere effettuata nella zona del componente più consona, limitando il rischio di scivolamento da parte del pezzo sulle spugne della pinza (ad esempio per zone curve) e diminuendo così la sensibilità della presa alla posizione del pezzo, aumentando la tolleranza concessa in fase di asservimento.

6. Conclusioni

Le analisi svolte hanno riguardato molte dimensioni della collaborazione tra uomo e robot, alcune di interesse prettamente industriale come l'efficienza del processo produttivo e altre più incentrate sull'operatore, come l'analisi dello stress fisico e mentale. L'adozione di questo nuovo paradigma per la produzione non può prescindere dall'ottimizzazione di tutte queste dimensioni. I risultati dell'esperimento svolto hanno in parte confermato i vantaggi dell'HRC, in quanto i parametri fisiologici legati all'EDA sono stati migliori nell'assemblaggio collaborativo. Ciò è in contrasto con quanto emerso dall'analisi dell'HRV, che però è stata un parametro poco significativo in tutte le altre analisi effettuate, ciò potrebbe rafforzare i risultati ottenuti dall'EDA. L'analisi dei difetti ha inoltre dimostrato come il numero di errori commessi dall'uomo diminuisca con la modalità collaborativa, mentre non ci sono differenze significative riguardanti la difettosità generale. Ciò comporta un vantaggio estremamente importante, in quanto i difetti causati dal cobot possono essere ridotti in maniera sistematica attraverso l'ottimizzazione della progettazione e dell'allocazione delle attività. Risulta invece più complicato ridurre la difettosità provocata dagli operatori, che inizialmente tende a diminuire grazie al processo di apprendimento, ma che poi raggiunge un plateau dipendente dalla destrezza dell'operatore. Legato ai concetti appena espressi è il risultato emerso dall'analisi della durata delle prove in presenza di difetti, che se provocati dal cobot hanno una gravità maggiore dal punto di vista della produttività rispetto a quelli dovuti all'operatore. Ciò è dovuto al fatto che il processo deve essere interrotto e deve essere imposta la ripartenza del programma al cobot, che non è altrimenti in grado di capire su quale attività sia avvenuto l'errore e soprattutto non riesce ad applicare azioni correttive in autonomia, come invece riesce a fare un operatore. Il limite principale della collaborazione è sicuramente l'impossibilità da parte del cobot di affrontare processi decisionali e adattarsi a situazioni non convenzionali, ciò obbliga chi progetta il processo produttivo a spendere tempo nella ricerca di tutte le possibili fonti di errore e nella pianificazione di azioni correttive. Tutto ciò deve avvenire prima che il processo produttivo venga implementato all'interno della fabbrica per evitare inefficienze che altrimenti sarebbero sistematiche e difficilmente risolvibili ex post. Non in tutti i processi è possibile lavorare con l'ausilio del cobot, la gestione della complessità è infatti un tema estremamente importante e che viene osservato con particolare interesse dagli studiosi dell'HRC. Sviluppare un framework in grado di valutare ogni singola attività del processo in funzione della sua complessità, per poterla poi allocare al

