

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione dei controlli di qualità nel processo di
assemblaggio di macchine avvolgitrici**



Relatori

Prof. Maurizio Galetto
Prof. Gianfranco Genta

Candidato

Claudia Testa

a.a. 2018 – 2019

— *C'era una volta...*

— *Un re! — diranno subito i miei piccoli lettori.*

— *No, ragazzi, avete sbagliato. C'era una volta un pezzo di legno.*¹

¹ C. Collodi, *Le avventure di Pinocchio*

INDICE

Capitolo 1. Introduzione	1
Capitolo 2. L'azienda: Tosa Group S.p.a.	4
2.1 L'industria nella Valle Belbo	4
2.2 Storia della Tosa Group S.p.a.....	8
2.3 Il portfolio prodotti.....	10
2.4 Numeri presenti e sviluppi futuri.....	15
2.5 Organigramma aziendale ed organizzazione della produzione.....	18
Capitolo 3. Modellizzazione probabilistica delle procedure di ispezione	24
3.1 Scopo ed utilità dei modelli	24
3.2 Cenni storici	25
3.3 Modellizzazione dei difetti	27
3.4 Procedure di ispezione	34
3.5 L'indicatore di efficacia dell'ispezione e l'indicatore dei costi di ispezione	36
3.5.1 L'indicatore di efficacia dell'ispezione.....	37
3.5.2 L'indicatore del costo dell'ispezione	38
3.6 Esempio applicativo: assemblaggio di durometri.....	40
Capitolo 4. Caso studio applicativo	43
4.1 La macchina avvolgitrice ad anello rotante.....	43
4.1.1 Descrizione meccanica e funzionale.....	43
4.1.2 Descrizione processo di assemblaggio	48
4.2 Il gruppo prestiro	49
4.2.1 La scelta del gruppo prestiro	49
4.2.2 Descrizione meccanica del gruppo prestiro	52
4.2.3 La mappatura del processo di assemblaggio.....	54
4.2.4 L'individuazione delle tecniche di ispezione adottate.....	59

4.3 La raccolta dei dati sperimentali	61
4.3.1 I parametri per il calcolo del fattore di complessità di processo <i>CfP, i</i>	61
4.3.2 La stima dell'esperto dei <i>DPUI</i>	63
4.3.3 I parametri per il calcolo del fattore di complessità di progetto <i>CfD, i</i>	63
4.3.4 I parametri per il calcolo dei costi dell'ispezione	67
Capitolo 5. Risultati sperimentali del caso studio	69
5.1 L'indicatore di efficacia dell'ispezione.....	69
5.1.1 L'elaborazione dei dati sperimentali	69
5.1.2 Commento ai risultati della sperimentazione	74
5.2 L'indicatore del costo di ispezione	78
5.2.1 L'elaborazione dei dati sperimentali	78
5.2.2 Commento ai risultati della sperimentazione	79
Capitolo 6. Conclusioni	81
Appendice.....	82
Bibliografia.....	117
Ringraziamenti.....	119

Capitolo 1. Introduzione

L'assemblaggio cioè il complesso di operazioni necessarie per mettere insieme le varie parti precostituite di un manufatto² è una funzione critica dell'industria manifatturiera nel momento in cui sia necessario valutare i costi e la Qualità dei suoi processi.

Appositi studi di settore, individuano quattro principali cause del verificarsi di difetti del prodotto riconducibili a questa fase:

- errata progettazione;
- difettosità presenti nei componenti parte dell'assieme;
- variazioni nella sequenza di operazioni originalmente pensate per l'assemblaggio (è il caso, ad esempio, della variazione nella schedulazione della produzione);
- errore umano.

In merito ai primi tre fattori chiave menzionati sopra, numerose ricerche portate a termine hanno permesso di individuare strumenti per la gestione e il controllo qualità delle rispettive difettosità. Tra questi rientrano ad esempio metodologie come la FMEA o il DOE per la valutazione e il miglioramento della fase di progettazione di prodotto oppure il Controllo Statistico di Processo (SPC) per il controllo della variabilità.

L'ultima categoria invece risulta essere quella che più influenza la *performance* complessiva dell'intero processo di assemblaggio del prodotto finale: per questo motivo, ridurre il numero delle difettosità conseguenti è fondamentale se l'obiettivo finale del *management* della produzione è un processo produttivo funzionante in termini di efficacia ed efficienza, nonché controllare saldamente la qualità e i costi finali del prodotto in uscita dallo stabilimento.

La presente Tesi è stata svolta in collaborazione con la Tosa Group S.p.a., solida realtà aziendale nel panorama dell'industria metalmeccanica della Valle Belbo, dove l'autrice ha trascorso un periodo di stage di sei mesi, da Luglio a Dicembre 2018.

La stretta sinergia con l'azienda ospitante sopra menzionata ha permesso di sviluppare uno studio completo e di ampie vedute con un duplice obiettivo. Il primo dei due obiettivi è la verifica dell'applicabilità di modelli matematici innovativi volti a prevedere il tasso di difettosità indotto dall'operatore a un caso studio reale, cioè all'assemblaggio meccanico di un sottogruppo di una macchina avvolgitrice. I dati raccolti sperimentalmente sono stati analizzati, in una prima fase, utilizzando i modelli della letteratura seguendo le indicazioni di quello che sarà definito il *modello elettromeccanico* ovvero lo stato dell'arte, quanto cioè reperibile dalle ultime pubblicazioni sull'argomento. In una seconda fase, invece, si sono integrate alcune delle indicazioni precedenti con la conoscenza del processo, specifica del caso studio, fornita da un certo numero di esperti individuati all'interno dell'azienda ospitante. Il secondo obiettivo è la quantificazione dei costi legati all'ispezione. Il costo dell'ispezione si annovera tra i così chiamati *costi di Qualità* e in quanto tale si aggiunge a quello che è il valore vivo del componente elettromeccanico. Questo costo risulta, per la Gestione della Produzione, non sempre facile da quantificare e a questo scopo, come si vedrà, il modello di riferimento fornisce un facile paradigma di calcolo.

² *vocabolario Treccani*

Infine, a correlazione di tutto quanto scritto sopra, i risultati ottenuti permettono di convalidare anche l'importanza diagnostica dei modelli implementati in fase di montaggio meccanico degli assiemi nonché la loro efficacia come ausilio a livello aziendale qualora sia necessario progettare procedure di ispezione per produzioni di piccoli lotti di prodotto.

La struttura logica dei contenuti della Tesi è impostata come segue.

Dopo la breve introduzione fornita dal presente Capitolo, il Capitolo 2 è interamente dedicato alla presentazione della Tosa Group S.p.a., azienda metalmeccanica del cuneese, partner aziendale in questo studio nonché del contesto produttivo in cui è inserita l'Impresa cioè la Valle Belbo. Si fornisce una panoramica delle tipologie di prodotto assemblate nello stabilimento, alcuni dati utili riguardanti gli stessi; infine chiude il Capitolo una panoramica sulla struttura dell'impresa e il lavoro delle sue Funzioni con dettaglio sull'organizzazione dell'Area Produttiva.

Nelle pagine che seguono (Capitolo 3) si riassumono innanzitutto le necessità dell'industria manifatturiera che costituiscono le motivazioni della nascita e sviluppo di modelli matematici per la previsione a priori del tasso di difettosità dovuti ad assemblaggio manuale effettuato da operatori e del costo dell'ispezione. Si menzionano e dettagliano gli *impulsi* dati da studi precedenti alla definizione dei due modelli sopra menzionati, nati a partire dagli anni '90 del secolo scorso, per arrivare infine al contributo fornito dal gruppo di ricerca di Ingegneria della Qualità del Dipartimento di Ingegneria Gestionale (DIGEP) del Politecnico di Torino.

In ultimo, si descrivono le componenti dei modelli secondo il corrente stato dell'arte e si fornisce, per meglio orientare il lettore alla lettura dei successivi paragrafi, un breve riassunto di un caso studio recentemente implementato.

Il Capitolo 4 e il Capitolo 5 sono interamente dedicati al caso studio di questo scritto.

Per quanto riguarda il Capitolo 4, il primo paragrafo si focalizza sul gruppo prestiro, cioè l'assieme elettromeccanico al centro di questo testo: se ne fornisce una descrizione meccanica e funzionale e si illustrano le motivazioni che hanno condotto alla sua individuazione come oggetto di ricerca. Il secondo paragrafo dettaglia la metodologia con cui l'autore ha raccolto, presso l'azienda ospitante, i dati sperimentali necessari, le ipotesi sottostanti l'interpretazione di alcuni di essi nonché alcuni adattamenti previsti, rispetto al modello da letteratura precedentemente illustrato, necessari per rispondere alla realtà del contesto produttivo di riferimento.

Il Capitolo 5 costituisce il frutto di questo lavoro in quanto contiene l'elaborazione dei dati sperimentali raccolti ed illustrati nelle pagine precedenti e le relative conclusioni.

Conclude questo scritto il Capitolo 6, contenente alcune considerazioni finali sui risultati ottenuti nel Capitolo precedente, raccomandazioni in ambito Qualità rivolte all'azienda ospitante lo studio ed indicazioni per lavori futuri sullo stesso argomento.

Questo lavoro è dedicato *A tutte le meravigliose storie incontrate nelle Langhe.*

Il suo contenuto trae vita da un periodo diretto e costruttivo che chi scrive ha trascorso tra l'Ufficio Tecnico e l'Area Produttiva della Tosa Group S.p.a.; esso rappresenta, dunque, in primo luogo una summa di quanto vissuto ed appreso nel corso della propria prima esperienza lavorativa. Il contatto con un contesto produttivo reale e funzionante, con le sue dinamiche e le sue questioni quotidiane ha costituito in atto una entusiasmante sfida e, a posteriori, un fondamentale orientamento per il futuro.

Nel ringraziare fin da subito quanti hanno collaborato al suo svolgimento, l'autrice si augura che i suoi *venticinque lettori*³ sperimentino la stessa piacevolezza e soddisfazione che per lei ha costituito scriverla.

³ A. Manzoni, *I promessi sposi*

Capitolo 2. L'azienda: Tosa Group S.p.a.

2.1 L'industria nella Valle Belbo

La Valle Belbo è una valle del Basso Piemonte, situata lungo il corso dell'omonimo torrente. La regione parte dal confine con la Provincia di Savona e si estende a sud della Provincia di Asti fino a comprendere alcune zone della Provincia di Cuneo e di Alessandria (Figura 1).

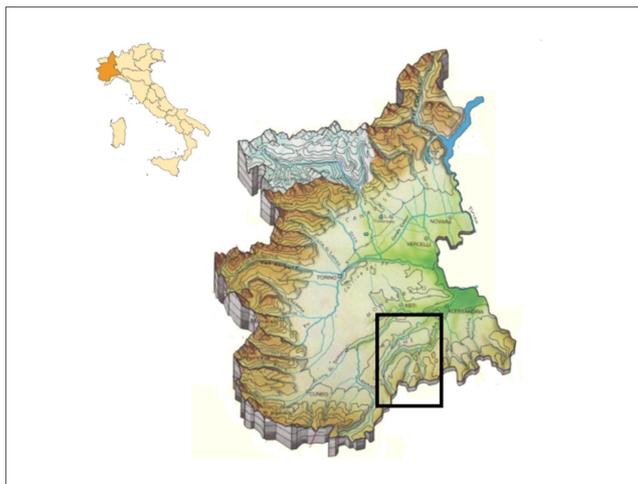


Figura 1 - La cartina geografica della regione Piemonte, con evidenziata la regione della Valle Belbo.

Sorge in una zona famosa per la produzione di vino, caratterizzata da panorami collinari, prevalentemente coltivate a vigneti e nocioleti. Nel 2014, l'UNESCO ha iscritto i paesaggi vitivinicoli di Langhe-Roero e Monferrato alla *World Heritage List* per l'"eccezionale testimonianza vivente della tradizione storica della coltivazione della vite, dei processi di vinificazione, di un contesto sociale, rurale e di un tessuto economico basati sulla cultura del vino nonché per la testimonianza del profondo legame tra il territorio, il patrimonio costruito degli insediamenti e l'attività agricola che hanno trasformato il paesaggio" (<http://whc.unesco.org/en/list/1390>, *Criterion iii*) (Figura 2). La varietà di nocciolo tipica di queste zone, denominata Tonda Gentile Trilobata ha ottenuto il marchio I.G.P. nel 1993, è alla base della ricetta del gianduia ed è apprezzata in tutto il mondo per il suo aroma e le sue qualità organolettiche.



Figura 2 - Tipica veduta estiva delle Langhe (Coazzolo, AT).

Il principale centro della Valle Belbo è Canelli (10439 abitanti, dato 2017) (Figura 3). La sua economia è fortemente legata alle risorse del territorio ed ha le sue radici storiche nella coltivazione della vite e sulla lavorazione dello spumante e del moscato. Nel tempo, questo ha portato allo sviluppo di manifatture e servizi di supporto ai processi primari. Il Comune di Canelli è sede di molte rinomate ed antiche aziende vinicole come Gancia, Bosca e Bocchino; una buona parte di tali imprese è ancora oggi a conduzione familiare.



Figura 3 - Veduta di Canelli (AT) (fonte: Wikipedia).

Accanto a queste aziende, a partire dagli anni '90 si è assistito nel territorio alla nascita di molte aziende per la produzione di macchine enologiche. In pochi decenni, il comparto eno-meccanico della regione è cresciuto, in parallelo ai processi di innovazione avvenuti nella lavorazione e vinificazione, ed è attualmente un'eccellenza riconosciuta a livello mondiale, testimoniata dai volumi e dall'estensione degli affari e dei mercati delle sue imprese.

Le 151 aziende presenti in Valle Belbo, nel 2015 registrato un fatturato complessivo pari a circa 1,2 milioni di euro, occupando oltre 2200 addetti; mediamente, le imprese della regione hanno raggiunto un fatturato di 8,1 milioni di euro, un EBITDA di 1,4 milioni e un numero di dipendenti pari a 18. Fatturato e redditività nel periodo tra il 2012 e il 2015 hanno registrato una crescita dell'8,6% e dell'11,9%. Una ripartizione per classi dimensionali delle imprese e il contributo di ciascuna classe al risultato complessivo è presentato in [Tabella 1](#).

	Aziende di grandi dimensioni (>50 milioni di euro)	Aziende di medie dimensioni (10-50 milioni di euro)	Aziende di piccole dimensioni (2-10 milioni di euro)	Aziende di micro dimensioni (>2 milioni di euro)
Numero di Aziende	2	13	62	74
Dipendenti	206	498	955	587
Fatturato medio	242 milioni	29.1 milioni	4,5 milioni	1 milione
Trend fatturato	-17,1 %	13,5 %	10,3 %	5,8 %
EBITDA medio	4,6 milioni	2,3 milioni	0,5 milioni	0,25 milioni
Trend EBITDA	-36 %	30,4 %	4,3 %	nd

Tabella 1 - Tabella comparativa delle 151 imprese presenti in Valle Belbo (fonte: Apro Tech, 2015).

Dai dati appare evidente che la maggior parte delle imprese del territorio sia di dimensione micro o piccola ma emerge anche come siano quelle di medie dimensioni a ottenere i migliori risultati sia in termini di redditività che di crescita del fatturato. I settori di attività più rappresentati sono il commercio all'ingrosso, la produzione di bevande, la fabbricazione di macchinari ed attrezzature.

La filiera dell'industria eno-meccanica ed impiantistica è un settore strategico per lo sviluppo industriale della Valle Belbo. Dati raccolti nel biennio 2017-2018 confermano che si tratta di un settore sviluppato e in crescita nonché un attore attivo nel mercato globale. Cresciuta del 6% nel 2017, la produzione nella meccanica è salita fino a raggiungere l'11% nel 2018, esplosione trainata soprattutto dagli ordinativi provenienti dall'estero ([Figura 4](#)).

Il valore dell'export delle imprese astigiane è cresciuto, nel periodo sopra menzionato, dell'82% e il settore della meccanica impiantistica ne costituisce oltre l'80%. In questo contesto, l'Europa rappresenta ancora la destinazione di circa il 50% dei prodotti, un 40% è rappresentato dalle Americhe mentre sono in rapida crescita i mercati dell'est asiatico (Cina ed India in primis), come mostrato in [Figura 5](#).

Il quadro complessivo che emerge quindi, è quello di un territorio che prima di altri, anche confinanti, è riuscito ad intraprendere la strada di uscita dalla crisi del 2008, partendo dalle sue solide radici storiche, assecondando prima e sviluppando poi quelle che sono le sue naturali proprietà. La qualità tecnica, creatività e flessibilità unita al dinamismo imprenditoriale hanno permesso lo sviluppo della competitività delle imprese della Valle Belbo sui mercati nazionali e globali.

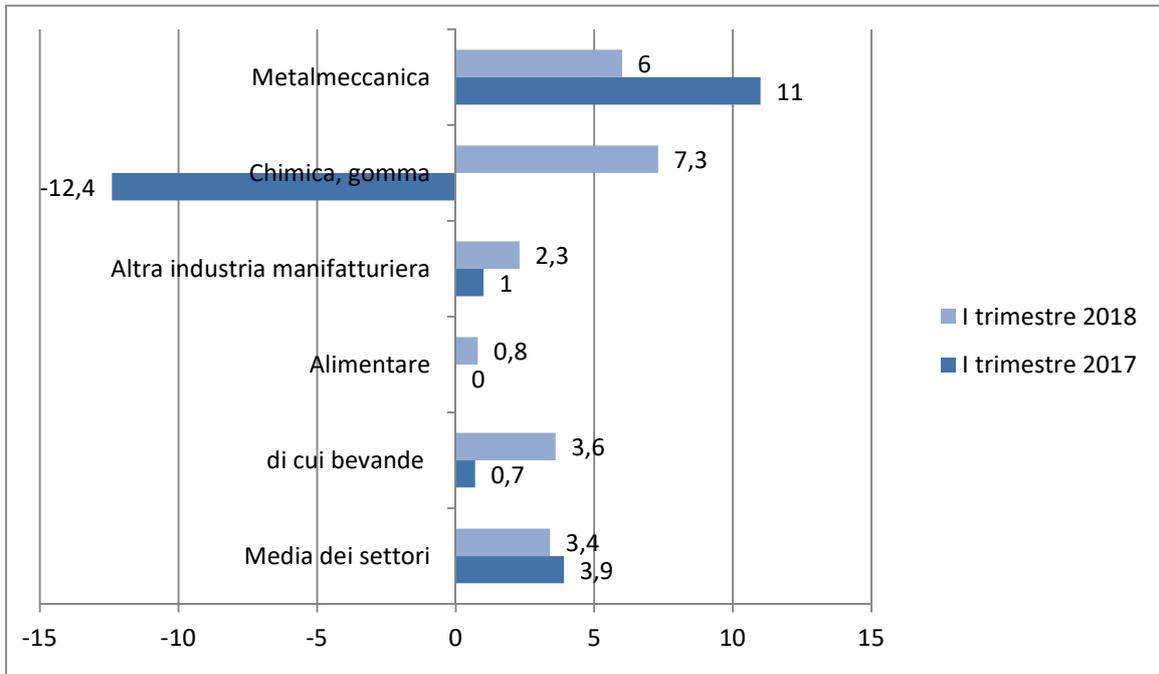


Figura 4 - Crescita percentuale della produzione per settore di attività (adattamento da fonte Camera di Commercio di Asti).

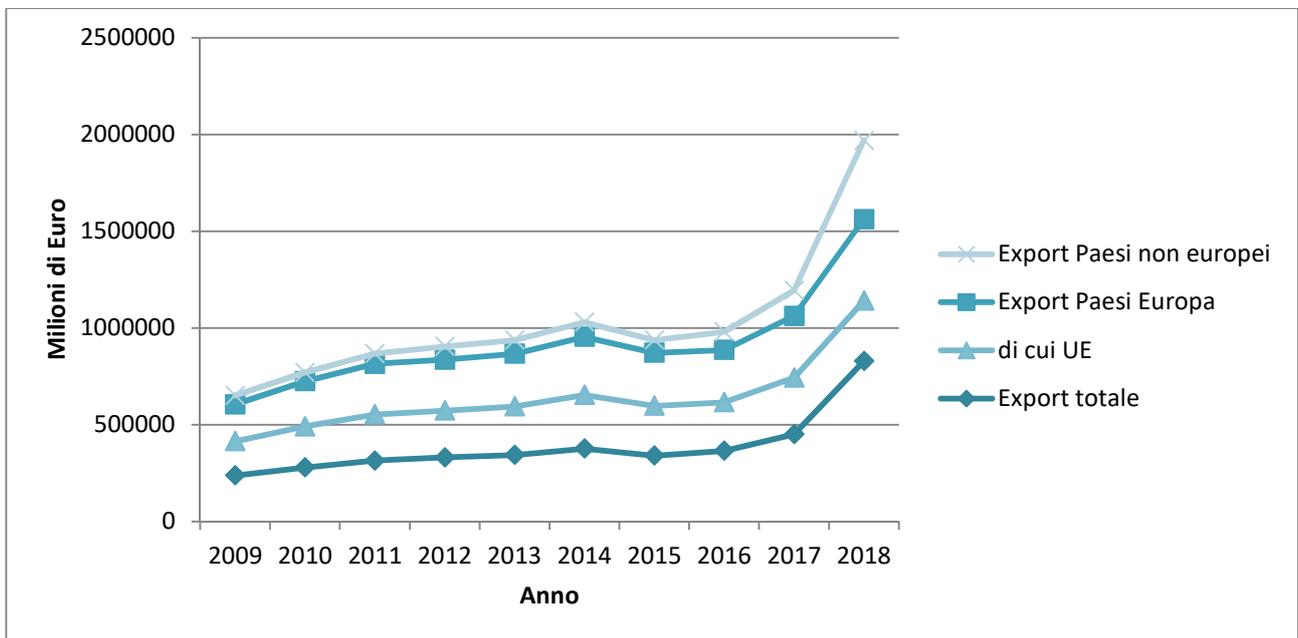


Figura 5 - Andamento delle esportazioni nella Provincia di Asti (adattamento da fonte Camera di Commercio di Asti).

Questo processo è destinato a durare nei prossimi anni e produrrà trasformazioni importanti a livello di tecnologie, organizzazione delle imprese e fabbisogni di manodopera qualificata, in aziende in cui la condizione familiare e la proprietà diretta conta comunque in modo prevalente.

2.2 Storia della Tosa Group S.p.a.

In questo contesto, si inserisce la Tosa Group S.p.a. (Figura 6).