miglior attore possibile tra robot e uomo, può portare alla semplificazione dei processi produttivi e al conseguente aumento dell'efficienza. Un altro tema importante è la capacità di riconoscere ex-ante le fonti di errore e il loro impatto sui tempi del processo. Questo aspetto è strettamente legato alla complessità, in quanto un prodotto più complesso genera più cause di difetti. Ciò può essere legato al numero di componenti, alla loro forma oppure alla difficoltà della sequenza di assemblaggio. Il processo collaborativo può creare vantaggi per alcune forme di complessità, ad esempio suggerendo in maniera piuttosto naturale le attività da svolgere all'operatore. Questo potrebbe rivelarsi un vantaggio soprattutto se fosse richiesto un elevato livello di flessibilità durante la produzione, in quanto cambiando il prodotto cambierebbe anche la sequenza delle attività, generando incertezza nell'operatore, che verrebbe eliminata dalla presenza del cobot. Per altre fonti di complessità invece il cobot potrebbe non essere altrettanto vantaggioso. La forma dei componenti, ad esempio, potrebbe essere un fattore determinante nella generazione di difetti. Durante gli esperimenti il cobot ha riscontrato difficoltà maggiori nella presa di pezzi di forma curva. L'elaborazione di una misura della complessità delle attività da svolgere è un ulteriore elemento di interesse per l'HRC e può facilitare l'assegnazione ex-ante dei task, andando a definire il miglior attore che possa svolgerle in funzione della complessità. Le safety native possono rivelarsi anch'esse un problema per la produttività, empiricamente infatti è accaduto spesso durante la prova che il robot interrompesse il processo per ragioni di sicurezza, quando in realtà non era presente alcun rischio per l'operatore. Questi blocchi erano spesso dovuti ai sensori di forza del cobot che rilevavano una pressione superiore al valore soglia a causa di movimenti dei blocchi del piano di lavoro. Ciò non metteva a rischio in alcun modo l'indennità fisica dell'operatore, ma creava interruzioni che rallentavano in maniera consistente il processo. Questo problema è dovuto alla mancanza di capacità cognitive del cobot. La nuova frontiera della ricerca industriale si sta muovendo proprio in questa direzione. Attraverso sistemi di visione integrata e processori più veloci, in grado di elaborare rapidamente i dati spaziali è possibile garantire maggiore continuità al processo. I nuovi cobot saranno in grado, in presenza di un ostacolo, di aggirarlo, senza interrompere il processo, elaborando percorsi alternativi. L'implementazione di questi elementi in un cobot potrebbe rappresentare un punto di svolta per la tecnologia, in quanto permetterebbe la rimozione di tutti i vincoli riscontrati durante le nostre prove, che sono stati cause di inefficienza. Ricapitolando i cobot permettono per loro intrinseca natura di aumentare la flessibilità e quindi si coniugano in maniera perfetta con il nuovo paradigma del mercato di personalizzazione di massa che sta soppiattando il concetto

di produzione di massa. Considerando invece il carico di lavoro per gli operatori i risultati del lavoro sono ambigui, i parametri dell'HRV attestano uno stress maggiore con l'utilizzo del cobot, mentre l'EDA mostra risultati sicuramente migliori. La debolezza di questo studio risiede nel fatto che gli operatori svolgono solamente due sessioni per tipologia di prova, i due parametri fisiologici hanno valori che inizialmente segnalano uno stress elevato, causato dalla scarsa conoscenza del cobot e del processo, ma che poi vanno a migliorare aumentando il numero di prove. Questo fenomeno nelle prive prove determina uno spostamento sistematico verso valori complessivamente peggiori dei parametri fisiologici. Far ripetere i test agli operatori una volta completato il processo di apprendimento e di ambientamento con il cobot permetterebbe di avere dati depurati da questo errore sistematico e quindi più vicini al contesto industriale, in cui gli operatori svolgono le attività in maniera continua nel tempo.

Glossario

Conduttanza: è la facilità con cui un conduttore si lascia attraversare dal flusso di corrente, di fatto è misurabile come l'inverso della resistenza.

Deviazione standard N-N (SDNN): è la deviazione standard degli intervalli "normal to normal" che sono generalmente identici agli intervalli interbattito.

Electrodermal activity (EDA): la secrezione di sudore da parte delle ghiandole sudoripare è un indice dell'attività del sistema nervoso simpatico (SNS), il quale controlla le funzioni corporee involontarie. Stimoli cognitivi ed emotivi attivano l'SNS, provocando un aumento della sudorazione che determina una maggiore conduttanza cutanea.

Intervallo interbattito (IBI): è la distanza tra due onde-R consecutive, cioè tra due battiti cardiaci.