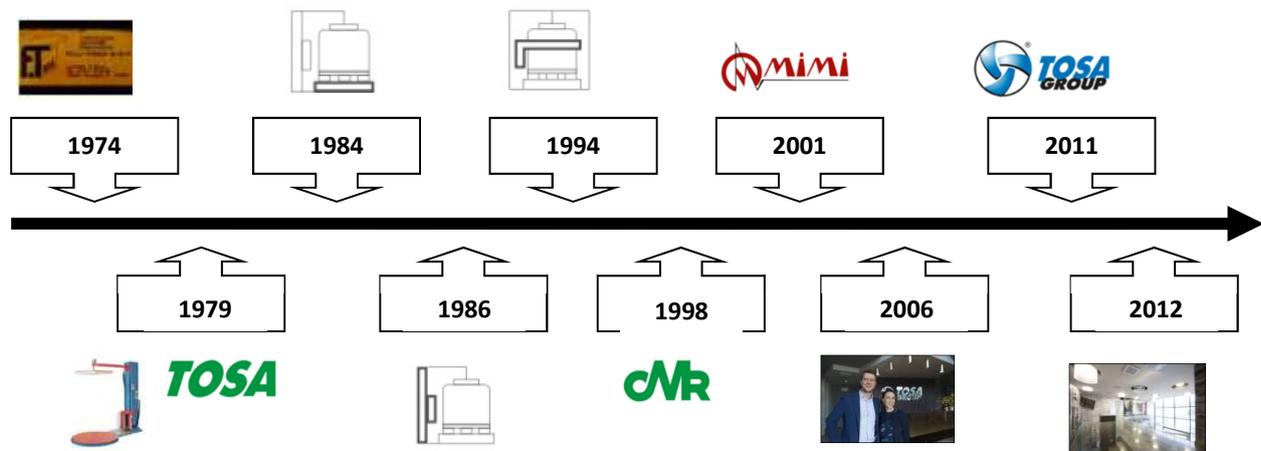


Figura 6 - Cronologia fondamentale della Tosa Group S.p.a.

Nata alla fine degli anni '90 come micro impresa dedita alla costruzione di macchine enologiche, l'azienda ha saputo innovarsi ed espandersi; oggi è un'industria di medie dimensioni, con una struttura consolidata ed in continua crescita sui mercati esteri. Il settore enologico rappresenta attualmente per l'impresa la parte marginale di fatturato: di fatto è la vasta gamma di macchine per il fine linea a costituire la maggior parte del venduto e del ricavato; prodotti che la posizionano anche tra i leader del mercato internazionale di questa categoria merceologica.

La storia del gruppo fonda le sue radici nel 1974, quando, a Cossano Belbo (CN), nasce la Fratelli Tosa S.d.f., dedita alla costruzione di macchine enologiche.

A partire da questa esperienza, nel 1979, Giuseppe Tosa fonda Tosa s.r.l., che nel 1979 mette sul mercato un primo modello di avvolgitore semiautomatico. L'evoluzione della linea avvolgitori prosegue: nel 1984 viene creato l'avvolgitore automatico a piattaforma rotante, al 1994 risale la prima macchina avvolgitrice a braccio rotante ed infine, nel 1994, la gamma Tosa si amplia ulteriormente con l'invenzione della macchina avvolgitrice ad anello rotante.

Nel 1998 viene acquisita la CMR, storica realtà del pavese, specializzata nella produzione di reggiatrici e una delle prime a brevettare la testata di reggiatura. Nel 2001 entra a far parte del Gruppo anche il marchio Mimi, una delle aziende pioniere della fardellatura, italiana ma con una solida rete commerciale internazionale. Grazie anche a questo ultimo acquisto, l'azienda prospera, amplia il volume e il raggio dei suoi affari nonché il numero dei suoi dipendenti: nel 2012 l'impresa trasferisce le sue attività nella nuova sede presso l'area industriale di Santo Stefano Belbo (CN).

Nel 2006 entra nella direzione della azienda la nuova generazione, i due figli del fondatore, Fabio e Serena, alla guida rispettivamente del comparto Amministrativo e Commerciale.

Il Gruppo è una delle tre società di capitali presenti nella regione: la fusione di Tosa s.r.l. con le due realtà CMR e Mimì, porta nel 2011 al cambio della struttura proprietaria dell'impresa che diventa quindi società di capitali con il nome di Tosa Group S.p.a.

“Uomo di poche parole ma grande pensiero” (cit. Massimo Gallesio), Giuseppe Tosa scompare prematuramente nel 2007; da allora, con incessante lavoro e dedizione, la proprietà e i suoi dipendenti continuano a portare avanti quanto da lui cominciato, rendendo ogni giorno di più la Tosa Group S.p.a. un'eccezione tutta italiana (Figura 7).

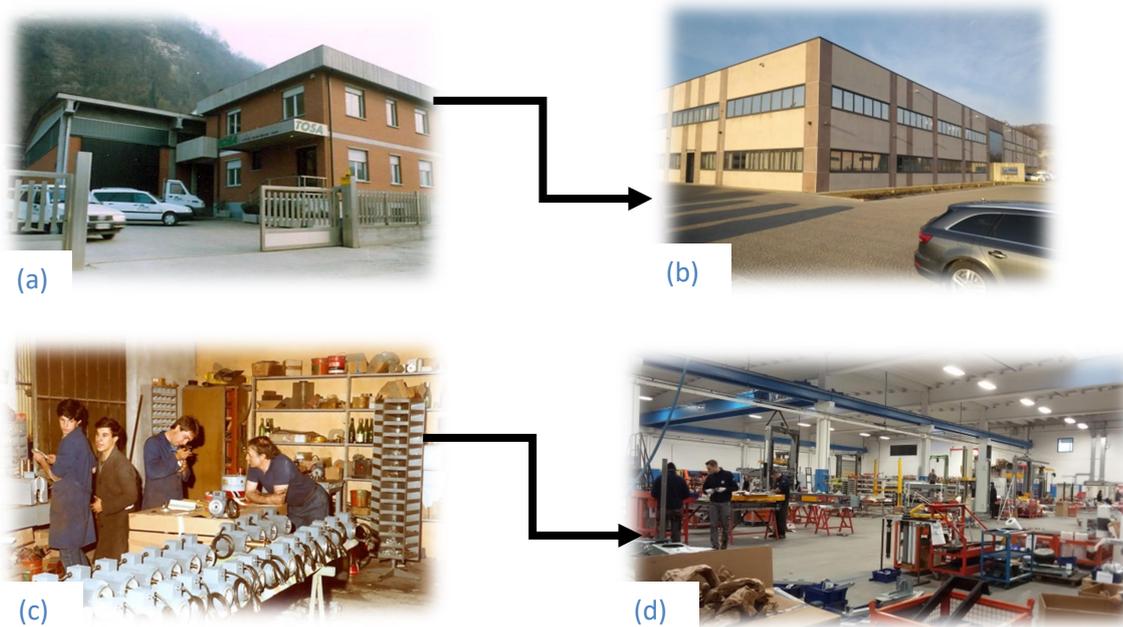


Figura 7 - Ieri ed oggi in Tosa Group S.p.a. (a) La prima sede dell'Azienda a Cossano Belbo (CN) (b) L'attuale sede dell'Azienda a Santo Stefano Belbo (CN) (c) L'Officina alla fine degli anni '90 (d) L'Officina oggi (2018). (fonte: <https://www.tosagroup.com/>)

2.3 Il portfolio prodotti

Ad oggi quindi, il Gruppo è composto dai brand TOSA, CMR e Mimi: tre marchi dedicati rispettivamente alle macchine avvolgitrici, reggitrici e fardellatrici.

Questa triplice ripartizione, che si riflette nell'organizzazione della produzione (vedi [Capitolo 2, § 2.5](#)) è il segreto alla base del vasto *know how* aziendale, in grado di soddisfare tutte le molteplici esigenze di stabilizzazione, conservazione e sicurezza dei carichi pallettizzati. Uno staff tecnico-ingegneristico competente e dinamico assicura la pronta risoluzione di problematiche e propone soluzioni personalizzate al cliente, soddisfacendo ogni esigenza di produzione e di spazio.

Sistemi di movimentazione e macchine per l'enologia, completano la gamma dei prodotti offerti sul mercato, macchine ed accessori efficaci ed innovative, frutto dell'esperienza e della ricerca. Una schematizzazione delle macchine assemblate dal mondo Tosa Group S.p.a. è rappresentata in [Figura 8](#).



Figura 8 - Panoramica del portfolio prodotti offerto dalla Tosa Group S.p.a. (2018)

Ogni sistema, viene progettato tenendo presente i seguenti criteri guida:

- Massima efficienza
- Minima manutenzione
- Massimo risparmio
- Lunga durata

Massimizzare l'efficienza significa garantire le massime prestazioni della macchina, qualsiasi sia la condizione di utilizzo richiesta dal cliente.

Dispositivi *Time Saving* come la *Troubleshooting Smart Interface* cioè l'interfaccia grafica che guida l'operatore nella risoluzione delle anomalie, il dispositivo di cambio bobina automatico (per le macchine a film) coperto da brevetto internazionale e il dispositivo *Tailfree* che elimina il problema legato al controllo sagoma in ingresso al magazzino automatico garantiscono riduzione dei fermi macchina e quindi efficienza produttiva.

Ridotta necessità di film e la diminuzione dei costi dei consumabili della macchina, essendo garantito, con la tecnologia *Smart Wrapping*, un avvolgimento ottimale del carico pallettizzato anche mediante utilizzo di materiale filmico standard permettono di ridurre i costi di esercizio. A livello software, la funzione *Carbon Footprint Smart Interface* permette di verificare, da pannello operativo, i consumi energetici della macchina.

Per quanto riguarda la sicurezza, l'Azienda applica la normativa italiana D.M. 2006/42/CE e la norma armonizzata UNI EN ISO 12100:2010, con lo scopo di garantire l'incolumità delle persone, delle macchine e dei carichi. Sono previste infatti:

- sistemi anticaduta per tutti i carichi sospesi;
- area di lavoro della macchina segregata mediante barriere materiali ed immateriali;
- fonti di energia della macchina selezionabili e lucchettabili.

Per i carichi pallettizzati, sistemi automatici di metri angolari, metri cartoncino e metri travetti, integrati nel ciclo macchina, assicurano la massima stabilizzazione a tutte le categorie merceologiche richieste dal cliente. La possibilità di effettuare oltre che cicli standard, anche cicli antipolvere ed ermetici, a salvaguardia ulteriore dell'integrità delle merci pallettizzate durante il trasporto e lo stoccaggio.

Per quanto riguarda la manutenzione, ogni dispositivo Tosa è progettato per garantire la minima manutenzione possibile nel corso della sua vita utile. Il *design for low maintenance*, come viene chiamato, implica che in fase di progetto vengano previsti:

- pochi e centralizzati punti di lubrificazione;
- trasmissione del moto tramite cinghie piuttosto che catene;
- gruppo di sollevamento con motorizzazione diretta ;
- organi di scorrimento con lubrificazione a vita infinita.

La conservazione nel tempo delle prestazioni della macchina è supportata in servizio dal suo software di controllo e gestione: sono infatti implementate la *Preventive Maintenance smart interface* e la *Predictive Maintenance smart interface* che sono in grado di verificare le condizioni effettive di operatività e segnalare, tramite pannello, la necessità di piccoli interventi o di effettuare manutenzione programmata.

Di seguito, si riportano una breve descrizione e le principali caratteristiche dei prodotti Tosa.

Il brand Mimi è specializzato nella produzione di macchine fardellatrici a film termoretraibile per prodotti di varie dimensioni e ha, negli anni, conquistato un posto di rilievo nel mercato nel segmento dei grandi imballi (Figura 9).

Le tre configurazioni, denominate Uniblock, Normal e Norket, permettono soluzioni specifiche per ogni geometria di prodotto, garantendo nel contempo il risparmio energetico. Questo è possibile grazie ad alcuni accorgimenti progettuali come la doppia coibentazione del tunnel, modularità della gestione dei flussi termici, utilizzo di una pre-camera in ingresso e una post-camera in uscita.



Figura 9 - Fardellatrice Mimi modello Norket (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

CMR è il marchio Tosa dedicato alla produzione di macchine reggiatrici per ogni tipologia di prodotto, con cicli orizzontali o verticali. Il segreto dell'eccellenza, è in questo caso, nella testata di reggiatura, pensata con un'architettura semplice per facilitarne la manutenzione ma curandone i materiali in modo da garantire prestazioni durevoli nel tempo.

I tre modelli base previsti, reggiatrice orizzontale, reggiatrice verticale con testata superiore (Figura 10), reggiatrice verticale con testata laterale, consentono una produttività rispettivamente di 80 pallet/ora, 120 pallet/ora, e 60 pallet/ora.



Figura 10 Reggiatrice CMR modello per reggiatura verticale con testata superiore (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

Gli avvolgitori costituiscono il segmento principale del Gruppo Tosa, sia dal punto di vista del volume di produzione annua che del fatturato. Le soluzioni sono pensate per coprire ogni necessità di avvolgimento pallet con film estensibile, assicurando nel contempo massima stabilità di carico, sicurezza e contenimento dei costi. Sono attualmente in catalogo tre tipologie di macchinario: a piattaforma rotante (produttività massima 40 pallet/ora), a braccio rotante (fino a 80 pallet/ora di produttività), ad anello rotante (fino a 160 pallet/ora, Figura 11).

Una trattazione più approfondita di questa ultima categoria, oggetto principale del presente lavoro, è riportata nel [Capitolo 4, § 4.1](#).



Figura 11 - Macchina avvolgitrice ad anello rotante, Tosa modello 126 (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

Sin dalla fondazione, il Gruppo ha dedicato energie e risorse alla progettazione e sviluppo di dispositivi ed accessori per l'enologia. Oggi la gamma disponibile sul mercato include capsulatrici, forni tunnel e testate elettriche, queste ultime disponibili anche in versione da tavolo per produzioni ridotte (Figura 12).



Figura 12 - Testata elettrica da tavolo (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

Infine, su richiesta del cliente, l'Azienda può fornire anche il sistema di trasporto più consono al macchinario acquistato. Si tratta di trasporti a rulli o a catene (Figura 13), modulari ed eventualmente dotati di sistemi di movimentazione, progettati con componentistica di prima scelta ed interamente assemblati nello stabilimento.



Figura 13 - Trasporto a catene (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

Il Reparto Ricerca e Sviluppo della Tosa Group S.p.a. ogni giorno si impegna nell'ideazione di macchine sempre più affidabili e longeve, all'avanguardia del mercato e vicine ai bisogni del cliente.

2.4 Numeri presenti e sviluppi futuri

L'Azienda conta 104 dipendenti tra quadri, impiegati, operai e apprendisti. Il fatturato alla chiusura del Bilancio di Esercizio 2017 è pari a circa 20 milioni di euro, in attivo e con un incremento del 13% rispetto all'esercizio dell'anno precedente (Figura 14).

In Figura 15 si riporta il dettaglio della tipologia di macchine prodotte nell'esercizio fiscale 2017 mentre in Figura 16 è rappresentato il contributo delle stesse al fatturato del medesimo periodo.

Come evidente da questi due grafici, le macchine ad anello rotante costituiscono circa un quarto della produzione annua della Tosa Group S.p.a. ma contribuiscono da sole per più di un terzo alla realizzazione del fatturato. È per questo motivo che i suoi modelli, di cui si parlerà brevemente nel [Capitolo 4, § 4.1](#), sono oggetto di continua ricerca e di miglioramento all'interno dell'Azienda e argomento di studio della presente tesi.

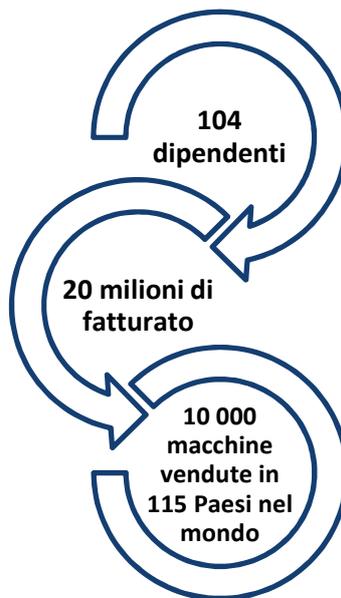


Figura 14 - I numeri principali della Tosa Group S.p.a. (dati 2017).

Macchine vendute per tipologia (dato 2017)

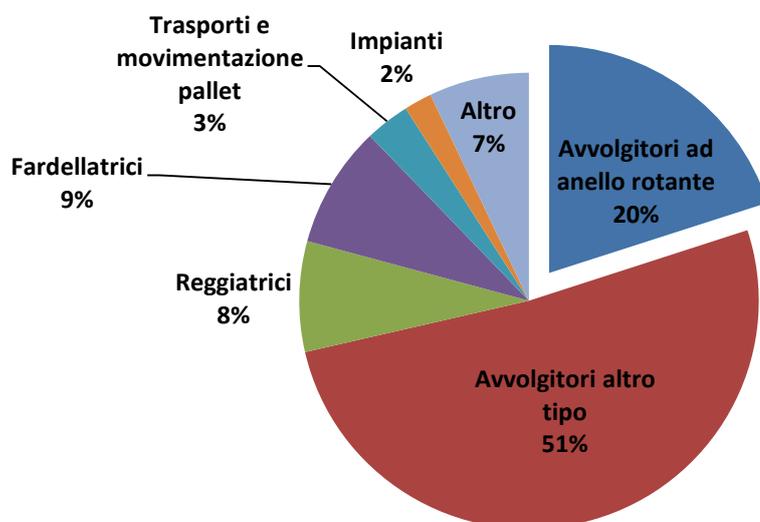


Figura 15 - Volume e tipo di macchine vendute dalla Tosa Group S.p.a. nell'anno 2017.

Contributo al fatturato complessivo per tipologia di macchina (dato 2017)

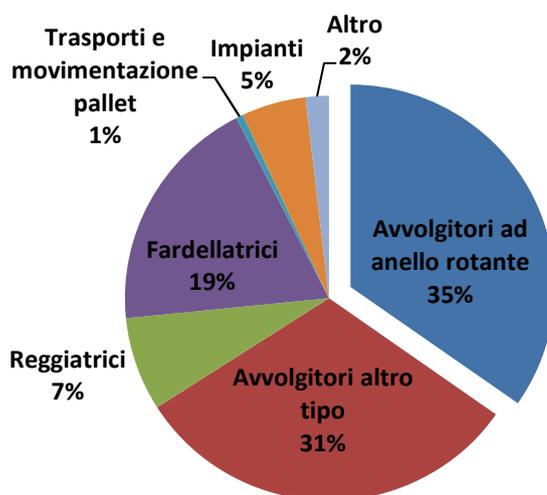


Figura 16 - Volume di fatturato per tipologia di macchina venuta dalla Tosa Group S.p.a. nell'anno 2017.

Caratterizzano la gestione della Tosa Group S.p.a.:

- la continua innovazione tecnologica;
- massimo impegno commerciale;
- l'attenzione alle Risorse Umane.

Cardine dell'innovazione tecnologica per l'Azienda, è l'impegno a migliorare ulteriormente le prestazioni meccaniche, la produttività e l'affidabilità in tutti i settori in cui opera il Gruppo. Negli ultimi anni, investimenti consistenti sono stati fatti per migliorare i software di gestione delle macchine, la loro interfaccia sia operatore, la connettività con i sistemi di supervisione aziendale, tutto secondo gli attuali principi dell'Industria 4.0.

La politica commerciale implementata in questi anni basa su un servizio di assistenza e ricambi offerto alla clientela sempre più efficiente e sulla partecipazione a numerose fiere internazionali sia come vetrina sia come palcoscenico per il lancio di nuovi prototipi di macchine.

Obiettivo costante della direzione è da un lato l'affermazione del marchio sia sui tradizionali mercati europei, in Francia e Spagna in particolar modo, dove l'azienda opera mediante partecipate, dall'altro, l'apertura di nuovi mercati in Nord America, Asia, Australia.

Al momento, l'unico impianto produttivo è quello collocato presso Santo Stefano Belbo in Italia. Un contatto costante con la clientela e il mercato, sia per la vendita che per l'assistenza installazione e post-vendita è garantito da una vasta rete (Figura 17) che permette anche all'Azienda di percepire prontamente i bisogni del fine linea a livello globale.



Figura 17 - L'estensione della rete vendita e post-vendita della Tosa Group S.p.a. (fonte: <https://www.tosagroup.com/>).

In ultimo, parte integrante della strategia aziendale nonché delle radici familiari del Gruppo, è la costante cura nella relazione dei dipendenti ; sono erogati, nel corso dell'anno, corsi di formazione sia interni sia esterni per i lavoratori a tutti i livelli. Molto stretto è anche il legame dell'impresa col territorio testimoniato, oltre che da una durevole e proficua collaborazione con le scuole tecniche, da donazioni a Istituzioni pubbliche operanti nella promozione dello sport, della Fondazione Ospedale di Alba, dal contributo alla realizzazione della pista di elisoccorso di Cossano Belbo.

2.5 Organigramma aziendale ed organizzazione della produzione

Dal 2011 dunque, gli uffici e le attività produttive della Tosa Group S.p.a. hanno sede nel moderno stabilimento di Santo Stefano Belbo (CN).

Dall'esterno, l'edificio ha la tipica forma rettangolare delle costruzioni industriali; all'interno l'architettura prevede gli uffici e i magazzini materiale disposti su due piani e un'unica area produttiva di officina e lavorazioni meccaniche di circa 10 000 m².

A livello organizzativo, sono previste cinque Funzioni dirette da un Comitato direttivo, come rappresentato nell'organigramma aziendale in [Figura 18](#).