Nasa – TLX: è uno strumento di autovalutazione soggettivo multidimensionale utilizzato per determinare il carico di lavoro percepito, al fine di valutare un'attività. È stato citato in oltre 4400 studi ed è utilizzato in una varietà di settori che spaziano dalla sanità all'aviazione.

Payload: in italiano la capacità di carico, rappresenta il carico massimo sopportabile da un macchinario, in questo caso quindi dal cobot. È una specifica tecnica tipica di ogni cobot, il carico sopportato è misurato da dei sensori presenti nei giunti.

Safety native: le safety native sono l'insieme delle funzioni di sicurezza implementate all'interno del cobot.

Skin Conductance Level (SCL): è livello della conduttanza elettrica della pelle, riflette il livello di eccitazione fisica e psicologica di un individuo. È misurata in microsiemens (μS).

Skin Conductance Response (SCR): durante la misurazione dell'EDA sono frequenti degli aumenti improvvisi della conduttanza, dei veri e propri picchi che rappresentano momenti di agitazione psicologica o fisica. Viene imposta una soglia che determina l'aumento minimo dell'EDA a partire dalla baseline per poter considerare la variazione un picco. La skin conductance response è la misura del cambiamento dell'EDA.

Swept volume: in italiano, il volume totale spazzato dal braccio robotico nel suo movimento.

Teach pendant: è l'interfaccia di comunicazione tra il cobot e l'operatore, nel caso del cobot UR3e utilizzato il teach pendant è rappresentato da un tablet touchscreen. Esso permette di programmare le attività del cobot, ma anche di controllare l'andamento del processo, aumentando o diminuendo la velocità di movimento, il payload e di ripristinare il programma in caso di interruzioni dovute alla sicurezza.

Valore quadratico medio delle differenze successive dei battiti cardiaci (RMSSD): è la radice quadrata della media della differenza tra intervalli interbattito successivi.

Bibliografia

[1] A. Colim, C. Faria, J. Cunha, J. Oliveira, N. Sousa, and L. A. Rocha, "Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics," *Safety*, vol. 7, no. 1, p. 14, Feb. 2021, doi: 10.3390/safety7010014.

[2] M. Ciccarelli *et al.*, "A system to improve the physical ergonomics in Human-Robot Collaboration," *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 689–698, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.267.

[3] Moussavi-Najarkola, S & Khavanin, Ali. *" Work related musculoskeletal disorders of the upper limbs among steel industry populations". Acta Medica Iranica*. vol 45. p. 405-414. ,2007.

[4] P. K. Hembecker, D. C. Reis, A. C. Konrath, L. A. Gontijo, and E. A. D. Merino, "Investigation of musculoskeletal symptoms in a manufacturing company in Brazil: a cross-sectional study," *Brazilian Journal of Physical Therapy*, vol. 21, no. 3, pp. 175–183, May 2017, doi: 10.1016/j.bjpt.2017.03.014.

[5] W. Kim et al., "Adaptable Workstations for Human-Robot Collaboration: A Reconfigurable Framework for Improving Worker Ergonomics and Productivity," *in IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 3, pp. 14-26, Sept. 2019, doi: 10.1109/MRA.2018.2

[6] R. Müller, M. Vette, and A. Geenen, "Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 13–21, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.113. 890460.

[7] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio, and G. Rosati, "Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review," *Robotics*, vol. 8, no. 4, p. 100, Dec. 2019, doi: 10.3390/robotics8040100.

[8] Isidori A., 1986. Il Mondo dei Robot: I Protagonisti dell'Automazione Industriale. Edited by Giunti Barbera.

[9] A. Gasparetto and L. Scalera, "A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century," *Advances in Historical Studies*, vol. 08, no. 01, pp. 24–35, 2019, doi: 10.4236/ahs.2019.81002.

[10] Mattessich Paul W et al. "Collaboration--What Makes It Work : A Review of Research Literature on Factors Influencing Successful Collaboration". *Amherst H. Wilder Foundation* ,1992.