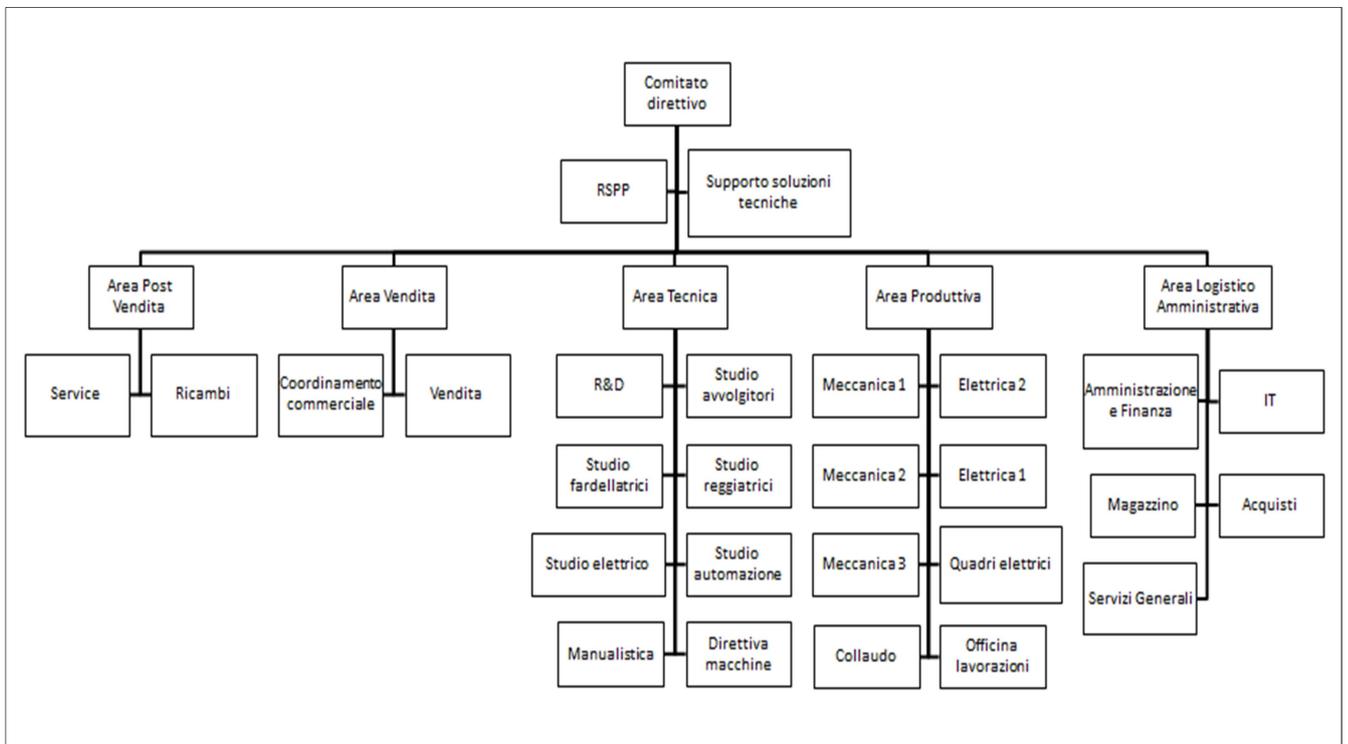


Figura 18 - Organigramma aziendale della Tosa Group S.p.a. (2018).

Si tratta di aree tra loro ben distinte anche negli spazi occupati (Figura 19), ciascuna con un Responsabile nominato e delle Risorse chiaramente indicate (non riportate in Figura 19).

Al Comitato direttivo operativo, prendono parte i due Amministratori Delegati, l'Ingegnere Responsabile dell'Area Tecnica e l'Ingegnere Responsabile dell'Area Produttiva: la sua funzione è quella di indirizzare la strategia aziendale e il budget.

Indipendentemente da questo Comitato, opera il Responsabile del Servizio Protezione e Prevenzione (RSPP), in ottemperanza al D.lgs. 81/2008, l'incaricato è un consulente esterno che organizza e gestisce tutto il sistema appartenente alla prevenzione e alla protezione dai rischi. L'Azienda è classificata con Livello di Rischio Basso, essendo di fatto previste solo operazioni di assemblaggio e semplici lavorazioni con le macchine utensili.

La parte commerciale della Tosa Group S.p.a. è affidata a due uffici distinti. Da una parte, l'Area Post Vendita che si occupa della commercializzazione dei ricambi dei vari componenti di macchina e dell'organizzazione del servizio di installazione, riparazione e manutenzione dei macchinari presso il cliente finale. L'Area Vendita è il punto di contatto tra l'Azienda e il mercato. Da un lato, risponde alle richieste di acquisto del cliente, proponendo modelli di macchine e preventivi per impianti ed accessori, dall'altro, mediante il Coordinamento commerciale, riporta le necessità e richieste del cliente al Reparto Ricerca e Sviluppo (R&D) dell'Area Tecnica.

L'Area Tecnica, ossia l'Ufficio Tecnico, si divide in due sezioni. L'Ufficio Tecnico meccanico si occupa della progettazione di tutte le macchine e componenti di macchina presenti nel portfolio dell'Azienda. Per facilitare l'organizzazione, ogni prodotto viene pensato e disegnato in aree dedicate alla tipologia di appartenenza, ciascuna affidata ad un Supervisore.

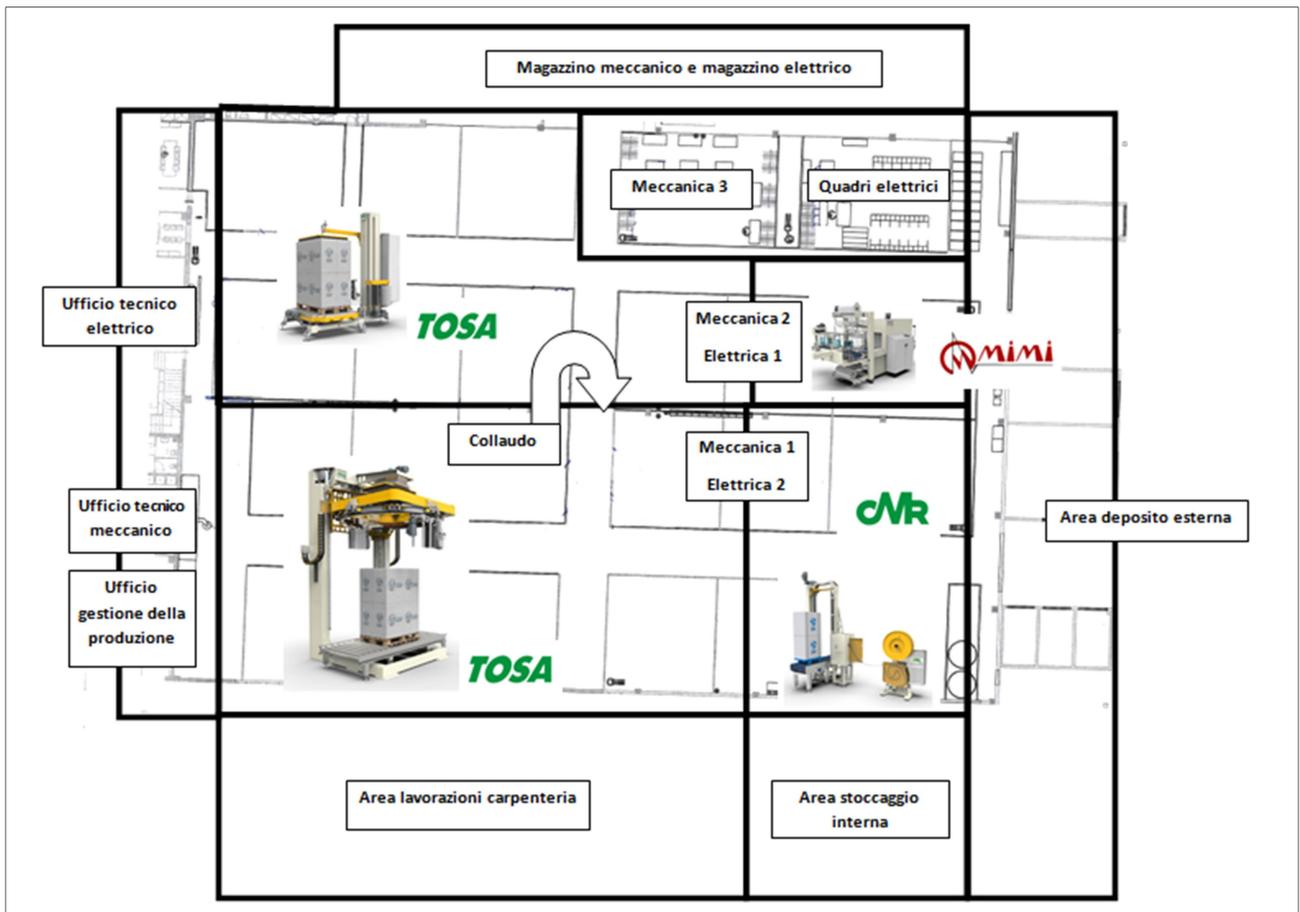


Figura 19 - Pianta del piano terreno della Tosa Group S.p.a., con l'indicazione degli spazi occupati da alcune Funzioni.

L'Ufficio Tecnico elettrico si occupa del disegno del bordo elettrico di tutti i macchinari, del progetto delle modalità di automazione dei macchinari nonché della compilazione degli schemi elettrici e circuiti pneumatici ad essi collegati.

Nell'ambito dell'Area Logistico Amministrativa, si trova la sezione Informatica (IT) che si occupa di tutto ciò che concerne i sistemi informativi aziendali; ricadono inoltre in questa funzione la contabilità ordinaria, la gestione delle Risorse Umane, la cura della manutenzione ordinaria e il rifornimento dei materiali consumabili dell'Azienda.

L'Ufficio Acquisti è il collegamento tra l'impresa e i suoi fornitori esterni: soprintende all'acquisto di semilavorati (nel caso della Tosa Group S.p.a. prevalentemente barre e tubi in acciaio, plastica ed alluminio) e materiali commerciali (ad esempio viteria ed altra minuteria, attuatori). Inoltre, pianifica gli acquisti, gestisce i rapporti con i fornitori e ne verifica l'operato, sorveglia la qualità delle loro forniture prendendo, se necessario, le opportune misure correttive, effettua un'analisi costante dei prezzi in continuo confronto con il mercato e le sue più avanzate soluzioni.

Al Magazzino è affidato ricevimento delle merci da fornitori esterni, della pianificazione della produzione di alcuni ricambi di macchina e dei componenti di macchina di ritorno da lavorazioni esterne (verniciatura, zincatura e brunitura per la Tosa Group S.p.a.), lo stoccaggio dei materiali necessari alla produzione nell'apposita area nei pressi dell'Officina. Si occupa inoltre dei flussi di materiale all'interno dell'Officina: i magazzinieri, in base alla pianificazione della produzione delle macchine reso noto da dall'Ufficio della gestione della produzione, effettuano il *picking* del materiale meccanico (per preparare i così detti cassoni meccanici) ed elettrico-pneumatico (cassoni bordo elettrico) e lo depositano nelle aree preposte al loro montaggio. Inoltre, comunica all'Area lavorazioni carpenteria (fornitore interno all'azienda), gli articoli necessari alla produzione con i relativi tempi e quantità e ne gestisce l'output.

Infine, l'Area Produttiva è il cuore dell'impresa.

Come evidente paragonando [Figura 18](#) e [Figura 19](#), la divisione di funzioni all'interno dell'Area Produttiva trova riscontro nella ripartizione dell'area totale dell'Officina: sei spazi di dimensione variabile in funzione principalmente del volume di macchine prodotto per tipologia e del tempo necessario per assemblare il singolo macchinario. Come già scritto in precedenza ([Capitolo 2, § 2.4](#)), le macchine avvolgitrici ad anello rotante risultano preponderanti sulle altre tipologie in termini di volume di produzione, tempo medio necessario all'assemblaggio del singolo esemplare ed ingombro.

In [Tabella 2](#) si riporta una breve descrizione dei principali incarichi di ciascuna delle funzioni sopra menzionate e il numero di Risorse ad esse assegnate.

Nome Funzione	Numero Risorse assegnate	Attività produttive svolte
Meccanica 1	7	assemblaggio meccanico delle macchine avvolgitori ad anello ed accessori (marchio Tosa)
Elettrica 2	5	assemblaggio del bordo elettrico delle macchine avvolgitori ad anello ed accessori (marchio Tosa)
Meccanica 2	7	assemblaggio meccanico delle macchine fardellatrici, reggitrici e relativi accessori (marchi Mimi e CMR)
Elettrica 1	6	assemblaggio del bordo elettrico delle macchine fardellatrici, reggitrici e relativi accessori (Mimi, CMR)
Meccanica 3	3	preassemblaggio dei sottogruppi componenti macchine avvolgitori ad anello, reggitrici, fardellatrici nonché assemblaggio delle macchine per la viticoltura
Quadri elettrici	3	assemblaggio dei quadri elettrici per tutte le tipologie di macchina
Officina lavorazioni	9	fornitura alla produzione di tutti i componenti meccanici ricavabili da semi lavorati; effettua lavorazioni di taglio, asportazione di truciolo, saldatura mediante macchine manuali o semiautomatiche
Collaudo	13	collaudo finale di tutte le tipologie di macchina

Tabella 2 - Riassunto schematico dei compiti principali delle sotto aree in cui è divisa l'Area Produttiva della Tosa Group S.p.a.

Il layout dello stabilimento è a isola fissa, ciò significa che il prodotto in assemblaggio non viene movimentato durante le varie fasi di processo previste ma sono le squadre di montaggio nonché il materiale a fluire nella stazione assegnata alla commessa. Si tratta di un sistema di produzione di tipo discontinuo che, a fronte di un maggiore complessità organizzativa per quanto riguarda la movimentazione di materiali e Risorse, garantisce la flessibilità operativa necessaria a rispondere alle esigenze di customizzazione sul cliente e alla gestione di tipologie di articoli con tempi complessivi di fabbricazione differenti, da due settimane per le macchine avvolgitrici a tavola rotante ai due mesi per macchine avvolgitrici ad anello rotante.

A seguito della conferma d'ordine da parte del cliente, ogni macchina viene ideata e progettata in Ufficio Tecnico in tutte le sue parti per garantire le specifiche e le funzionalità richieste. Quindi, indipendentemente dalla sua tipologia, viene prima assemblata la parte meccanica, poi il bordo elettrico ed infine si implementa il software; seguono il collaudo, lo smontaggio e l'imballaggio, dopo di che viene caricato il tir per la spedizione al cliente.

Tutto quanto descritto finora, è schematicamente illustrato in [Figura 20](#).

Tutte le operazioni di assemblaggio dei componenti meccanici, del bordo elettrico e della componentistica elettronica sono ad oggi interamente manuali, svolte con l'ausilio di elettroutensili ed utensili tradizionali. L'Officina lavorazioni si avvale dell'ausilio di alcune macchine CNC (Controllo Numerico Computerizzato) e di torni manuali e semiautomatici per la lavorazione dei semilavorati in plastica, acciaio e alluminio. Prossimi passi previsti verso l'Industria 4.0 sono l'introduzione di magazzini automatici per la movimentazione e gestione dei principali codici di commercio a magazzino e l'introduzione di ausili informatici portatili all'interno dell'Area Produttiva allo scopo di rendere più agevole la consultazione del progetto delle macchine in assemblaggio da parte delle Risorse preposte e velocizzare la comunicazione tra l'Officina e l'Ufficio Tecnico.

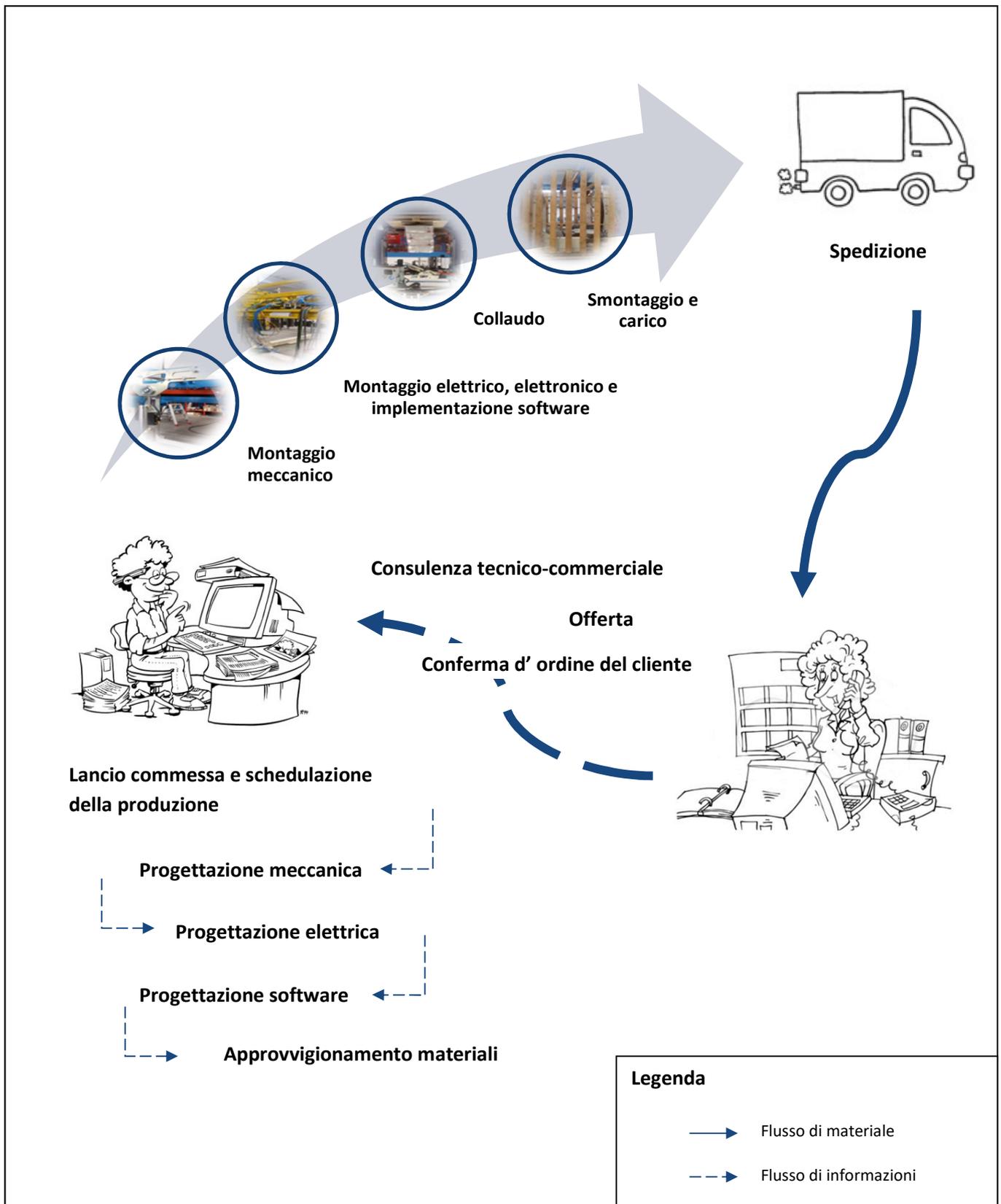


Figura 20 - Illustrazione schematica del percorso di produzione che segue ogni macchinario della Tosa Group S.p.a., dalla sua ideazione alla sua spedizione al cliente finale.

Capitolo 3. Modellizzazione probabilistica delle procedure di ispezione

3.1 Scopo ed utilità dei modelli

In un'industria manifatturiera come è la Tosa Group S.p.a., la Produzione è il core business. Lo schema denominato SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output, Customer*), riportato in forma generale in [Figura 21](#), fornisce una panoramica degli elementi che compongono un processo produttivo.

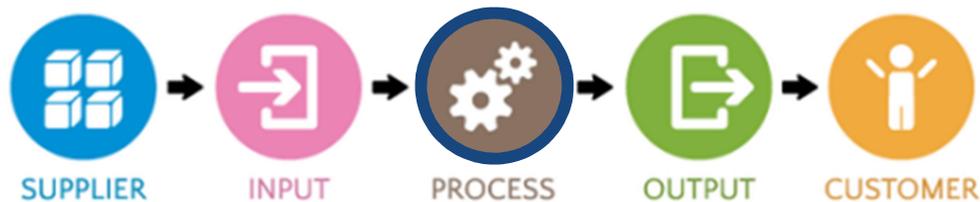


Figura 21 Schema generale di un diagramma SIPOC (fonte: <https://qualityway.wordpress.com/>)

Secondo la definizione riportata nella norma ISO 9000:2000 (la norma per la Gestione del Sistema Qualità) un processo (*Process*) è “un insieme di attività correlate o interagenti che trasformano elementi in entrata (*Input*) in elementi in uscita (*Output*)”; la presenza di varie attività all’interno di un sistema produttivo è intuibile anche dall’organigramma aziendale ([Capitolo 2, §2.5](#)).

Di tutte queste attività, studi precedenti mostrano che quelle che più influenzano il costo e la qualità finale del prodotto sono riconducibili al montaggio ([Figura 20](#)) (Xiaoqing, Bo e Shuchun, 2010).

Altre fonti, classificano i difetti nel prodotto finale derivanti dalle operazioni di montaggio in quattro categorie (Su, Liu e Whitney, 2010):

- errata progettazione;
- componenti forniti difettosi;
- variazioni del processo di assemblaggio in opera (causate, per esempio, da un cambio nella schedulazione della produzione);
- errore della Risorsa addetta al montaggio.

Molte ricerche negli anni si sono concentrate sulle prime tre categorie sopra elencate. Il risultato è stata la definizione di una serie di metodologie diventate parte integrante di sistemi globali per la Gestione e il Controllo Qualità e implementate con successo in moltissime industrie, non solo di prodotto.

DFMA (*Design Failure Mode and Effects Analysis*), DOF (*Design of Experiment*), DFA (*Design for assembly*) ed altre sono tecniche formalizzate per la valutazione e il miglioramento della qualità durante le fasi di progettazione del prodotto, permettendo un approccio più orientato al cliente e il risparmio di alcuni costi legati alla non qualità.

Il controllo statistico di processo (SPC, *Statistic Process Control*) o un continuo monitoraggio permesso dall'uso di sensori consentono di controllare variazioni tra più esemplari di uno stesso prodotto ed infine, metodologie che prevedono per esempio l'introduzione di standard facilitano il controllo dei componenti in ingresso al sistema produttivo.

Per quanto riguarda l'ultima categoria sopra menzionata, molte ricerche dimostrano che l'errore umano è frequentemente causa di non conformità derivante da processi di assemblaggio (Shin, Wysk e Rothrock, 2006).

Per fare alcune citazioni, il lavoro sul campo di Su et al. (2010) condotto riguardo all'assemblaggio di macchine fotocopiatrici, ha mostrato che lo sbaglio da parte dell'operatore è causa di circa il 20% del totale delle non conformità. Shibata (2002), dopo aver condotto uno studio sull'assemblaggio dei *Compact Disk* conclude che la percentuale di difetti dovuta all'errore umano è pari a circa il 25% del totale. Per Vineyard et al. (1999), questa percentuale, considerando una media di tutte le industrie manifatturiere degli Stati Uniti d'America, sale al 40%. Da questi esempi risulta evidente la necessità, per i moderni sistemi produttivi, di ridurre al minimo la quantità di errori da parte delle risorse addette al montaggio meccanico tuttavia la complessità del prodotto relativa alle operazioni di montaggio e al lavoro delle Risorse ad esso preposte viene molto raramente presa in considerazione in un Sistema Qualità.

La breve descrizione storica che segue traccia l'evoluzione del modello utilizzato nel presente lavoro di Tesi e schematizzato in [Figura 22](#).

L'analisi del processo di assemblaggio, la sua mappatura, la definizione di parametri caratteristici e raccolta sperimentale di dati sperimentali sono le attività preliminari necessarie all'implementazione di modelli probabilistici volti ad ottenere stime affidabili delle probabilità del verificarsi di difetti nelle fasi del processo e dei relativi costi di ispezione.

Lo scopo finale è la progettazione di strategie di ispezione efficaci nel caso di una produzione di piccoli lotti di prodotto, quando, per la natura dello stesso, le tecniche consolidate per il Controllo Statistico di Processo (SPC) non sono applicabili.

Quanto descritto nel presente Capitolo 2, sarà poi applicato a un caso studio concreto nel [Capitolo 4](#) e [Capitolo 5](#).

3.2 Cenni storici

Le ricerche portate avanti alla fine del secolo scorso da Hinckley (Hinckley, 1993; Hinckley e Barkan, 1995), hanno dimostrato come molte non conformità derivanti da montaggio condotto da operatore, possano essere evitate riducendo la complessità del progetto del prodotto stesso o del suo processo di assemblaggio.

L'idea alla base delle ricerche di Hinckley è innovativa: un modello matematico noto a priori mette in relazione la complessità costruttiva del prodotto con la possibilità di osservare per lo stesso non conformità una volta terminato il montaggio.

Hinckley utilizza le metodologie DFA per determinare la complessità del prodotto (Boothroyd, 1987; Hinckley, 1993; Boothroyd, 1996) e stimare il tempo nominalmente impegnato dall'operatore per ciascuna delle operazioni di montaggio del prodotto.

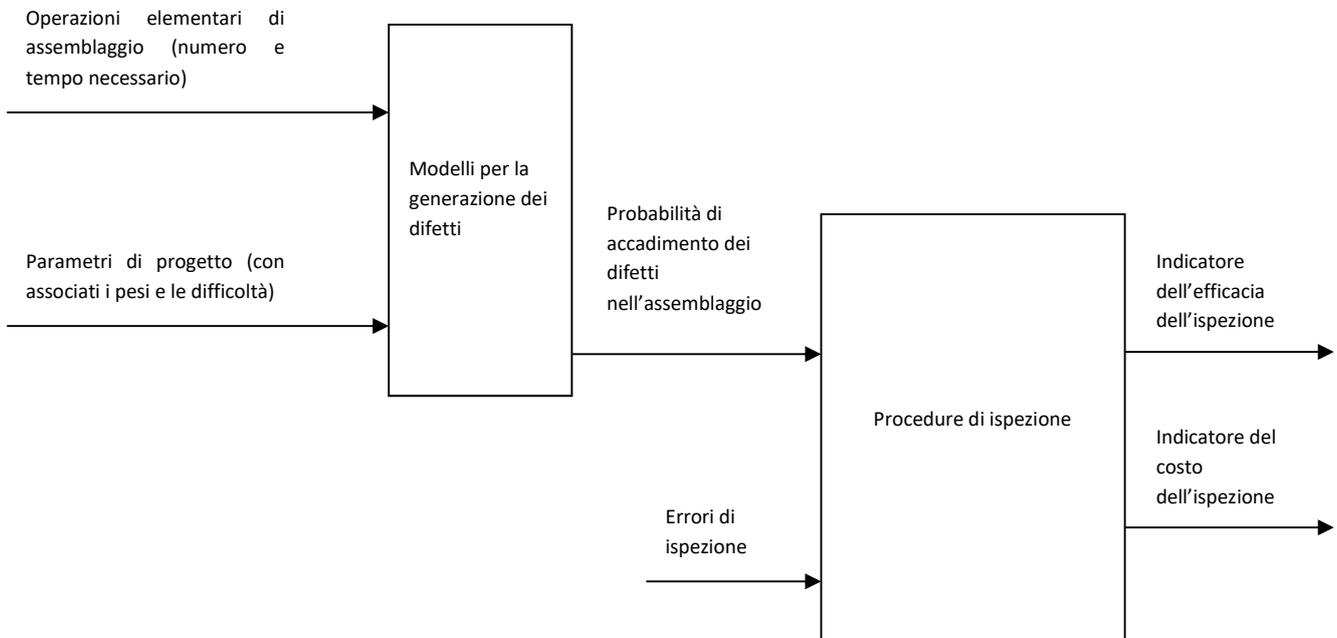


Figura 22 - Diagramma a blocchi riassuntivo della metodologia implementata (adattamento da Genta et al., 2018)

A partire dalle ricerche di Hinckley, Shibata (Shibata, 2002) propone un nuovo modello per la previsione del numero di difetti di montaggio causati dall'operatore, introducendo il numero di operazioni elementari del processo di assemblaggio, considerando per le stesse i *tempi standard* (Aft, 2000). Nello specifico, Shibata propone un modello che, opportunamente implementato, permette di prevedere il tasso di difettosità per unità di prodotto con la sola conoscenza del numero di operazioni elementari necessarie all'assemblaggio e del relativo tempo di esecuzione. Introduce inoltre un fattore ulteriore per tenere conto della complessità dell'assemblaggio derivante dalla complessità del progetto del prodotto, inserendo dei pesi e dei parametri di difficoltà, ispirati al lavoro di un altro studioso, Ben-Arieh.

I modelli elaborati da Hinckley, Shibata e Su costituiscono la base per il modello utilizzato da Franceschini et al. (2016) e Genta et al. (2018), su cui fonda il presente scritto di Tesi. La capacità di prevedere a priori, senza necessità di test ulteriori il tasso di difettosità per unità di prodotto, viene combinata, in questo lavoro, con l'indicatore del costo dell'ispezione e utilizzata per valutare l'efficacia complessiva delle operazioni di controllo attualmente implementate in Azienda su un complessivo meccanico. Per i dettagli del caso studio e dei relativi risultati, si rimanda al [Capitolo 4](#) e [Capitolo 5](#).

3.3 Modellizzazione dei difetti

Dalla ricerca condotta sui semi conduttori, Hinckley ricava sperimentalmente che il numero di difetti per unità (*DPU, Defect Per Unit*) è direttamente proporzionale al tempo totale necessario al montaggio e inversamente proporzionale al numero di operazioni di montaggio previste.

Da ciò, definisce in fattore di complessità del montaggio (*Cf*) come:

$$Cf = TAT - t_0 * TOP \quad (1)$$

con

TAT : tempo totale necessario per effettuare l'intero montaggio (*Totally Assembly Time*);

TOP : numero totale delle operazioni di montaggio necessarie a completare il prodotto (*Total Operations Number*);

t_0 : tempo limite di montaggio (*threshold assembly time*), definito come il tempo necessario a compiere la più semplice tra tutte le operazioni di montaggio ed inteso come parametro di calibrazione dei pesi degli altri due fattori sopra riportati. Si ipotizza che, al di sotto della soglia temporale indicata da t_0 , non sia possibile avere altre operazioni di montaggio ne difetti.

Il parametro *Cf*, una volta plottato su un diagramma bilogaritmico con il corrispondente tasso di difettosità (*DPU*), mostra una relazione lineare positiva, secondo le seguenti due relazioni:

$$\log DPU = K * \log Cf - \log C \quad (2)$$

$$\log DPU = K * \log Cf - \log C \quad (3)$$

$$DPU = \frac{Cf^K}{C} \quad (4)$$

dove C e K sono coefficienti costanti ottenuti mediante regressione lineare (Hinckley, 1993).

Il modello proposto da Hinckley ha due limiti: non tiene conto della complessità del progetto del prodotto e non è in grado di valutare il tasso di difettosità per la singola fase di montaggio.

Conscio di ciò, Shibata conduce una serie di studi prendendo a riferimento il montaggio di sistemi audio domestici che suddivide in una serie di fasi (*workstations*, WS) definite sulla base degli standard operativi di montaggio del prodotto stesso (Shibata, 2002; Su, Liu e Whitney, 2010). Ognuna di queste WS è composta di una serie di operazioni elementari o *job element* (Aft, 2000). Un *job element* per essere definito tale deve avere due caratteristiche: essere regolarmente ripetuto nell'arco della giornata lavorativa dell'operatore addetto al montaggio del prodotto e svolgersi in un arco di tempo sufficientemente definito tale da poterne individuare un inizio e una fine.

Il procedimento seguito da Shibata per la modellazione di un processo di assemblaggio è rappresentata in [Figura 22](#).

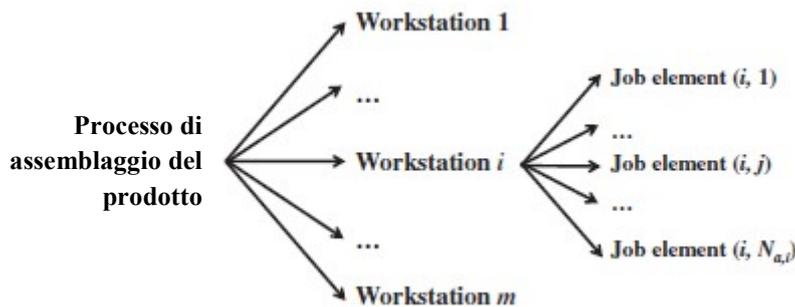


Figura 22 - Schema riassuntivo della metodologia implementata da Shibata (adattamento da Genta et al., 2018)

Per ogni generica i -esima WS, il modello di Shibata permette di calcolare due indici: il fattore di complessità del montaggio legato al processo, chiamato $Cf_{P,i}$ e il fattore di complessità del montaggio legato al progetto del prodotto $Cf_{D,i}$.

Per quanto riguarda il primo menzionato, vale

$$Cf_{P,i} = \sum_{j=1}^{N_{a,i}} SST_{i,j} - t_0 * N_{a,i} = TAT_i - t_0 * N_{a,i} \quad (5)$$

con

$N_{a,i}$: il numero di *job elements* nella i-esima WS;

$SST_{i,j}$: è il tempo impiegato a svolgere il j-esimo job element nella i-esima WS, prendendo di riferimento i *Sony Standard Time*, una misura comune del tempo necessario a svolgere alcune operazioni di assemblaggio usata nell'industria di prodotti elettromeccanici;

TAT_i : è il tempo totale di montaggio nella i-esima WS;

t_0 : tempo limite di montaggio, come nel modello di Hinckley precedentemente descritto.

Shibata ricava dunque il rapporto tra il fattore di complessità del montaggio legato al processo $Cf_{P,i}$ e il tasso di difettosità per ogni i-esima WS, DPU_i e cioè

$$\log DPU_i = K * \log Cf_{P,i} - \log C \quad (6)$$

$$DPU_i = \frac{Cf_{P,i}^K}{C} \quad (7)$$

dove, di nuovo, C e K sono coefficienti costanti ottenuti mediante regressione lineare (Shibata, 2002).

Il fattore di complessità del montaggio legato al progetto del prodotto $Cf_{D,i}$ è definito come

$$Cf_{D,i} = \frac{K_D}{D_i} \quad (8)$$

con K_D coefficiente arbitrario di misura per la complessità basata sul processo e D_i è la facilità di montaggio della i-esima WS (EOA, *Easy of Assembly*), valutata con la metodologia DAC (*Assembly/Disassembly Cost Effectiveness*) sviluppata alla Sony Corporation (Yamagiwa , 1988).

Shibata ricava che la relazione tra $Cf_{D,i}$ e DPU_i è espressa dalla formula:

$$DPU_i = a * Cf_{D,i}^b \quad (9)$$

cioè

$$\log DPU_i = b * \log Cf_{D,i} + \log a \quad (10)$$

con a e b costanti derivanti da regressione lineare (Shibata, 2002).

Dalla combinazione delle equazioni (6) e (10), Shibata ricava il seguente modello

$$\log DPU_i = k_1 * \log Cf_{P,i} + k_2 * \log Cf_{D,i} + \log k_3 \quad (11)$$

che può essere scritto anche

$$DPU_i = k_3 * Cf_{P,i}^{k_1} * Cf_{D,i}^{k_2} \quad (12)$$

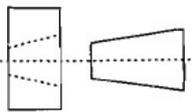
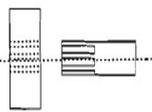
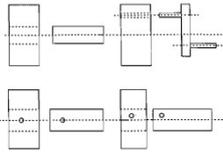
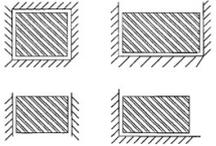
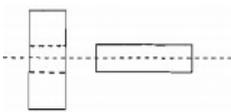
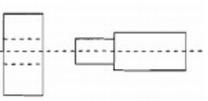
dove k_1 , k_2 e k_3 sono coefficienti derivanti da regressione non lineare (Genta et al., 2018) ed assumono il valore riportato in [Tabella 3](#).

In merito all'equazione (10), è da sottolineare che la metodologia DAC è stata pensata per valutare l'EOA dei prodotti della Sony Corporation per cui il suo risultato potrebbe non essere altrettanto valido per prodotti di tipo elettromeccanico: da qui, l'esigenza avvertita da Su et al. di adattare il modello ricavato finora (Su, Liu e Whitney, 2010).

Nome costante	valore medio
k_1	1.27
k_2	1.49
k_3	$3.04 * 10^{-5}$

Tabella 3 - Valore medio dei coefficienti k_1 , k_2 e k_3 derivanti da regressione non lineare per il modello elettromeccanico (adattamento da Genta et al., 2018)

Riprendendo gli studi di Ben-Arieh (Ben-Arieh, 1994), undici parametri (Tabella 4) sono usati come criterio per valutare la complessità del montaggio dovuta al progetto del prodotto stesso.

Numero parametro (P)	Nome parametro	Descrizione parametro	Esempi	
P1	Forma	La forma di due componenti in assemblaggio è di particolare rilevanza in quanto, nel caso di componenti asimmetrici o di forma irregolare, l'accoppiamento risulta più difficoltoso per l'operatore.	 Accoppiamento conico	 Accoppiamento scanalato
P2	Forza	È la forza richiesta all'operatore per accoppiare due componenti di un assieme. Di solito classificata in termini qualitativi, esempio "molto alta", "molto bassa" etc.	-	-
P3	Direzione di accoppiamento	Sono possibili per questo parametro due sottogruppi: componenti cilindrici e componenti prismatici.	 Direzioni di accoppiamento possibili per componenti cilindrici	 Direzioni di accoppiamento possibili per componenti prismatici
P4	Allineamento dei componenti	Questo parametro discrimina il tipo di allineamento necessario per eseguire l'assemblaggio.	 Nessun fermo di riferimento	 Fermo meccanico di riferimento
P5	Rapporto di peso dei componenti	Questo parametro mette in relazione la difficoltà nell'assemblaggio con il peso dei due componenti interessati. È classificata in termini qualitativi, esempio "molto rilevante", "poco rilevante" etc.	-	-
P6	Rapporto lunghezza/larghezza (o diametro) dei componenti	È il parametro che mette in relazione la proporzione tra le diverse misure dei componenti in montaggio con le difficoltà possibili causate al montaggio degli stessi.	-	-

P7	Accessibilità dei componenti	Si collega la facilità o meno al montaggio dei componenti con la facilità di accesso per l'operatore agli stessi come prevista dal disegno meccanico.	-	-
P8	Lunghezza dei componenti in assemblaggio	Questo parametro mette in relazione la facilità o meno nelle operazioni di assemblaggio derivante dalla componente di lunghezza dei componenti in assemblaggio.	-	-
P9	Richiesta strumenti di supporto al montaggio	Con questo parametro si richiede di valutare se la richiesta di strumenti di appoggio durante le fasi di montaggi faciliti o meno lo stesso.	-	-
P10	Stabilità risultante dei componenti assemblati	Questo parametro descrive il risultato finale dell'operazione di assemblaggio. Di solito classificata in termini qualitativi, esempio "molto alta", "molto bassa" etc.	-	-
P11	Lunghezza di accoppiamento dei componenti	È il parametro che mette in relazione le difficoltà delle operazioni di assemblaggio con la lunghezza di accoppiamento dei componenti interessati.	-	-

Tabella 4 - Gli undici parametri utilizzati per valutare la complessità del montaggio con operatore dovuto al progetto del prodotto (adattamento da Ben-Arieh, 1994)

Per ottenere un indice completo, il peso di questi undici parametri è stato valutato usando il procedimento AHP (*Analytic Hierarchy Process*)(Wei, Chien e Wang, 2005). Un certo numero di esperti del montaggio è stato interpellato in merito all'importanza relativa di ciascun parametro nel montaggio del prodotto: ponendo domande del tipo "quanto è importante la Forza rispetto alla Forma" e valutando le risposte con un numero intero compreso tra 1 (cioè pari importanza) e 9 (importanza prevalente) è possibile compilare una matrice di confronto a coppie e l'autovettore di questa matrice rappresenta il peso relativo di ciascun parametro. Infine, viene normalizzato l'autovettore, ottenendo la seguente formulazione:

$$w_q = \frac{(\prod_{k=1}^N a_{qk})^{1/N}}{\sum_{q=1}^N (\prod_{k=1}^N a_{qk})^{1/N}} \quad (13)$$

dove:

w_q : peso del parametro i (valore relativo alla fila i);

a_{qk} : importanza del parametro i rispetto al parametro k , il valore corrisponde al valore qk della matrice;

N : numero totale dei parametri considerati, cioè undici.

Su et al. indicano quindi la seguente equazione finale per il calcolo dei $Cf_{D,i}$ di prodotti elettromeccanici

$$Cf_{D,i} = \sum_{q=1}^l \left(w_q * \frac{1}{e} * \sum_{k=1}^e A_{kqi} \right) \quad (14)$$

con:

l : l-esimo parametro;

w_q : il peso dell'l-esimo parametro;

e : il numero di esperti del montaggio intervistati;

A_{kqi} : la valutazione dell'q-esimo parametro nell'i-esima WS, stimato dal valutatore k-esimo.

L'equazione (12), con la formulazione di $Cf_{D,i}$ riportata nell'equazione (14) costituisce parte del modello definitivo per il calcolo dei DPU_i di questo scritto di Tesi.

Si considera quindi un processo di montaggio che avvenga in condizioni ottimali e lo si scompone in un numero m di WS (Shibata, 2002; Su, Liu e Whitney, 2010); si ipotizza che i parametri relativi a ciascuna WS non siano tra loro legati.

Ogni WS contiene un certo numero di operazioni elementari o *job elements*; il modello proposto si basa sulle seguenti quattro ipotesi (Hinckley, 1993; Franceschini et al., 2016):

- ogni *job element* può introdurre al più un difetto;
- non c'è correlazione tra i difetti originati in diversi *job elements*;
- non c'è correlazione tra i difetti e le procedure di ispezione;
- per ognuna delle i -esime WS, la probabilità che si verifichi un difetto è la stessa per ognuno dei *job element* che la compongono e si denota con d_i .

Quindi, per ogni i -esima WS, il numero dei DPU_i diviso per il numero dei relativi *job elements* $N_{a,i}$ è un valore che può essere considerato come stima di d_i .

A questo punto, la resa Y_i della i -esima WS (cioè il numero di prodotti privi di non conformità) può essere prevista utilizzando la seguente formula binomiale (Montgomery, 2013):

$$Y_i = \binom{N_{a,i}}{0} * d_i^0 * (1 - d_i)^{N_{a,i}-0} = (1 - d_i)^{N_{a,i}} = \left(1 - \frac{DPU_i}{N_{a,i}}\right)^{N_{a,i}} \quad (15)$$

Per cui la probabilità che si verifichi almeno un difetto in ogni i -esima WS può essere stimata come una frazione del numero di prodotti privi di non conformità nella stessa secondo la seguente formula:

$$p_i = 1 - Y_i = 1 - \left(1 - \frac{DPU_i}{N_{a,i}}\right)^{N_{a,i}} \quad (16)$$

Il parametro p_i è il parametro della distribuzione di Bernoulli.

3.4 Procedure di ispezione

Ogni i -esima WS di cui è composto un processo di montaggio, è quindi caratterizzato da tre parametri (Figura 23):

- p_i : è la probabilità del verificarsi del difetto nella i -esima WS;
- α_i : è la probabilità di indicare erroneamente la presenza di un difetto quando poi effettivamente non è verificato. È anche chiamato errore di I specie o falso positivo;
- β_i : è la probabilità di non indicare erroneamente la presenza di un difetto quando poi effettivamente è verificato. È anche chiamato errore di II specie o falso negativo.

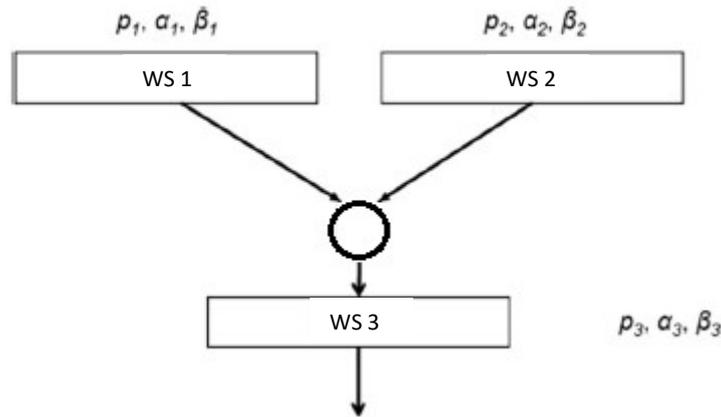


Figura 23 - Rappresentazione di un processo di montaggio con i suoi parametri caratteristici, composto da due fasi (WS) che si svolgono in parallelo seguite da una terza fase in serie (adattamento da Franceschini et al., 2018)

Il primo dei parametri sopra menzionati, p_i esprime la difettosità o, invertendo la prospettiva, la qualità dell' i -esima fase mentre gli altri due parametri, α_i e β_i , si riferiscono alla qualità delle relative procedure di ispezione.

Questi tre parametri possono essere difficili da stimare. Il parametro p_i si riferisce al processo e, in quanto tale, può essere valutato mediante modelli di generazione dei difetti (come descritto in [Capitolo 3, §3.3](#)), metodi sperimentali basati sulla misurazione dei valori di interesse sul campo oppure mediante metodi di simulazione. La stima dei parametri α_i e β_i è basata invece sull'esperienza di e sulle capacità di ispettori e tecnici del processo o prodotto.