[11] M. A. Goodrich and A. C. Schultz, "Human-Robot Interaction: A Survey," *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 1, no. 3, pp. 203–275, 2007, doi: 10.1561/1100000005.

[12] R. Gervasi, L. Mastrogiacomo, D. A. Maisano, D. Antonelli, and F. Franceschini, "A structured methodology to support human–robot collaboration configuration choice," *Production Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 435–451, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11740-021-01088-6.

[13] S. Robla-Gomez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. Gonzalez-Sarabia, C. Torre-Ferrero, and J. Perez-Oria, "Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26754–26773, 2017, doi: 10.1109/access.2017.2773127.

[14] V. Gopinath and K. Johansen, "Understanding situational and mode awareness for safe human-robot collaboration: case studies on assembly applications," *Production Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, Dec. 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0868-2.

[15] M. Vasic and A. Billard, "Safety issues in human-robot interactions," 2013 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 197-204, doi: 10.1109/ICRA.2013.6630576

[16] O. Ogorodnikova, "Methodology of safety for a human robot interaction designing stage," 2008 *Conference on Human System Interactions*, 2008, pp. 452-457, doi: 10.1109/HSI.2008.4581481.

[17] B. C. Jiang and C. A. Gainer, "A cause-and-effect analysis of robot accidents," *Journal of Occupational Accidents*, vol. 9, no. 1, pp. 27–45, Jun. 1987, doi: 10.1016/0376-6349(87)90023-x.

[18] B. Lacevic, P. Rocco, and A. M. Zanchettin, "Safety Assessment and Control of Robotic Manipulators Using Danger Field," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 5, pp. 1257–1270, Oct. 2013, doi: 10.1109/tro.2013.2271097.

[19] B. Lacevic and P. Rocco, "Safety-Oriented Control of Robotic Manipulators – a Kinematic Approach," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 11508–11513, Jan. 2011, doi: 10.3182/20110828-6-it-1002.00764.

[20] C. -S. Tsai, J. -S. Hu and M. Tomizuka, "Ensuring safety in human-robot coexistence environment," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 4191-4196, doi: 10.1109/IROS.2014.6943153.

[21] H. Täubig, B. Bäuml and U. Frese, "Real-time swept volume and distance computation for self collision detection," *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 1585-1592, doi: 10.1109/IROS.2011.6094611.

[22] E. G. Gilbert, D. W. Johnson and S. S. Keerthi, "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space," *in IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 193-203, April 1988, doi: 10.1109/56.2083.

[23] D. Antonelli and D. Stadnicka, "Predicting and preventing mistakes in human-robot collaborative assembly," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 743–748, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.204.

[24] Shingo,S. "Zero quality control: Source inspection and the poka-yoke system. " 1986.

[25] Domenico A. Maisano, Dario Antonelli, Fiorenzo Franceschini. " Assessment of Failures in Collaborative Human-Robot Assembly Workcells." *20th Working Conference on Virtual Enterprises (PRO-VE),* Sep2019, Turin, Italy. pp.562-571, ff10.1007/978-3-030-28464-0_49ff. ffhal-02478741f

[26] F. Franceschini and D. Maisano, "Aggregation of incomplete preference rankings: Robustness analysis of the ZM II -technique," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 27, no. 5–6, pp. 337–356, Aug. 2020, doi: 10.1002/mcda.1721.

[27] J. C. Mateus, D. Claeys, V. Limère, J. Cottyn, and E.-H. Aghezzaf, "A structured methodology for the design of a human-robot collaborative assembly workplace," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 5–8, pp. 2663–2681, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03356-3.

[28] G. Bruno and D. Antonelli, "Dynamic task classification and assignment for the management of human-robot collaborative teams in workcells," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 9–12, pp. 2415–2427, Jul. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2400-4.