Combinando i tre parametri sopra descritti, per ogni i -esima WS è possibile calcolare:

- la probabilità P di individuare il difetto come $P = p_i * (1 - \beta_i) + (1 - p_i) * \alpha_i$;
- la probabilità P di non individuare il difetto come $P = p_i * \beta_i + (1 - p_i) * (1 - \alpha_i)$.

Ciò significa che:

- in caso in cui si individui un difetto, questo sarà effettivamente presente con una probabilità pari al valore $p_i * (1 - \beta_i)$ o non presente con una probabilità pari a $(1 - p_i) * \alpha_i$;
- nel caso in cui non si individui alcun difetto, si potrebbe essere verificato un errore nelle procedure di ispezione (falso negativo) con una probabilità stimata con $p_i * \beta_i$ o con una probabilità pari a $(1 - p_i) * (1 - \alpha_i)$ in caso di effettiva assenza di difetti.

Queste probabilità sono alla base degli indicatori che saranno illustrati in [Capitolo 3, §3.5](#).

Considerando un generico processo di montaggio composto da un numero M di WS (dove m indica la i -esima WS), le probabilità sopra descritte possono essere combinate insieme ed ottenere così:

- la probabilità P di individuare il difetto in tutte le WS come $P = \prod_{i=1}^m [p_i * (1 - \beta_i) + (1 - p_i) * \alpha_i]$;
- la probabilità P di non individuare il difetto in tutte le WS come $P = \prod_{i=1}^m [p_i * \beta_i + (1 - p_i) * (1 - \alpha_i)]$;
- la probabilità P di non individuare il difetto solo in un determinato sottogruppo K di WS come $\prod_{i \in K} [p_i * (1 - \beta_i) + (1 - p_i) * \alpha_i] * \prod_{i \in (M-K)} [p_i * \beta_i + (1 - p_i) * (1 - \alpha_i)]$.

In merito a queste ultime formulazioni di probabilità, è da notare che:

- sono valide per qualsiasi configurazione del processo di montaggio (in serie, in parallelo o misto) dal momento che si è ipotizzata l'assenza di correlazione tra i parametri p_i , α_i e β_i ;
- sono strettamente collegate alla complessità del processo di montaggio in quanto contengono al loro interno il numero di WS (m o M), la qualità del processo p_i e la qualità dell'ispezione del processo mediante α_i e β_i .

3.5 L'indicatore di efficacia dell'ispezione e l'indicatore dei costi di ispezione

In ognuna delle i -esima WS, possono essere implementati diversi tipi di controllo a seconda del tipo di difetti che si possono ivi verificare: l'indicatore di efficacia dell'ispezione e l'indicatore del costo dell'ispezione, descritti in questo paragrafo, possono essere utilizzati per comparare possibili combinazioni di procedure di ispezione.

In Figura 24, è riportato lo schema riassuntivo della metodologia implementata nel presente scritto di Tesi.

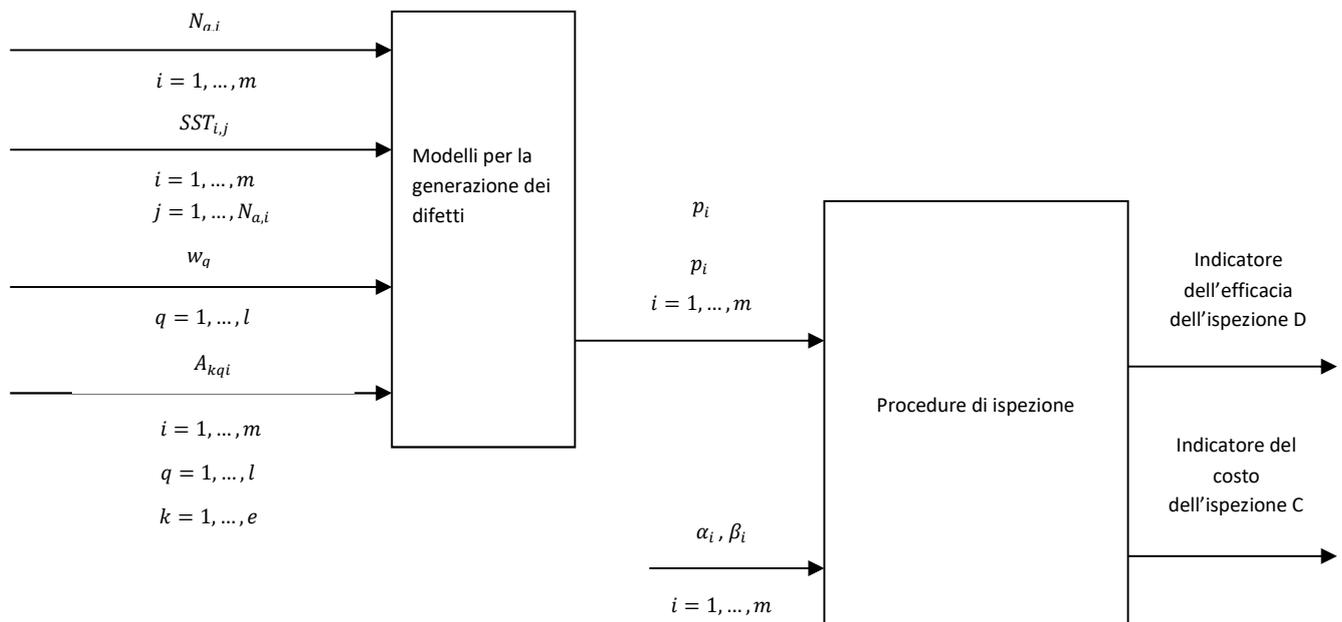


Figura 24 - Diagramma a blocchi riassuntivo della metodologia implementata nel presente scritto di Tesi (adattamento da Genta et al., 2018)

3.5.1 L'indicatore di efficacia dell'ispezione

Si considerano m variabili casuali di Bernoulli X_i , definite come segue:

- $X_i = 0$ se viene individuato un difetto effettivamente presente o nessun difetto è presente nella i -esima ispezione;
- $X_i = 1$ se un difetto effettivamente presente non viene individuato nella i -esima ispezione.

Secondo quanto visto in [Capitolo 3, §3.4](#), è possibile individuare un difetto effettivamente esistente con una probabilità pari a $p_i * (1 - \beta_i)$ mentre non è possibile individuare un difetto con una probabilità stimata come $p_i * \beta_i$. Invece, come visto, quando non c'è difetto effettivamente presente, un difetto può essere individuato con una probabilità pari a $(1 - p_i) * \alpha_i$ e non individuato con una probabilità pari a $(1 - p_i) * (1 - \alpha_i)$. Naturalmente, la somma delle ultime due probabilità restituisce la probabilità che non ci sia alcun difetto.

Valgono quindi le seguenti formulazioni:

$$P(X_i = 0) = p_i * (1 - \beta_i) + (1 - p_i) = 1 - p_i * \beta_i \quad (17)$$

$$P(X_i = 1) = p_i * \beta_i \quad (18)$$

dove i assume un valore tra 1 e m .

Quindi il numero medio di difetti effettivamente presenti non individuati dall'ispezione i -esima è pari a

$$D_i = E(X_i) = p_i * \beta_i \quad (19)$$

che restituisce, chiaramente, un valore compreso tra 0 e 1.

Si considera a questo punto un'ulteriore variabile casuale che conta il numero di difetti effettivamente presenti ma non riscontrati dalla totalità delle procedure di ispezione:

$$Y = \sum_{i=1}^m X_i \quad (20)$$

Il valore atteso complessivo del numero di difetti effettivamente presenti ma non riscontrati è pari a

$$D = E(Y) = E\left(\sum_{i=1}^m X_i\right) = \sum_{i=1}^m E(X_i) = \sum_{i=1}^m (D_i) = \sum_{i=1}^m p_i * \beta_i \quad (21)$$

La variabile D è l'indicatore di efficacia dell'ispezione e in quanto tale fornisce un'indicazione dell'efficacia complessiva della totalità delle procedure di ispezione previste al montaggio.

3.5.2 L'indicatore del costo dell'ispezione

Per avere un panorama ancora più chiaro nella progettazione di misure di ispezione legate al montaggio, l'indicatore di efficacia dell'ispezione è solitamente affiancato dall'indicatore del costo dell'ispezione.

Il costo totale dell'ispezione dell' i -esima WS può essere approssimato dalla seguente equazione:

$$C_{tot,i} = c_i + NRC_i * p_i * (1 - \beta_i) + URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i + NDC_i * p_i * \beta_i \quad (22)$$

dove:

c_i : è il costo della singola attività di ispezione (che può essere manuale, automatica etc.);

NRC_i : è il costo di riparazione necessario cioè il costo della rimozione del difetto quando è effettivamente presente;

URC_i : è il costo di riparazione non necessario cioè il costo conseguente ad un falso positivo dovuto ad esempio all'interruzione o rallentamento del processo di montaggio;

NDC_i : è il costo correlato al difetto non individuato cioè il costo legato alla non individuazione di un difetto effettivamente presente.

Quindi, oltre alla stima dei parametri p_i , α_i e β_i per ogni WS, l'implementazione di questo indice richiede anche l'individuazione dei valori di alcuni parametri di costo. In generale, c_i e NRC_i sono noti, URC_i dovrebbe essere relativamente facile da stimare mentre più difficile è fornire un valore per NDC_i in quanto legato ad eventi poco tangibili o tracciabili come la perdita di immagine per l'Azienda o riparazioni post-vendita.

È da sottolineare come, tra i parametri sopra menzionati, solo c_i , α_i e β_i sono legati alla procedura di ispezione mentre p_i è collegato alla tendenza del processo a generare difetti e NRC_i , URC_i e NDC_i dipendono dal costo di riparazione dei difetti (necessaria o non necessaria che sia).

In conclusione, il costo totale C_{tot} del processo è dato dalla seguente formulazione

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^m C_{tot,i} = \sum_{i=1}^m [c_i + NRC_i * p_i * (1 - \beta_i) + URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i + NDC_i * p_i * \beta_i] \quad (23)$$

e costituisce un bilancio tra le diverse componenti di costo.

Per ogni i -esima WS, la componente c_i è sempre presente nel momento in cui viene fatta un'ispezione mentre il termine $NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$ ha comportamento opposto rispetto alle altre due componenti $URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$ e $NDC_i * p_i * \beta_i$. Infatti, nel momento in cui il difetto viene individuato la situazione ideale del componente viene ripristinata, non è necessario considerare la terza e la quarta componente della formula di costo.

Inoltre, come graficamente mostrato in [Figura 25](#), la componente c_i è indipendente dai parametri α_i e β_i , le componenti NRC_i e NDC_i dipendono solo da β_i mentre URC_i dipende solo da α_i .

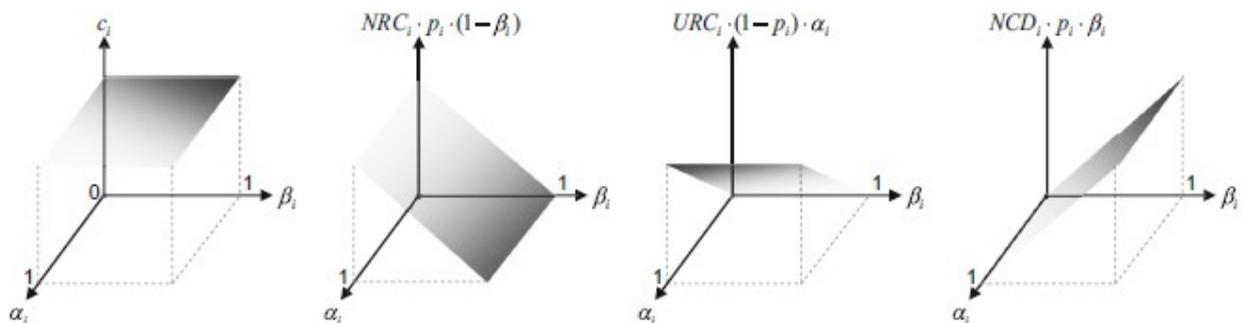


Figura 25 - I grafici illustrano l'andamento delle componenti di costo in funzione delle probabilità α_i e β_i (adattamento da Franceschini et al., 2018)

È da sottolineare che, per la natura stessa dei parametri che compongono la formulazione di $C_{tot,i}$, nel momento in cui migliora la qualità del processo di ispezione:

- le probabilità α_i e β_i tendono a diminuire mentre c_i aumenta;
- i valori di $URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$ e $NDC_i * p_i * \beta_i$ tendono a diminuire mentre il valore di $NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$ tende ad aumentare.

Di conseguenza varia anche il valore dell'indicatore complessivo C_{tot} .

3.6 Esempio applicativo: assemblaggio di durometri

Si riporta, riassumendo, il caso studio di implementazione dei due indicatori descritti in [Capitolo 3, §3.5](#), riportato in Franceschini et al., 2018.

Il caso studio prende in considerazione il montaggio meccanico della testa di un durometro modello LD 3000 AF della ditta AFFRI ([Figura 26](#)).

Il processo di assemblaggio, schematizzato in [Figura 27](#), è diviso in sei WS. Per ogni WS, si considera un'ispezione a completamento della stessa per individuare eventuali difetti.

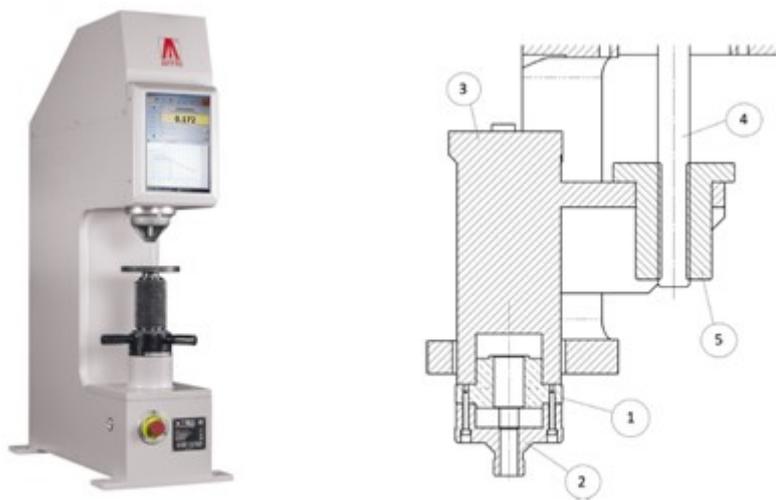


Figura 26 - Fotografia del durometri AFFRI modello LD 3000 AF (a sinistra) e disegno tecnico meccanico (a destra) della testa (3) composta dal supporto dell'indentatore (2) e il supporto di riferimento (1) (adattamento da Franceschini et al., 2018)

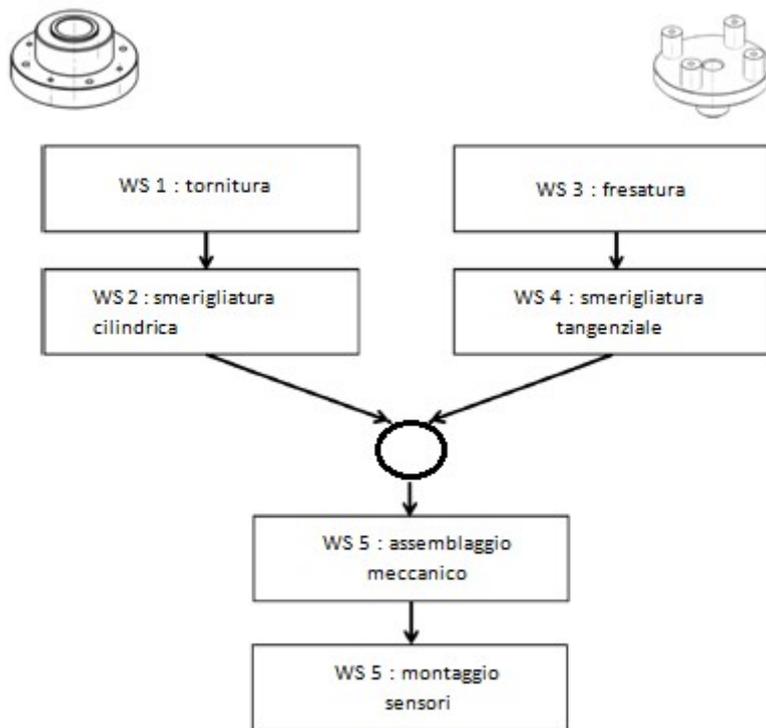


Figura 27 - Schema del processo assemblaggio del modello LD 3000 della ditta AFFRI (adattamento da Franceschini et al., 2018)

Per ogni i -esima WS, si stima il valore dei parametri p_i , α_i e β_i legate all'implementazione delle procedure di ispezione previste (Tabella 5).

Numero WS	Descrizione WS	p_i [%]	α_i [%]	β_i [%]
1	tornitura	5,0	1,0	5,0
2	smerigliatura cilindrica	2,0	0,5	2,5
3	fresatura	5,0	1,0	5,0
4	smerigliatura tangenziale	0,2	0,5	2,5
5	assemblaggio meccanico	2,0	2,0	0,1
6	montaggio sensori	5,0	2,0	0,1

Tabella 5 - Stima delle probabilità p_i , α_i e β_i legate all'implementazione delle procedure di ispezione (adattamento da Franceschini et al., 2018)

Una volta note anche le componenti di costo c_i , NRC_i , URC_i e NDC_i (Tabella 6), è possibile stimare per l'indicatore di efficacia dell'ispezione D e l'indicatore del costo dell'ispezione espresso in euro C_{tot} (Tabella 7).

Numero WS	Descrizione WS	c_i [€]	NRC_i [€]	URC_i [€]	NDC_i [€]
1	tornitura	2,1	3,5	3,5	18,8
2	smerigliatura cilindrica	0,7	3,6	3,6	18,8
3	fresatura	3,1	5,2	5,2	18,8
4	smerigliatura tangenziale	0,7	3,6	3,6	18,8
5	assemblaggio meccanico	7,0	3,5	3,5	31,4
6	montaggio sensori	6,3	2,1	2,1	25,1

Tabella 6 - Stima dei parametri di costo legati all'implementazione delle procedure di ispezione (adattamento da Franceschini et al., 2018)

Indicatore	Valore
D	0,00562
C_{tot} [€]	20,94

Tabella 7 - I valori risultanti per l'indicatore di efficacia dell'ispezione D e l'indicatore del costo dell'ispezione espresso in euro C_{tot} (adattamento da Franceschini et al., 2018)

Capitolo 4. Caso studio applicativo

4.1 La macchina avvolgitrice ad anello rotante

4.1.1 Descrizione meccanica e funzionale

Gli avvolgitori ad anello rotante costituiscono il prodotto di punta della gamma prodotti a marchio Tosa. Con le loro configurazioni, offrono soluzioni per ogni necessità di avvolgimento pallet con film estensibile assicurando la massima stabilizzazione dei carichi, elevata sicurezza ed ottimizzazione dei costi.

I modelli di base disponibili sono tre, denominati, in ordine di uscita su mercato nonché di prestazioni, 125, 126 e *Savitar*.

Indipendentemente dal modello, una macchina avvolgitrice ad anello rotante è scomponibile in tre parti: parte meccanica, parte elettrica ed elettronica e parte software, come schematizzato in [Figura 28](#).

Nella parte meccanica ([Figura 29](#)), il cui assemblaggio è oggetto di discussione in [Capitolo 4, §4.1.2](#), vi sono:

- una parte fissa di cui fanno parte:
 - la struttura portante, che chiameremo telaio, dimensionata per garantire robustezza e durata, costituita da scatolati e profilati in lamiera di acciaio ad alta resistenza;
 - il gruppo Taglio Aggancio Saldatura (di seguito TAS) che alla fine del ciclo taglia automaticamente il film per mezzo di un filo metallico riscaldato e termosalda l'ultima coda al carico con un'apposita piastra;
 - il pressore a pantografo stabilizza il carico pallettizzato, esercitando una pressione sulla sua sommità durante l'avvolgimento.
- una parte mobile, costituita dall'insieme denominato carrello di cui fanno parte l'anello rotante e il gruppo prestiro. L'anello, costruito con un profilo in acciaio calandrato, è leggero ma molto resistente, adatto quindi alle alte velocità; esso è movimentato da un'apposita cinghia collegata ad un motore elettrico.

La rotazione dell'anello intorno al carico pallettizzato è combinata, nel corso del ciclo di avvolgimento, con lo scorrimento verticale dell'anello rotante al quale è fissato il gruppo prestiro ([Capitolo 4, §4.2](#)).

La parte elettrica ed elettronica include tutti i cablaggi dei componenti, sensori e motori a bordo macchina e il quadro elettrico generale (di seguito QE). La parte software è progettata per il comando e il controllo della macchina, nonché per la comunicazione con l'operatore della stessa durante il suo funzionamento, la cui programmazione e configurazione è affidata a un fornitore esterno specializzato. Nessuna di queste due parti sarà ulteriormente approfondita in quanto non oggetto del presente lavoro di Tesi.

Nel corso del tipico ciclo di lavoro della macchina, illustrato in [Figura 30](#), il carico pallettizzato viene portato mediante sistema di trasporto a rulli o a cinghia all'interno dell'area delimitata dal carrello.

A questo punto, il pressore a pantografo si abbassa andando a premere sulla sommità del carico pallettizzato per assicurarne la stabilità durante la fase di avvolgimento film; il carrello si abbassa, l'anello inizia a ruotare e contemporaneamente il film plastico passa attraverso il gruppo prestiro e viene distribuito intorno al carico.

Dopo un numero di avvolgimenti variabile e reimpostato in funzione del prodotto pallettizzato, il ciclo di avvolgimento termina: il gruppo TAS provvede a staccare la coda di film plastico e il carico viene lasciato libero per essere trasportato verso la stazione successiva.

Quindi un nuovo pallet entra nel perimetro dell'anello della macchina e il ciclo si ripete.

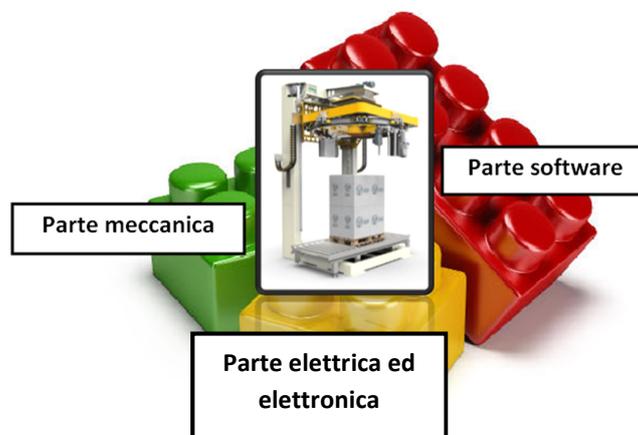


Figura 28 - Rappresentazione schematica delle parti di cui è composta una macchina avvolgitrice ad anello rotante

Il ciclo di avvolgimento di una macchina Tosa è caratterizzato da una grande flessibilità, in quanto, rispetto a un prodotto equivalente di un competitor, il gruppo TAS si muove insieme all'anello posizionato sul carrello rotante permettendo all'avvolgimento di film plastico di assumere molteplici forme.

Altre due caratteristiche rilevanti, sia a livello tecnico che a livello commerciale, sono la produttività, espressa in pallet/ ora per i diversi modelli e la velocità di rotazione dell'anello rotante espressa in giri al minuto (o rpm). Il range di valori caratteristici per entrambi questi parametri per tutti i modelli citati è riportato in [Figura 31](#) e [Figura 32](#).

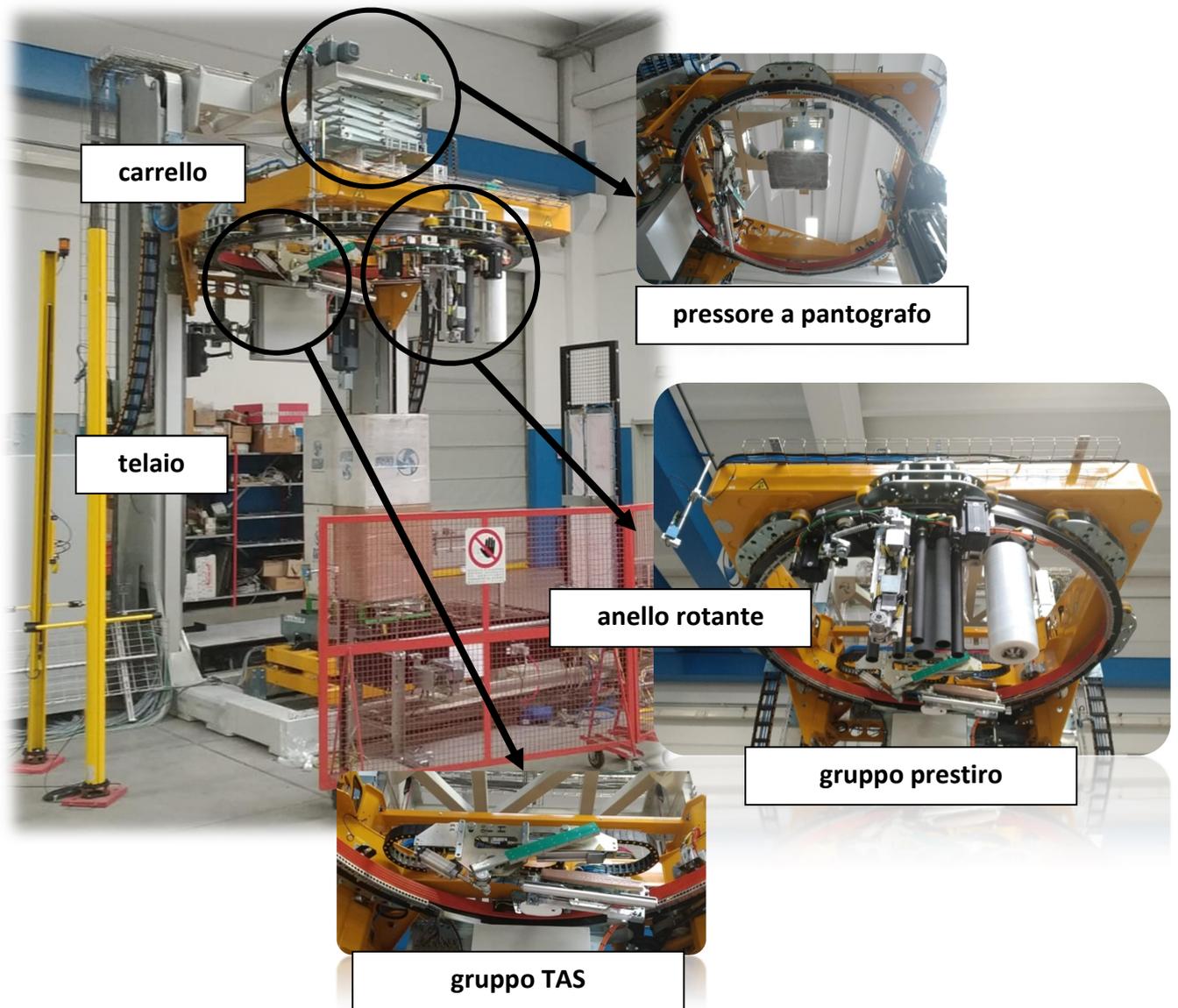


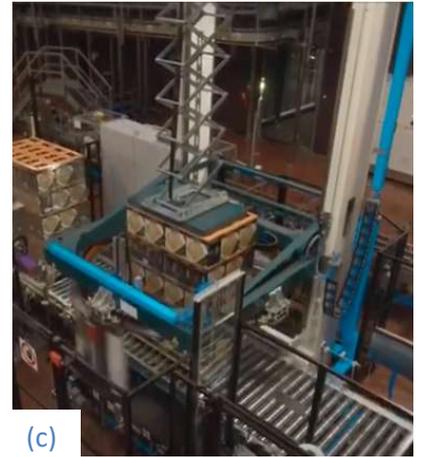
Figura 29 - Illustrazione fotografica dei gruppi che compongono la parte meccanica di una macchina avvolgitrice ad anello rotante



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 30 - Illustrazione del ciclo di lavoro tipico della macchina (a) il pallet entra nel perimetro dell'anello della macchina (b) il pressore a pantografo si abbassa (c) il carrello si abbassa, l'anello inizia a ruotare e il film plastico viene distribuito intorno al carico (d) il carico viene lasciato uscire verso la stazione successiva di lavoro mentre un nuovo pallet entra nel perimetro dell'anello della macchina

		produttività oraria [pallet/ora]						
modello	70	80	90	100	120	130	140	150
125								
126								
126/2								
Savitar								
Savitar/2								

Figura 31 - Valori caratteristici per la produttività oraria [pallet/ora] per i modelli disponibili della gamma Tosa; la dicitura /2 indica la presenza di due gruppi prestiro a bordo macchina al posto dell'usuale singolo gruppo

		numero di giri anello rotante [rpm]						
modello	35	40	55	60	65	70	75	80
125								
126								
126/2								
Savitar								
Savitar/2								

Figura 32 - Valori caratteristici per la velocità di rotazione dell'anello [rpm] per i modelli disponibili della gamma Tosa; la dicitura /2 indica la presenza di due gruppi prestiro a bordo macchina al posto dell'usuale singolo gruppo

La differenza principale tra i diversi modelli è nel tipo di alcuni organi meccanici montati. Ad esempio, le catene per la movimentazione del carrello del modello 125 che rappresenta il modello base per le macchine ad anello rotante sono state sostituite dalle cinghie nel modello 126, che rappresenta la generazione successiva, portando di conseguenza a una minore necessità di manutenzione nella macchina nel tempo da parte del cliente finale (secondo il concetto di *design for low maintenance*, già descritto in [Capitolo 2, §2.3](#)). L'innovazione principale introdotta invece nel modello Savitar consiste in alcuni accorgimenti (ad esempio, cinghie ridondanti per la trasmissione) che rendono la macchina *fail safe* anche rispetto al carico pallettizzato, non solo rispetto all'operatore come nei due modelli precedenti.

Il costo finale al cliente per queste macchine è compreso tra i 70.000 € e i 200.000 €, in funzione delle prestazioni garantite.

4.1.2 Descrizione processo di assemblaggio

Per meglio apprezzare i capitoli successivi, è utile sottolineare quanto segue. Un processo può essere scomposto in sotto processi di diverso livello, secondo quanto schematizzato in [Figura 33](#).

Per il presente lavoro di Tesi dunque, un primo livello di scomposizione per una macchina avvolgitrice ad anello rotante è, quindi, la divisione in parte meccanica, parte elettrica ed elettronica e parte software ([Figura 28](#)). Un secondo livello o sottoprocesso è costituito dai gruppi funzionali di cui è costituita la parte meccanica ([Figura 29](#)), un terzo livello consiste nelle operazioni necessarie all'assemblaggio di questi ultimi (ad esempio in [Capitolo 4, §4.2.3](#)).

Per quanto riguarda la correlazione (rappresentata, in [Figura 33](#), dalle frecce che collegano i quadrati rappresentanti i vari sottoprocessi) tra questi livelli, è bene sottolineare quanto segue.

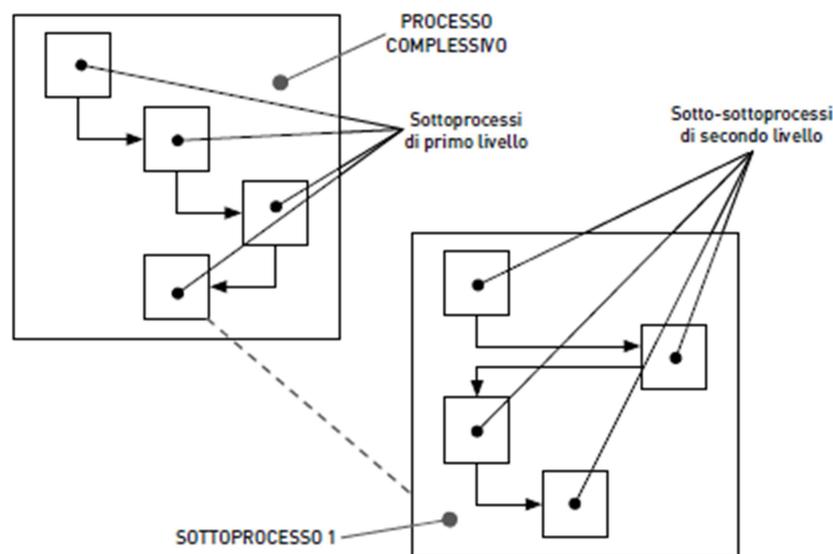


Figura 33 - Esempio di scomposizione di un processo in sotto processi (da Franceschini et al., 2007)

All'interno dell'Area Produttiva di un Azienda metalmeccanica come la Tosa Group S.p.a., è possibile individuare tre flussi: il flusso di materiale, il flusso di informazione, il flusso di persone/processo. La loro conoscenza completa, nonché il loro ruolo nei confronti di tutti gli *stakeholders* (compresi i clienti), è fondamentale per chi si trova ad operare all'interno di un Sistema di Qualità. Avere chiaro quello che, in un sistema *Lean*, viene definito il *flusso del valore*, è il punto di partenza per l'eliminazione degli sprechi, assicurare l'aggiunta di valore lungo tutta la catena produttiva, in ottica di miglioramento ed ottimizzazione di tutti i processi aziendali.

In [Figura A1](#), contenuta in Appendice, si riporta, come conclusione dell'introduzione al caso studio esposta in questi ultimi due paragrafi, la mappatura qualitativa del processo di assemblaggio per una macchina ad anello rotante ad opera delle Risorse addette al montaggio meccanico dell'Area Produttiva. Questa mappatura utilizza la simbologia ASME, rivisitata in alcuni suoi simboli per meglio adattarsi all'effettiva realtà del processo e riporta l'ordine di assemblaggio dei sottogruppi della parte meccanica.

Si evidenzia, inoltre, il ruolo dei due fornitori del processo:

- il magazzino meccanico dell'Azienda, incaricato da un lato della preparazione e del conferimento dei componenti e semilavorati in area di montaggio, divisi per sottogruppo (i cosiddetti *cassoni meccanici*) e dall'altro della pianificazione e gestione delle lavorazioni di alcuni semilavorati provenienti dall'officina carpenteria interna;
- i fornitori esterni, a cui è commissionata la realizzazione delle carpenterie di maggiori dimensioni e le lavorazioni di verniciatura e zincatura, nonché la fornitura di componenti commerciali (ad esempio, componentistica pneumatica, motorizzazioni, cuscinetti).

4.2 Il gruppo prestiro

4.2.1 La scelta del gruppo prestiro

Come già riportato in [Capitolo 2, § 2.3](#), le macchine Tosa vengono progettate in maniera tale da risultare affidabili, estremamente efficienti ed in grado di garantire prestazioni di eccellenza e durevoli nel tempo.

Dal lato cliente, l'esigenza più avvertita è sicuramente quella di ottenere, a fine ciclo di avvolgimento, un carico pallettizzato che risulti:

- sicuro, cioè tale che la merce contenuta all'interno sia opportunamente assicurata e protetta per il successivo immagazzinamento e/o spedizione;
- *cost effective*, cioè tale che l'avvolgimento sia eseguito utilizzando il minimo quantitativo di film indispensabile;
- esteticamente perfetto, cioè tale che il carico pallettizzato risulti, a uno sguardo esterno, un perfetto parallelepipedo; questo anche per valorizzare l'immagine dell'azienda cliente.

È opportuno sottolineare che ogni carico pallettizzato presenta caratteristiche differenti dovute non solo alla diversa natura delle merci e del formato delle stesse ma anche alle dimensioni della pedana (ad esempio quarto di pallet); queste caratteristiche influenzano in maniera determinante la modalità di avvolgimento del pallet e fanno sì che, dal lato della funzione di progettazione interna aziendale, la macchina avvolgitrice debba essere, in ultima analisi, pensata per essere il più possibile flessibile. La risposta a questa ultima esigenza evidenziata, quella cioè della flessibilità, dell'adattabilità della combinazione di avvolgimenti al tipo di carico, è nel sottogruppo di macchina denominato gruppo prestiro ([Figura 34](#)).

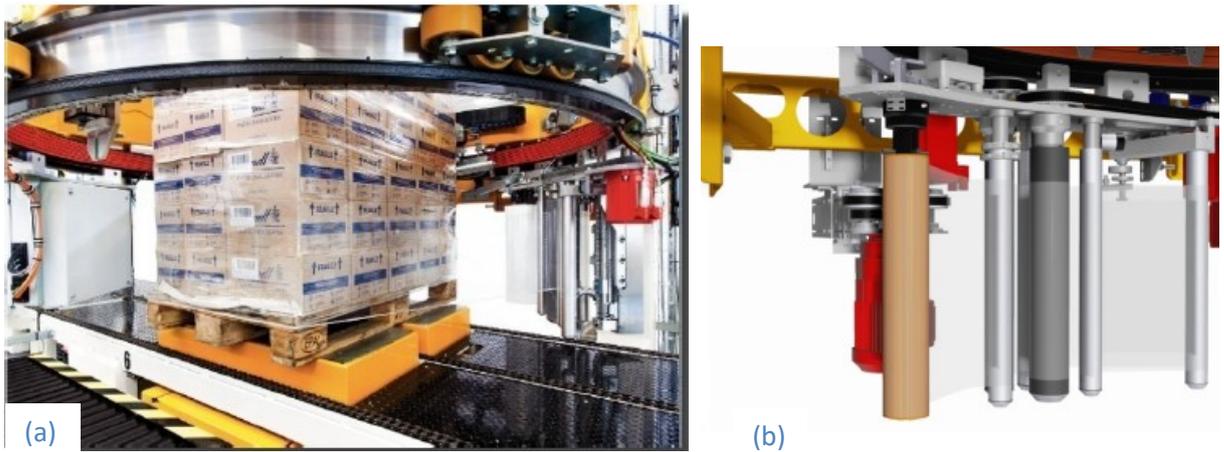


Figura 34 - Il gruppo prestiro (a) fotografia panoramica della sua collocazione (b) disegno meccanico CAD 3D

Il prestiro è un assieme elettromeccanico, i suoi componenti, l'opportuno software di controllo nonché l'interfaccia grafica (HMI) di regolazione manuale dell'operatore consentono al gruppo:

- di assolvere alla funzione di tiro/srotolamento del film plastico
- di prestirare il film
- di posizionare opportunamente il film
- di effettuare il necessario numero di avvolgimenti



Il prestiro permette di tirare il film prima del ciclo di avvolgimento per ottimizzarne le caratteristiche (Tabella 8).

Lunghezza film [mm]	% prestiro	Lunghezza film prestirato [mm]
1000	100 %	2000
1000	200 %	3000
1000	400 %	5000

Tabella 8 - Esempio di percentuali di prestiro, impostabili da pannello operatore (HMI)

Il valore della percentuale di prestiro è tarato ad hoc sul materiale ed è possibile impostare programmi di avvolgimento con tensionamento del film variabile in diversi punti del carico pallettizzato. L'assieme è dotato inoltre di braccio di compensazione e sensori per la variazione di velocità di svolgimento film tra il lato corto e il lato lungo del pallet. In particolare, per motivi strutturali, risultano critici i quattro angoli del pallet: in molti casi si prevede l'applicazione di angolari di protezione (Figura 35) e un controllo particolare della forza di contenimento esercitata dal film, permesso dal sistema *Smart Wrapping* (Figura 36).



Figura 35 - Macchina avvolgitrice ad anello rotante con, riquadrato in azzurro, l'accessorio predisposto all'applicazione dei dispositivi metti angolari

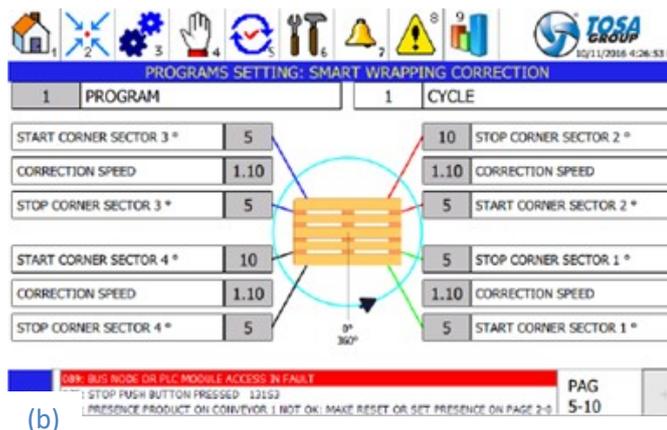
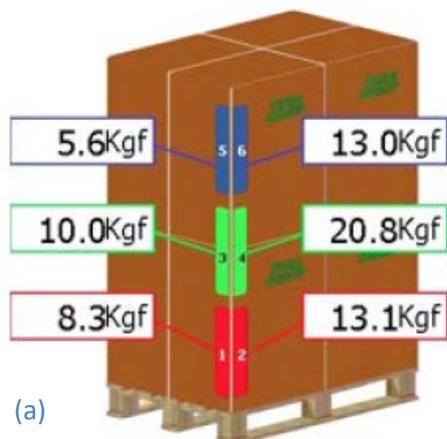


Figura 36 - La tecnologia *Smart Wrapping* in dotazione alle macchine Tosa (a) rappresentazione delle diverse forze di contenimento sul carico pallettizzato (b) la HMI per la regolazione dal pannello operatore della *containment force*

Vista l'importanza del gruppo prestiro per il funzionamento della macchina e la risposta alle richieste del cliente, questo assieme è stato scelto come oggetto del caso studio della presente Tesi. Si rimanda ai paragrafi successivi per la descrizione dei componenti che compongono l'assieme e i risultati dello studio.

4.2.2 Descrizione meccanica del gruppo prestiro

Il gruppo prestiro installato sull'anello delle macchine avvolgitrici ad anello rotante permette di sfruttare al meglio le caratteristiche del film plastico. Il modello Tosa 492 è illustrato in Figura 37.

È installato su una struttura di supporto denominata piastra telaio. Il film estensibile passa attraverso due rulli gommati collegati ciascuno da un sistema di trasmissione a cinghia a un motore brushless: le velocità dei due rulli quindi sono tra loro indipendenti. Entrando in contatto con la superficie dei due rulli, il film è allungato in un quantitativo proporzionale a questa differenza di velocità; si determina così un rilevante aumento della lunghezza del film che viene avvolto sul carico. Il sistema elettronico misura la velocità tramite appositi sensori e mantiene costante la tensione del film durante il suo deposito sull'intera superficie del pallet.

La configurazione del modello Tosa 492 permette inoltre di variare il rapporto del prestiro in modo elettronico tramite controllo PLC e di modificare la percentuale di prestiro durante la fase di avvolgimento, con i vantaggi citati in Capitolo 4, § 4.2.1.

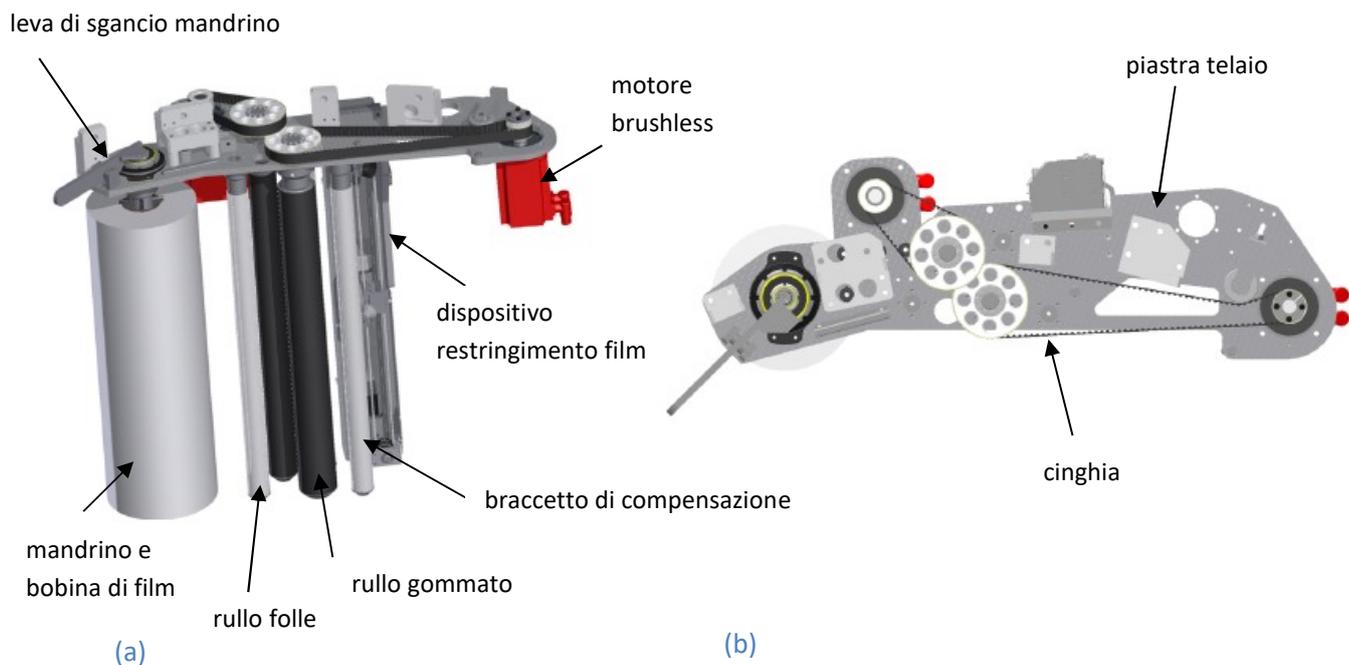


Figura 37 - Il prestiro Tosa modello 492 (a) disegno meccanico CAD 3D dell'assieme (b) vista dall'alto dell'assieme tratto dallo stesso disegno CAD 3D

Il mandrino di presa della bobina permette inoltre la sostituzione automatica della bobina esaurita di film grazie al dispositivo denominato Cambio Bobina Automatico (CBA, Figura 38). Si tratta di un dispositivo brevettato in Europa e America e presente ormai su tutti gli avvolgitori più performanti.