[29] Panagiota Tsarouchi, Alexandros-Stereos Matthaiakis, Sotiris Makris & George Chryssolouris ,"On a human-robot collaboration in an assembly cell", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30:6, 580-589,2017 DOI: 10.1080/0951192X.2016.1187297

[30] A. K. Inkulu, M. V. A. R. Bahubalendruni, A. Dara, and S. K., "Challenges and opportunities in human robot collaboration context of Industry 4.0 - a state of the art review," Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, Aug. 2021, doi: 10.1108/ir-04-2021-0077.

[31] Y. Kuang, H. Cheng, Y. Zheng, F. Cui, and R. Huang, "One-shot gesture recognition with attention-based DTW for human-robot collaboration," *Assembly Automation*, vol. 40, no. 1, pp. 40–47, Aug. 2019, doi: 10.1108/aa-11-2018-0228.

[32] S. Papanastasiou et al., "Towards seamless human robot collaboration: integrating multimodal interaction," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, no. 9, pp. 3881–3897, Jun. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03790-3.",

[33] R. Gervasi, L. Mastrogiacomo, and F. Franceschini, "A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 3, pp. 841–865, May 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05363-1.

[34] McColl, D., Hong, A., Hatakeyama, N. et al. "A Survey of Autonomous Human Affect Detection Methods for Social Robots Engaged in Natural HRI." *J Intell Robot Syst 82*, 101–133 (2016). https://doi.org/10.1007/s10846-015-0259-2

[35] D. Xu, X. Wu, Y.-L. Chen, and Y. Xu, "Online Dynamic Gesture Recognition for Human Robot Interaction," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 77, no. 3–4, pp. 583–596, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10846-014-0039-4.

[36] M. S. Young, K. A. Brookhuis, C. D. Wickens, and P. A. Hancock, "State of science: mental workload in ergonomics," *Ergonomics*, vol. 58, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2014, doi: 10.1080/00140139.2014.956151.

[37] C. D. Wickens, "Multiple Resources and Mental Workload," Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, vol. 50, no. 3, pp. 449–455, Jun. 2008, doi: 10.1518/001872008x288394.

[38] Gawron, V.J. "Human Performance , Workload and Situational Awareness Measures Handbook, 2nd ed.*", CRC Rress, Boca* , Raton, 2008, doi: 10.1201/9781420064506.

[39] E. M. Argyle, A. Marinescu, M. L. Wilson, G. Lawson, and S. Sharples, "Physiological indicators of task demand, fatigue, and cognition in future digital manufacturing environments*," International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 145, p. 102522, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijhcs.2020.102522.

[40] Marinescu AC, Sharples S, Ritchie AC, Sánchez López T, McDowell M, Morvan HP. "Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload." *Hum Factors.* 2018 Feb;60(1):31-56. doi: 10.1177/0018720817733101.

[41] D. Kulić and E. Croft, "Physiological and subjective responses to articulated robot motion," *Robotica*, vol. 25, no. 1, pp. 13–27, Aug. 2006, doi: 10.1017/s0263574706002955.

[42] T. Arai, R. Kato, and M. Fujita, "Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly," *CIRP Annals*, vol. 59, no. 1, pp. 5–8, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.043.

[43] Prokasy, W. F., & Raskin, D. C. "Electrodermal activity in psychological research*". Academic Pres*, pp-417-477,1973

[44] M. R. Amin and R. T. Faghih, "Identification of Sympathetic Nervous System Activation From Skin Conductance: A Sparse Decomposition Approach With Physiological Priors," *in IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 68, no. 5, pp. 1726-1736, May 2021, doi: 10.1109/TBME.2020.3034632.

[45] R. S. LAZARUS, J. C. SPEISMAN, and A. M. MORDKOFF, "The Relationship Between Autonomic Indicators of Psychological Stress: Heart Rate and Skin Conductance," *Psychosomatic Medicine*, vol. 25, no. 1, pp. 19–30, Jan. 1963, doi: 10.1097/00006842-196301000-00004.