L'operazione di carico e scarico della bobina è manuale, tramite operatore la cui attività è confinata in un'area di sicurezza: l'intera operazione richiede un tempo di circa 35 secondi e non interrompe oltre questo tempo il ciclo di lavoro della macchina.



Figura 38 - Fotografia del gruppo prestiro montato in combinazione con il gruppo CBA

Infine, il gruppo prestiro può essere dotato del dispositivo per il restringimento film a cordone che viene azionato automaticamente a seconda del ciclo da realizzare. Tale dispositivo è in grado di ridurre a un filo sottile l'ultima coda di film del ciclo di lavorazione, filo che viene assicurato direttamente sul carico pallettizzato mediante saldatura termica eseguita dal gruppo TAS (vedere [Figura 29](#)). È possibile realizzare la riduzione desiderata del film dall'alto, dal basso o da entrambi i lati e in qualsiasi punto del prodotto sia necessario ([Figura 39](#)).

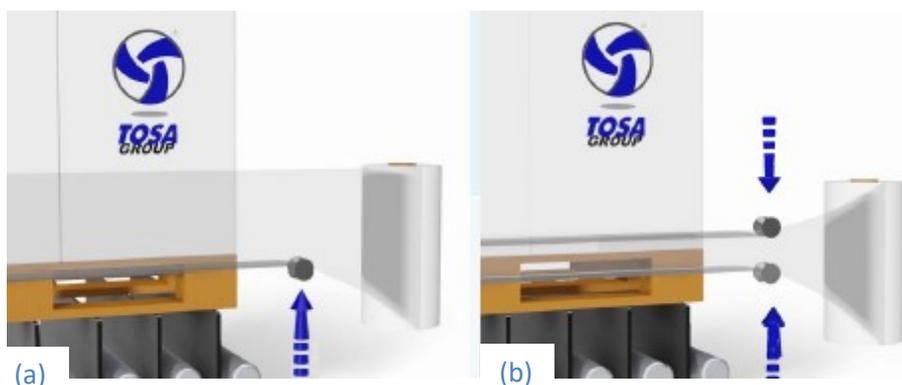


Figura 39 - Dispositivo per il restringimento del film a cordone in funzionamento (a) restringimento dal basso (b) restringimento da entrambi i lati

4.2.3 La mappatura del processo di assemblaggio

All'assemblaggio del gruppo prestiro Tosa modello 492 è dedicata parte del lavoro della sottoarea dello stabilimento denominata Meccanica 3 ([Figura 40](#)). Il layout del processo è a isola fissa e il montaggio meccanico, interamente manuale, con eventuale ausilio di elettroutensili e altre attrezzature non automatiche di carpenteria, è eseguito in tutte le sue fasi da un'unica Risorsa dedicata.

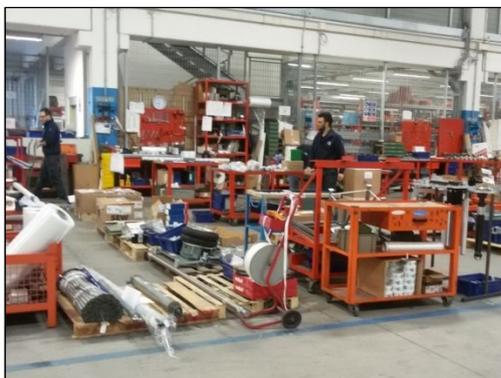


Figura 40 Una panoramica dell'area di lavoro della funzione Meccanica 3 dove sono assemblati i tutti i gruppi prestiro Tosa modello 492

Seguendo quanto previsto dal modello implementato in questo studio ([Capitolo 3, §3.3](#)), sono state individuate, mediante un certo numero di osservazioni sul campo, trenta fasi, cioè *workstations* (WS). Ognuno dei sottogruppi del gruppo prestiro (ad eccezione del dispositivo di restringimento film, non preso in considerazione in questo lavoro per motivi di semplicità), riportato in [Figura 37](#), viene prima assemblato a banco dall'operatore e poi successivamente montato sulla piastra telaio. Questa doppia lavorazione è il criterio seguito per la definizione delle WS.

Ciascuna delle i -esime WS è composta da un numero variabile di operazioni o *job elements* (il cui numero sarà indicato, come da modello con $N_{a,i}$) che sono risultati essere da un minimo di uno a un massimo di dodici, secondo la relativa complessità. Nel definire *i job elements*, si è cercato di conformarsi il più possibile a quella che è la realtà operativa, raggruppando insieme più operazioni definite come elementari dal metodo MTM (*Methods Time Measurement*), assegnando dei confini in termini di inizio e di fine ben definiti e facilmente individuabili da un osservatore esterno. Sia le WS che le relative operazioni sono riportate nell'ordine di svolgimento seguito dalla Risorsa addetta al montaggio meccanico dei gruppi prestiro.

Per facilitare la lettura della presente Tesi, si riportano nelle tabelle in basso ([Tabella 9](#), [Tabella 10](#), [Tabella 11](#)) tre delle trenta WS di cui sopra, denominate *Assemblaggio al banco gruppo motore*, *Assemblaggio a banco rulli gommati*, *Montaggio assieme mandrino su piastra telaio prestiro*, indicate come le più significative in termini di complessità da parte dell'esperto aziendale del processo. Le restanti WS e relativi *job elements* sono riportati in [Tabella A2](#).

Si sottolinea che la definizione delle WS e dei *job elements* ha richiesto un certo tempo all'osservatore ed è stato oggetto di attenta valutazione e confronto con gli autori del caso studio precedente ([Capitolo 3, §3.6](#)) ed esperti del modello di riferimento ([Capitolo 3, §3.3](#)) per giungere infine ad un compromesso funzionale ai fini della coerenza dello studio in atto ma attinente alla realtà aziendale ospitante.

Numero WS	Rif. disegno	Descrizione WS	Descrizione <i>job elements</i>	Qtà.	Attrezzi e macchinari utilizzati	Documentazione fotografica
2	1	Assemblaggio a banco gruppo motore 1	Pulizia albero motore 1	1	Mano	
			Inserimento distanziale albero motore 1	1	Mano	
			Inserimento forzato puleggia albero motore 1 e anello calettatore albero motore 1	1	Mano	
	2		Preserraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Chiave Morsa da banco	
			Serraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Chiave dinamometrica Morsa da banco	
			Sostituzione anelli golfari con viti motore 1	2	Mano Chiave	
			Serraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Mano Chiave	

Tabella 9 - Alcuni dettagli sperimentali della WS denominata *Assemblaggio a banco gruppo motore 1*

Numero WS	Rif. disegno	Descrizione WS	Descrizione <i>job elements</i>	Qtà.	Attrezzi e macchinari utilizzati	Documentazione fotografica
23	-	Montaggio assieme mandrino su piastra telaio prestiro	Preserraggio mandrino in sede su piastra telaio prestiro	12	Chiave Mano	
			Serraggio mandrino in sede su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
	Serraggio viti anello intermedio mandrino		3	Chiave		
	Serraggio viti lamina appoggio freno mandrino		4	Chiave		
	Serraggio prima ghiera mandrino		1	Chiave		
	Serraggio seconda ghiera mandrino		1	Chiave		

Tabella 10 - Alcuni dettagli sperimentali della WS denominata *Montaggio assieme mandrino su piastra telaio prestiro*

Numero WS	Rif. disegno	Descrizione WS	Descrizione job elements	Qtà.	Attrezzi e macchinari utilizzati	Documentazione fotografica
6	7	Assemblaggio a banco rulli gommati	Pulizia albero rullo gommato 1	-	Mano	
	8		Pulizia albero rullo gommato 2	-	Mano	
			Inserimento ingrassatore su manicotto flangiato rullo gommato 1	-	Chiave	
			Inserimento ingrassatore su manicotto flangiato rullo gommato 2	-	Chiave	
			Ingrasso cuscinetti manicotto flangiato rullo gommato 1	2	Mano	
			Ingrasso cuscinetti manicotto flangiato rullo gommato 2	2	Mano	
			Ingrasso albero rullo gommato 1	-	Mano	
			Ingrasso albero rullo gommato 2	-	Mano	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede mozzo rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede mozzo rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
	9		Inserimento mozzo su albero rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
	10		Inserimento mozzo su albero rullo gommato 2	-	Pressa idraulica	

Tabella 11 - Alcuni dettagli sperimentali della WS denominata *Assemblaggio a banco rulli gommati*

4.2.4 L'individuazione delle tecniche di ispezione adottate

Tra i risultati impliciti di questo lavoro c'è anche la verifica dell'efficacia delle procedure di ispezione attualmente implementate presso l'azienda per quanto concerne il montaggio meccanico del gruppo prestiro; a questo scopo, un'osservazione sul campo è stata dedicata al rilevamento degli attuali controlli.

In [Tabella 12](#), sono dettagliati i controlli per le WS di esempio, per le restanti si rimanda il lettore in [Tabella A3](#).

Per ogni WS sono state quindi individuate le operazioni di controllo (riportato sotto la colonna *Descrizione controllo WS*). Inoltre, sono stati definiti:

- il tipo di controllo, segnalando
 - con *i* il controllo esplicito, cioè il controllo evidente, diretto e consapevole da parte dell'operatore;
 - con *ii* il controllo implicito, cioè il controllo non evidente e che l'operatore svolge in modo non consapevole.
- lo strumento di controllo utilizzato dall'operatore, distinguendo
 - il controllo visivo (di seguito VIS), se l'ispezione è eseguita semplicemente con un attento sguardo;
 - il controllo manuale (MAN) se una buona parte dell'ispezione viene eseguita tastando gli assiemi in montaggio;
 - il controllo meccanico (MECC) se parte dell'ispezione viene eseguita mettendo in moto gli assiemi in montaggio;
 - il controllo geometrico (GEOM) se viene verificata la conformità della WS in montaggio con quanto richiesto dal disegno meccanico;
 - il controllo dimensionale (DIM) se le unità in montaggio vengono controllate dimensionalmente per assicurarsi la loro conformità con quanto indicato dal progetto.
- gli attrezzi per il controllo della WS. Si nota che nella maggior parte dei casi, l'ispezione è eseguita manualmente e senza l'utilizzo di attrezzature specifiche.

Numero WS	Tipo controllo per WS	Strumento di controllo per WS	Descrizione controllo WS	Attrezzi controllo WS
2	ii	VIS	Controllo pulizia effettiva albero motore 1	Mano
		MAN	Controllo allineamento assieme puleggia albero motore 1 e anello calettatore albero motore 1	
6	i	VIS	Controllo pulizia albero rulli gommati	Mano
		MAN		
		MECC	Controllo corretta rotazione assieme rulli gommati	Mano
23	i	MECC	Controllo corretta rotazione mandrino su piastra telaio prestiro	Mano
		GEOM	Controllo allineamento assieme mandrino su piastra telaio prestiro	Mano

Tabella 12 - Indicazione dei dettagli del controllo previsto durante l'assemblaggio per le tre WS di esempio della presente Tesi

4.3 La raccolta dei dati sperimentali

4.3.1 I parametri per il calcolo del fattore di complessità di processo $Cf_{P,i}$

Il parametro indice della complessità del montaggio legato al processo, chiamato $Cf_{P,i}$, dipende principalmente dal fattore tempo come riportato in [Capitolo 3, § 3.3](#)

$$Cf_{P,i} = \sum_{j=1}^{N_{a,i}} SST_{i,j} - t_0 * N_{a,i} = TAT_i - t_0 * N_{a,i} \quad (5)$$

dove TAT_i è il tempo totale di montaggio nella i -esima WS, t_0 è il tempo limite di montaggio e $N_{a,i}$ è il numero di *job elements* presente nella singola WS. TAT_i e t_0 sono stati ricavati mediante un cronometraggio dei tempi.

Il cronometraggio dei tempi è stato svolto da un osservatore appostato nell'area di montaggio dei gruppi prestiro, mediante un cronometro digitale e le misure sono state arrotondate al secondo. Per ogni *job elements* l'osservatore ha registrato tre valori; tali valori risultano da un lato sufficientemente rappresentativi dei tempi standard e dall'altro il loro numero contenuto non richiede un tempo totale eccessivo per lo svolgimento di questa fase.

I tempi rilevati per le tre WS di interesse per questo testo sono riportati in [Tabella 13](#), per le altre WS il lettore può consultare la Tabella in [Tabella A4](#).

In tutte queste tabelle, le colonne di *Deviazione standard* e *Deviazione standard relativa* sono state calcolate con l'ausilio di un foglio Excel. Questi ultimi valori sono particolarmente rilevanti per il metodo sperimentale attuato: come si può notare (cifre rosse evidenziate nelle tabelle) spesso il loro valore oltrepassa la soglia del 20%. La deviazione standard relativa è espressione dell'imprecisione dei dati raccolti, cioè della loro carenza in termini di riproducibilità e ripetibilità. Da un lato, quindi, molti dei tempi cronometrati mostrano una variabilità troppo elevata per poter essere considerati attendibili; dall'altro, tuttavia, la conoscenza dell'effettiva realtà aziendale maturata dall'osservatore sul campo porta a concludere che la variabilità espressa dal dato sia fisiologica del particolare processo di assemblaggio del gruppo prestiro e del contesto in cui esso è inserito.

Solo per citare un esempio, la condizione dei componenti da fornitura di magazzino non è mai univoca quindi nelle operazioni elementari di *Pulizia* di parte di un particolare in assemblaggio il tempo impiegato inevitabilmente varia, anche significativamente, da un cronometraggio all'altro.

Numero WS	Numero job elements	Tempo esecuzione operazione elementare 1 [s]	Tempo esecuzione operazione elementare 2 [s]	Tempo esecuzione operazione elementare 3 [s]	Tempo medio esecuzione operazione elementare [s]	Deviazione standard	Deviazione standard relativa
2	1	83	52	38	57,7	23,0	40%
	2	3	2	3	2,7	0,6	22%
	3	14	23	21	19,3	4,7	24%
	4	110	112	105	109,0	3,6	3%
	5	219	221	214	218,0	3,6	2%
	6	38	31	25	31,3	6,5	21%
6	1	26	27	51	34,7	14,2	41%
	2	43	65	74	60,7	15,9	26%
	3	7	12	15	11,3	4,0	36%
	4	10	8	11	9,7	1,5	16%
	5	209	185	216	203,3	16,3	8%
	6	186	189	136	170,3	29,8	17%
	7	7	14	9	10,0	3,6	36%
	8	11	16	17	14,7	3,2	22%
	9	43	66	58	55,7	11,7	21%
	10	31	34	39	34,7	4,0	12%
	11	67	63	73	67,7	5,0	7%
	12	52	65	91	69,3	19,9	29%
23	1	122	173	143	146,0	25,6	18%
	2	244	237	221	234,0	11,8	5%
	3	86	121	78	95,0	22,9	24%
	4	135	134	101	123,3	19,3	16%
	5	73	99	85	85,7	13,0	15%
	6	145	126	123	131,3	11,9	9%

Tabella 13 - Tabella riassuntiva dei tempi di esecuzione del singolo job element cronometrati sul campo, della deviazione standard e della deviazione standard relativa calcolata mediante foglio Excel

4.3.2 La stima dell'esperto dei DPU_i

Come citato in [Capitolo 1](#), questo lavoro di Tesi intende ricavare l'indicatore del costo dell'ispezione e l'indicatore dell'efficacia dell'ispezione, descritti in [Capitolo 3](#). Entrambi gli indicatori dipendono dal numero dei DPU_i che in questa Tesi vengono ricavati prendendo in considerazione sia il modello elettromeccanico derivante da letteratura sia avvalendosi della stima di un esperto del processo, individuato nel Responsabile dell'Area Tecnica dal momento che non sono disponibili dati di storico aziendale.

La stima è stata condotta sulla base della produzione dell'anno solare 2018, in cui sono stati assemblati 55 gruppi prestiro modello Tosa 492; i dati sono riportati in [Tabella 14](#) e [Tabella A5](#).

Numero WS	Numero difetti per anno (dato 2018)
2	2
6	6
23	2

Tabella 14 - Numero di difetti rilevati per l'anno solare 2018 per le tre WS di interesse secondo stima del Responsabile dell'Area Tecnica

4.3.3 I parametri per il calcolo del fattore di complessità di progetto $Cf_{D,i}$

Come indicato in [Capitolo 3](#), §3.3, $Cf_{D,i}$ è il fattore di complessità del montaggio legato al progetto del prodotto ed è definito come:

$$Cf_{D,i} = \sum_{q=1}^l \left(w_q * \frac{1}{e} * \sum_{k=1}^e A_{kqi} \right) \quad (14)$$

I termini che compongono questa equazione nonché una spiegazione dettagliata del modo in cui sono stati ricavati, è riportata in seguito.

L'indice l rappresenta il parametro l -esimo, cioè uno di quelli riportati in [Tabella 4](#) e minimamente riadattati in [Tabella 15](#) per meglio soddisfare il caso studio.

Mostrando questa Tabella a un numero e pari a sei di esperti scelti a vario titolo all'interno dell'azienda ospitante è stata chiesta, mediante intervista condotta individualmente dall'autore della presente tesi, un'opinione in merito alle difficoltà costituite dagli stessi parametri per il processo di montaggio dei gruppi prestiro. Questa opinione è stata poi formalizzata in due maniere diverse come riportato più in basso.

In qualità di esperti si sono individuati due ingegneri, di cui uno Responsabile dell'Area Tecnica e l'altro dell'Area Produttiva e quattro Risorse addette al montaggio meccanico del gruppo prestiro con diversi livelli di esperienza per garantire una sufficiente varietà di risposte al sondaggio. Nel dettaglio sono state interpellate: una Risorsa in apprendistato, due Risorse con un'esperienza di media durata, una Risorsa con un'esperienza di lunga durata.

In primo luogo, è stato chiesto agli intervistati quanto secondo loro i singoli parametri, considerati uno per uno influiscano sulla difficoltà di montaggio delle varie WS, anche esse considerate una per volta. È stato chiesto di indicare un valore compreso tra 0 (corrispondente a nessuna difficoltà) e 10 (corrispondente a difficoltà massima) e per mettere tutti nelle stesse condizioni di partenza per la valutazione, si sono mostrati dei range (*Esempio range 0-3, Esempio range 3-6, Esempio range 6-10* in [Tabella 15](#)).

Il risultato di questa prima intervista a tutti gli esperti interessati è la compilazione di tabelle incrociate di giudizio i -esima WS e l -esimo parametro di cui un esempio è riportato in [Tabella 16](#) (per le altre si rimanda in [Tabella A6](#), la prima tabella per ogni soggetto intervistato).

Di seguito, è stata posta la seguente domanda: *quale tra due l -esimi parametri differenti apporta maggiore difficoltà nel montaggio del gruppo prestiro? Quanto l -esimo parametro è più importante in generale per il montaggio meccanico del gruppo prestiro rispetto a un altro l -esimo parametro?*

In questo secondo caso, è stato chiesto agli intervistati di esprimere il proprio parere con numeri da 1 (uguale importanza) a 9 (importanza dominate del primo l -esimo parametro considerato rispetto al secondo). Il risultato finale di questo interrogativo posto a tutti gli esperti individuati per il presente studio è la compilazione di matrici di confronto a coppie di cui un esempio è riportato in [Tabella 17](#) (per le restanti si rimanda in [Tabella A6](#), la seconda tabella per ogni soggetto intervistato).

Per il calcolo sperimentale di w_q , peso dell' l -esimo parametro e A_{kqi} , valutazione dell' q -esimo parametro nell' i -esima WS stimato dal valutatore k -esimo si rimanda il lettore a [Capitolo 5, § 5.1.1.1](#).