[46] G. Minarini, "Root Mean Square of the Successive Differences as Marker of the Parasympathetic System and Difference in the Outcome after ANS Stimulation*", in Autonomic Nervous System Monitoring* - Heart Rate Variability. London, United Kingdom: IntechOpen, 2020 [Online]. Available: https://www.intechopen.com/chapters/71001 doi: 10.5772/intechopen.89827 .

[47] Kim HG, Cheon EJ, Bai DS, Lee YH, Koo BH. "Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature." *Psychiatry Investig*. 2018 Mar;15(3):235-245. doi: 10.30773/pi.2017.08.17. Epub 2018 Feb 28. PMID: 29486547; PMCID: PMC5900369.

[48] S. Huang, J. Li, P. Zhang, and W. Zhang, "Detection of mental fatigue state with wearable ECG devices," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 119, pp. 39–46, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijmedinf.2018.08.010.

[49] J. Baraglia, M. Cakmak, Y. Nagai, R. Rao, and M. Asada, "Initiative in robot assistance during collaborative task execution," *IEEE Xplore*, 2016. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7451735 (accessed Apr. 26, 2021).

[50] F. Shaffer and J. P. Ginsberg, "An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms," *Frontiers in Public Health*, vol. 5, no. 258, Sep. 2017, doi: 10.3389/fpubh.2017.00258.

[51] Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century. Advances in Historical Studies, 8, 24-35. https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002.

[52] A. Khasnobish, M. Pal, D. Sardar, D. N. Tibarewala, and A. Konar, "Vibrotactile feedback for conveying object shape information as perceived by artificial sensing of robotic arm," *Cognitive Neurodynamics*, vol. 10, no. 4, pp. 327–338, Apr. 2016, doi: 10.1007/s11571-016-9386-0.

Sitografia

https://www.esa-automation.com/it/il-ruolo-dei-cobot-nellindustria-4-0/

https://newsimpresa.it/in-evidenza/2019/11/nelle-smart-factory-i-robot-sono-collaborativi/

https://www.homberger-robotica.com/news/e-voi-sapete-chi-ha-inventato-i-cobot/

https://www.automazioneindustrialeferrazza.it/cobot-collaborative-robot-system-hisory/?lang=en

https://robot.omitech.it/cobot-storia-applicazioni-robot-collaborativi/

https://robotsdoneright.com/Articles/kuka-robotic-history.html

https://wiredworkers.io/blog/from-robot-to-cobot/

https://mecotech.it/cose-la-robotica-di-servizio-un-segmento-della-robotica-che-strizza-locchio-alla-sostenibilita/

https://www.internet4things.it/industry-4-0/robotica-industriale-cose-come-funziona-e-ambiti-applicativi/

https://italianingenio.net/robot-industriali/

https://www.corriere.it/tecnologia/22_luglio_27/processo-robot-serve-riflessione-vincoli-porre-affinche-tecnologia-diventi-pericolosa-08499e90-5ed2-4380-af41-e9e57db34xlk.shtml?refresh_ce

https://www.ilprogettistaindustriale.it/robot-collaborativi-e-operatori-ce-spazio-per-tutti/

https://it.lambdageeks.com/tactile-sensor-design-criteria-application/

https://www.luchsinger.it/it/note-tecniche/sensori-capacitivi-principio-di-misura/

https://www.luchsinger.it/it/sensori/sensori-tattili/

https://onrobot.com/it/prodotti/sensore-forza-coppia-a-6-assi-hex

https://www.torrossa.com/en/resources/an/4132789

https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2018.00036/full

https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/152569

https://www.kuka.com/it-it/future-production/collaborazione-uomo-robot

https://onrobot.com/it/prodotti/sensore-forza-coppia-a-6-assi-hex

https://it.wikipedia.org/wiki/Vidicon

https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/#gallery/29165

https://www.universal-robots.com/it/blog/quali-sono-le-caratteristiche-fisiche-e-i-limiti-dei-cobot/

https://www.srlabs.it/tobii-pro-glasses3-understanding-human-behaviour/