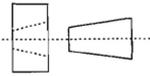
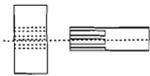
Numero parametro	Denominazione parametro	Esempio range 0-3	Esempio range 3-6	Esempio range 6-10
P1	Forma dei componenti in assemblaggio			
P2	Forza necessaria per l'assemblaggio dei componenti	Accoppiamento semplice (non necessita di attrezzo manuale)	Accoppiamento forzato (necessita di attrezzo manuale)	Accoppiamento con uso pressa idraulica (20 t)
P3	Allineamento dei componenti in assemblaggio	Fermo meccanico	Fermo con riferimento	Nessun fermo di riferimento
P4	Direzione di accoppiamento	Assiale	Assiale eccentrico	Radiale eccentrico
P5	Rapporto di peso dei componenti in assemblaggio	Sollevamento cuscinetto (circa 1 kg)	Sollevamento rullo folle (circa 4 kg)	Sollevamento piastra telaio (circa 7 kg)
P6	Rapporto lunghezza/ larghezza (o diametro) dei componenti in assemblaggio	Dispositivo tendicinghia	Piastra telaio	Rullo
P7	Accessibilità dei componenti in assemblaggio	Accoppiamento semplice	-	Accoppiamento complesso
P8	Lunghezza dei componenti in assemblaggio	Manicotto flangiato	Motore brushless	Rullo
P9	Richiesta strumenti di supporto al montaggio	Nessun supporto	Supporto mediamente stabile	Supporto molto stabile
P10	Stabilità risultante dei componenti assemblati	Assieme risultante molto stabile	-	Assieme risultante poco stabile
P11	Lunghezza di accoppiamento dei componenti	Lunghezza di accoppiamento tra componenti bassa	-	Lunghezza di accoppiamento tra componenti elevata

Tabella 15 - Tabella riassuntiva dei parametri utilizzati in questo studio (adattamento da Beh-Arieh et al., 1994)

Responsabile Area Tecnica																																
Num. parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	P1	2	4	5	6	3	4	3	1	4	1	3	4	4	4	7	3	7	2	2	2	2	2	4	3	1	1	4	5	5	4	
	P2	3	4	4	4	5	7	4	4	3	4	6	5	4	5	4	5	5	3	4	4	4	5	6	3	4	4	3	4	6	5	
	P3	3	5	5	4	3	6	6	3	6	8	7	9	9	9	9	9	9	8	9	10	10	8	8	6	7	7	6	7	9	8	
	P4	3	5	5	6	4	5	5	4	4	3	2	4	4	5	6	5	6	5	4	6	6	5	6	7	6	6	4	5	5	5	
	P5	9	8	8	5	8	5	4	3	3	4	3	6	7	5	4	5	4	6	4	4	4	4	7	5	4	3	3	3	4	7	3
	P6	9	3	3	2	4	9	9	2	3	4	3	6	6	5	5	5	5	4	4	6	4	6	6	4	3	3	4	4	9	6	
	P7	2	3	7	4	6	4	4	2	3	2	1	3	3	2	4	2	5	3	4	4	3	3	3	2	3	3	4	4	3	3	
	P8	7	2	2	2	6	7	7	2	2	2	7	7	7	3	3	2	2	3	2	1	1	7	7	2	2	2	3	3	7	7	
	P9	1	2	2	3	4	8	7	1	2	2	5	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	5	5	2	2	2	4	2	7	4	
	P10	6	8	8	8	8	9	9	4	3	4	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	5	9	9	9	9	3	9	4	9
	P11	1	5	5	2	6	7	6	1	4	5	1	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	2	2	2	4	2	7	5

Tabella 16 - Misura di quanto singoli parametri influiscano sulla difficoltà di montaggio delle varie WS, secondo il Responsabile dell'Area Tecnica dell'azienda ospitante

Responsabile Area Tecnica											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	3	7	2	3	5	6	8	4	2	4
P2	1/3	1	4	2	1	2	1	4	4	2	6
P3	1/7	1/4	1	2	2	3	2	5	7	3	8
P4	1/2	1/2	1/2	1	2	4	2	5	4	2	3
P5	1/3	1	1/2	1/2	1	2	4	6	7	5	2
P6	1/5	1/2	1/3	1/4	1/2	1	3	8	7	6	3
P7	1/6	1	1/2	1/2	1/4	1/3	1	2	4	2	1
P8	1/8	1/4	1/5	1/5	1/6	1/8	1/2	1	4	2	4
P9	1/4	1/4	1/7	1/4	1/7	1/7	1/4	1/4	1	4	3
P10	1/2	1/2	1/3	1/2	1/5	1/6	1/2	1/2	1/4	1	2
P11	1/4	1/6	1/8	1/3	1/2	1/3	1	1/4	1/3	1/2	1

Tabella 17 - Matrice di confronto a coppie dei parametri secondo il Responsabile dell'Area Tecnica dell'Azienda ospitante

4.3.4 I parametri per il calcolo dei costi dell'ispezione

Come menzionato in [Capitolo 3, § 3.5](#) il costo totale dell'ispezione dell'*i*-esima WS può essere valutato come

$$C_{tot,i} = c_i + NRC_i * p_i * (1 - \beta_i) + URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i + NDC_i * p_i * \beta_i \quad (22)$$

α_i e β_i sono, rispettivamente, la probabilità di indicare erroneamente la presenza di un difetto quando poi effettivamente non si è verificato (errore di I specie o falso positivo) e la probabilità di non indicare erroneamente la presenza di un difetto quando effettivamente si è verificato (errore di II specie o falso negativo). Queste probabilità, espressi in termini percentuali e in generale inferiori al 2%, sono stati stimati per ognuna delle WS considerate dal Responsabile dell'Area Tecnica dell'azienda ospitante in qualità di esperto del processo di assemblaggio dei gruppi prestiro. Per le WS di interesse, i loro valori sono riportati in [Tabella 18](#), i restanti sono invece contenuti in [Tabella A7](#).

Numero WS	α_i	β_i
2	0,5%	0,8%
6	0,4%	0,8%
23	0,5%	0,7%

Tabella 18 - Probabilità di falsi positivi o falsi negativi stimati dall'esperto del processo interpellato

[Tabella 19](#) ed [Tabella A8](#) riportano i tempi, in secondi e ore, di montaggio meccanico del gruppo prestiro da cui si ricavano i relativi costi.

Numero WS	c_i [s]	c_i [h]	NRC_i [s]	NRC_i [h]	URC_i [s]	URC_i [h]	NDC_i [s]	NDC_i [h]
2	20	0,006	60	0,017	60	0,017	0	20
6	92	0,026	330	0,092	330	0,092	0	92
23	149	0,041	48	0,013	48	0,013	0,3	149

Tabella 19 - Valori di c_i , NRC_i , URC_i e NDC_i per le tre WS principali di questa Tesi

c_i è il costo della singola attività di ispezione; in questo studio, i valori corrispondenti sono il risultato di un'apposita rilevazione effettuata sul campo dall'osservatore.

NRC_i è il costo di riparazione necessario quando durante il montaggio del gruppo prestiro si riscontra un difetto mentre URC_i è il costo di riparazione conseguente ad un falso positivo: in prima approssimazione, questi due valori possono essere considerati uguali. I valori riportati nelle rispettive colonne in tabella e appendice sono, secondo l'occasione o il risultato di un cronometraggio diretto o frutto di una stima effettuata da una delle Risorse incaricate del montaggio. Infine NDC_i è il costo correlato al falso negativo. La sua valutazione nella presente tesi è stata fatta tenendo conto che, nella realtà in cui opera l'azienda il falso negativo si manifesta una volta che il componente è installato sulla macchina e la stessa è stata messa in servizio presso il cliente.

Dal momento che, la Risorsa incaricata per la sostituzione presso il cliente riceve i vari componenti già assemblati, per tutte le WS di assemblaggio si è assunto un tempo pari a zero. Per le altre WS, una delle Risorse ha indicato un tempo di dieci minuti per la riparazione, ad eccezione delle fasi riguardanti rulli, cinghie e mandrino (Figura 41), per le quali, data la conformazione del gruppo prestiro stesso, è stato stimato un tempo maggiore.



Figura 41 - Gruppo prestiro modello Tosa 492 installato su una macchina avvolgitrice ad anello rotante con, riquadrati, i componenti che richiedono un maggior tempo per la sostituzione presso il cliente

I calcoli finali sono riportati in euro in [Capitolo 5, § 5.2.1](#): il costo orario lordo del solo lavoro della Risorsa addetta al montaggio nel presente studio è stato indicato dal Responsabile dell'Area Produttiva aziendale essere di 22 €/ora se la Risorsa opera in sede e 35 €/ora se opera in trasferta presso il cliente che ha acquistato la macchina.

In [Capitolo 5, § 5.1.1](#) viene effettuato anche il calcolo della probabilità p_i , cioè la probabilità del verificarsi del difetto nella i -esima WS.

Capitolo 5. Risultati sperimentali del caso studio

5.1 L'indicatore di efficacia dell'ispezione

5.1.1 L'elaborazione dei dati sperimentali

Come illustrato in [Capitolo 3, § 3.5.1](#), l'indicatore di efficacia dell'ispezione per il processo di assemblaggio meccanico è dato dalla somma dello stesso indicatore valutato per ognuna delle i-esime WS secondo:

$$D = \sum_{i=1}^m (D_i) = \sum_{i=1}^m p_i * \beta_i \quad (21)$$

È evidente dunque una dipendenza dai parametri β_i e p_i . Ma, mentre il primo una volta stimato in valore dall'esperto aziendale ([Capitolo 4, § 4.3.2](#)) è una costante, il secondo è funzione del numero dei DPU_i , come riportato nella formulazione già citata in [Capitolo 3, §3.3](#)

$$p_i = 1 - \left(1 - \frac{DPU_i}{N_{a,i}}\right)^{N_{a,i}} \quad (16)$$

Dal momento che il numero dei DPU_i si può sia derivare da modello di letteratura (il così chiamato *Modello elettromeccanico*) secondo ([Capitolo 3, § 3.3](#)) la formula:

$$DPU_i = k_3 * Cf_{p,i}^{k_1} * Cf_{D,i}^{k_2} \quad (12)$$

(con k_1, k_2, k_3 valori medi riportati in [Tabella 4](#)) e $Cf_{p,i}$ e $Cf_{D,i}$ come risultato dell'elaborazione dei dati sperimentali contenuti in [Capitolo 4](#)) sia stimare sulla base di storico o con l'aiuto di un esperto come fatto in questo studio ([Capitolo 4, §4.3.2](#)), nei prossimi due paragrafi l'elaborazione dei dati sperimentali seguirà due diversi approcci.

Si riporta alla fine un confronto dei risultati ottenuti.

5.1.1.1 L'indicatore di efficacia dell'ispezione secondo il modello elettromeccanico

Per il calcolo dell'indicatore di efficacia dell'ispezione secondo il modello elettromeccanico, è necessario in primo luogo ottenere i valori di $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$.

Per quanto riguarda $Cf_{P,i}$, il cronometraggio dei tempi di assemblaggio del gruppo prestiro (Capitolo 4, § 4.3.1) e la sua formula permettono di ottenere i valori in Tabella 20 e Tabella A9.

Numero WS	$N_{a,i}$	TAT_i [s]	TAT_i [min]	$Cf_{P,i}$ [min]
2	6	438,00	7,30	7,07
6	12	742,00	12,37	11,90
23	6	815,33	13,59	13,36

Tabella 20 - Valori di TAT_i e $Cf_{P,i}$ per le tre WS di esempio in questo studio

In particolare, TAT_i è dato dalla somma dei tempi di esecuzione di tutte le operazioni elementari all'interno della i-esima WS (Tabella 13, Tabella A4), t_0 in Tabella 21 è il tempo minimo riscontrato per l'assemblaggio tra tutte le operazioni elementari di tutte le WS.

Nella stessa Tabella, sono riportati anche i valori minimi e massimi ottenuti per il $Cf_{P,i}$: il confronto di questi numeri con quelli riportati nei casi di letteratura e la loro corrispondenza in termini di ordine di grandezza costituisce un primo indice della applicabilità del modello elettromeccanico al caso studio.

t_0 [s]	2,33
t_0 [min]	0,04
$Cf_{P,i}$ minimo [min]	0,33
$Cf_{P,i}$ massimo [min]	13,36

Tabella 21 - Prospetto dei valori di t_0 e $Cf_{P,i}$ minimo e massimo

Per ottenere i valori del parametro $Cf_{D,i}$, come citato in [Capitolo 4, § 4.3.3.](#), occorre innanzitutto ricavare il valore dei pesi dei vari parametri w_q , nonché quantificare opportunamente A_{kqi} .

Per quanto riguarda w_q , calcolando la media geometrica della matrice di confronto a coppie compilata da ognuno degli intervistati, si ricava [Tabella 22](#).

Media geometrica											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1,00	1,32	1,96	0,78	0,60	2,59	5,58	2,72	2,93	1,53	2,38
P2	0,76	1,00	3,05	0,83	1,26	0,79	1,67	3,63	2,51	1,27	2,89
P3	0,51	0,33	1,00	1,26	3,04	1,26	3,80	2,12	5,10	4,93	7,41
P4	1,29	1,21	0,79	1,00	2,74	4,39	3,53	1,36	3,37	5,13	3,69
P5	1,66	0,79	0,33	0,53	1,00	1,47	1,02	1,10	3,45	5,44	0,97
P6	0,39	1,26	0,79	0,23	0,68	1,00	3,52	1,41	5,38	2,67	1,21
P7	0,18	0,60	0,26	0,28	0,98	0,28	1,00	1,28	1,76	1,31	3,69
P8	0,37	0,28	0,47	0,73	0,91	0,71	0,78	1,00	2,00	1,51	1,85
P9	0,34	0,40	0,20	0,30	0,29	0,19	0,57	0,50	1,00	1,51	1,24
P10	0,66	0,79	0,20	0,20	0,18	0,37	0,76	0,66	0,66	1,00	1,69
P11	0,42	0,35	0,13	0,27	1,03	0,82	0,27	0,54	0,81	0,59	1,00

Tabella 22 - Matrice di confronto a coppie riassuntiva delle opinioni di tutti i sei esperti del montaggio

Da Tabella 22, applicando la formula in basso, si ricavano i pesi w_q riportati in [Tabella 23](#). Nella stessa si riportano anche i valori di w_i provenienti da letteratura: gli ordini di grandezza paragonabili sono ancora una volta indice della concordanza tra il caso studio e il modello elettromeccanico.

$$w_q = \frac{(\prod_{k=1}^N a_{qk})^{\frac{1}{N}}}{\sum_{q=1}^N (\prod_{k=1}^N a_{qk})^{\frac{1}{N}}} \quad (13)$$

Numero parametro	w_q caso studio	w_q da letteratura
P1	0,139	0,199
P2	0,120	0,097
P3	0,150	0,083
P4	0,169	0,085
P5	0,094	0,029
P6	0,091	0,040
P7	0,056	0,028
P8	0,064	0,080
P9	0,037	0,072
P10	0,041	0,107
P11	0,038	0,181

Tabella 23 - Valori di w_q per il caso studio a confronto con i medesimi ricavati dalla letteratura di riferimento

Per A_{kqi} , effettuando una media matematica delle risposte di tutti gli intervistati, si ricavano i valori contenuti in Tabella 24.

Noti i due dati sopra, è possibile applicare la formula per il $Cf_{D,i}$ riportata in Capitolo 4, § 4.3.3 e ottenere quindi i seguenti valori per questo parametro (Tabella 25, Tabella A10).

Numero WS	$Cf_{D,i}$
2	4,38
6	5,69
23	5,59

Tabella 24 - Valori di $Cf_{D,i}$ per le tre WS principali di questo scritto

Infine, seguendo le formulazioni riportate in Capitolo 4, §4.4.1, è possibile calcolare i valori di DPU_i , p_i e D_i e, in conclusione, l'indicatore di efficacia dell'ispezione D (Tabella 26, Tabella A11).

Media matematica																																
Num. parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	P1	2	4	4	6	4	4	4	3	4	5	4	4	4	4	6	4	6	3	4	4	4	4	6	4	3	3	4	4	5	4	
	P2	4	4	4	7	4	7	6	4	4	3	4	5	4	5	5	5	5	4	4	5	5	4	6	5	3	3	3	5	4	5	
	P3	2	4	4	6	4	5	5	3	4	6	5	6	6	7	7	7	6	6	7	7	7	6	5	5	5	6	6	6	6	6	
	P4	1	5	5	4	3	5	4	3	3	3	2	4	4	5	6	5	6	5	5	6	6	5	5	4	5	6	5	5	5	6	
	P5	6	5	5	4	5	5	4	2	2	2	6	6	6	6	3	5	3	4	3	4	4	4	6	6	4	4	4	3	4	5	3
	P6	6	4	4	4	4	6	6	2	2	3	5	7	7	5	4	5	4	3	3	5	5	7	7	3	3	3	3	4	6	5	
	P7	2	4	6	5	6	6	5	3	4	3	3	5	5	4	6	4	6	3	4	6	6	5	6	4	5	5	4	5	5	5	
	P8	5	3	3	4	5	7	7	2	2	2	4	8	7	5	4	5	3	3	3	3	4	7	7	4	3	3	4	5	7	6	
	P9	1	6	6	7	6	8	6	3	5	1	6	5	5	6	3	5	3	3	3	4	4	4	5	4	3	3	3	3	5	3	
	P10	2	6	6	5	7	7	7	4	5	6	6	7	7	5	7	5	6	5	6	7	7	5	5	6	5	5	5	6	7	6	
	P11	1	6	6	6	7	7	7	5	6	5	5	6	5	5	6	4	6	4	3	5	6	5	5	6	5	5	5	5	6	7	

Tabella 25 - Tabella riassuntiva delle opinioni di tutti i sei esperti del montaggio per quanto riguarda le difficoltà introdotte nell'esecuzione della singola WS da ciascun parametro

Numero WS	$Cf_{P,i}$ [min]	$Cf_{D,i}$	DPU_i	$N_{a,i}$	p_i	D_i
2	7,07	4,38	0,32%	6	0,3%	2,6E-05
6	11,90	5,69	0,93%	12	0,9%	7,4E-05
23	13,36	5,59	1,04%	6	1,0%	7,3E-05

Tabella 26 - Tabella riassuntiva con tutti i valori di interesse per il calcolo dell'indice di efficacia dell'ispezione per le tre WS principali di questo scritto con l'utilizzo del modello elettromeccanico

5.1.1.2 L'indicatore di efficacia dell'ispezione secondo la stima dell'esperto dei DPU_i

Normalizzando i difetti per anno indicati dall'esperto aziendale sul numero di prestiri assemblati nel medesimo anno (come riportato in [Capitolo 4, §4.3.2](#)), è possibile calcolare il valore di DPU_i per il caso in studio seguendo l'approccio sperimentale.

Di conseguenza, si ottengono i valori di p_i , D_i ed infine l'indicatore di efficacia dell'ispezione D ([Tabella 27](#), [Tabella A12](#)).

Numero WS	DPU_i	$N_{a,i}$	p_i	D_i
2	3,64%	6	3,6%	2,9E-04
6	10,91%	12	10,4%	8,3E-04
23	3,64%	6	3,6%	2,5E-04

Tabella 27 - Tabella riassuntiva con i valori di interesse per il calcolo dell'indice di efficacia dell'ispezione per le tre WS principali di questo scritto secondo la stima dell'esperto aziendale

5.1.2 Commento ai risultati della sperimentazione

Come riportato all'inizio di questo Capitolo, seguendo la formula

$$DPU_i = k_3 * Cf_{P,i}^{k_1} * Cf_{D,i}^{k_2} \quad (12)$$

la relazione tra DPU_i , $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ dovrebbe dare adito a un modello a legge di potenza, secondo il modello di generazione dei difetti individuato da Su et al. (2010).

Mediante l'ausilio del software Minitab®, utilizzando i dati elaborati nei precedenti paragrafi, sono state ricavate le superfici 3D riportate nelle Figure nelle pagine successive.

Figura 42 mostra il tipo menzionato di relazione tra i dati sperimentali contenuti nei parametri $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ e il numero di DPU_i ricavati seguendo le indicazioni del modello elettromeccanico.

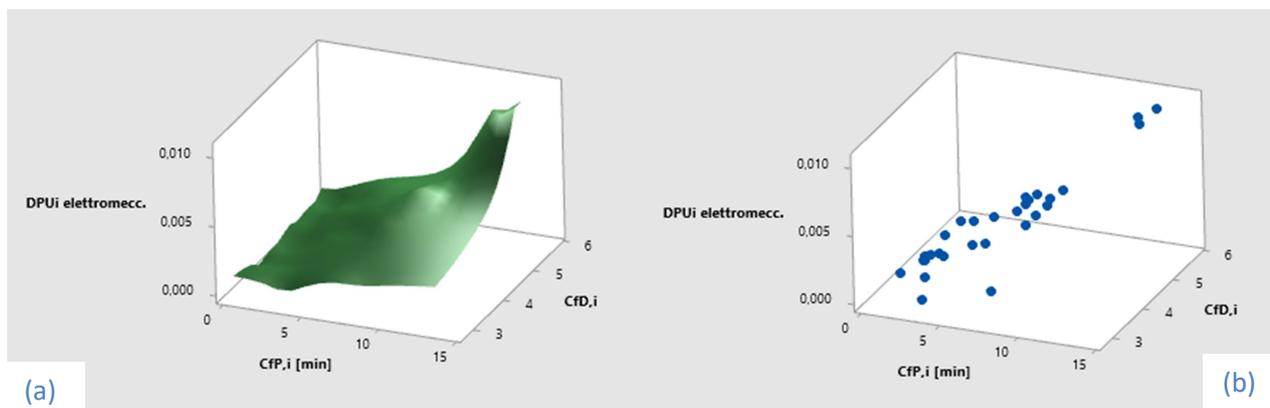


Figura 42 - Grafico 3D del modello a legge di potenza rappresentativo della relazione tra $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ e il numero di DPU_i ricavati dal modello elettromeccanico (a) con la superficie in evidenza e (b) per punti

Un grafico analogo si può ricavare per gli stessi $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ ma con i valori di DPU_i provenienti da indicazioni dell'esperto aziendale.

Figura 43 mostra una chiara tendenza verso l'andamento a legge di potenza desiderato, in cui si segnala tuttavia la presenza di due picchi (corrispondenti alla WS 1 e WS 11), indicati da frecce rosse.

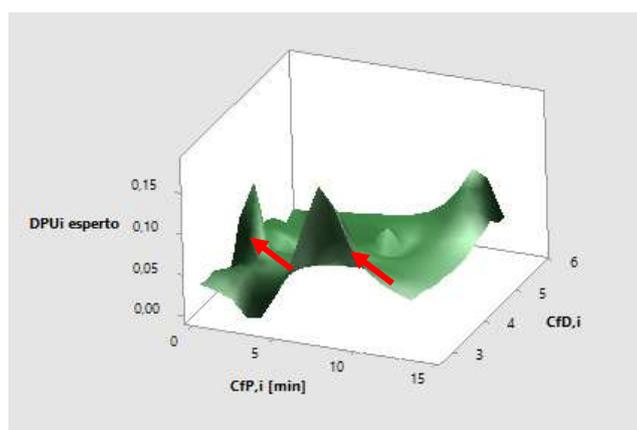


Figura 43 - Prima approssimazione di superficie risultante rappresentativa della relazione tra $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ e il numero di DPU_i fornito da esperto aziendale

La WS 1 e la WS 27 corrispondono rispettivamente alle fasi di assemblaggio descritte come *Disposizione componenti da cassone meccanico su tavolo di lavoro* e *Assemblaggio a banco leva di sgancio mandrino*, i dati corrispondenti risultano anomali. Nel caso della prima WS, essa è più una fase di preparazione al processo di assemblaggio anziché una vera e propria WS, mentre nel caso della seconda WS citata precedentemente, l'elevata difettosità segnalata dall'esperto aziendale è principalmente dovuta alla definizione dei *job elements*.

Eliminando i due picchi delle WS sopracitate, si ottiene [Figura 44](#).

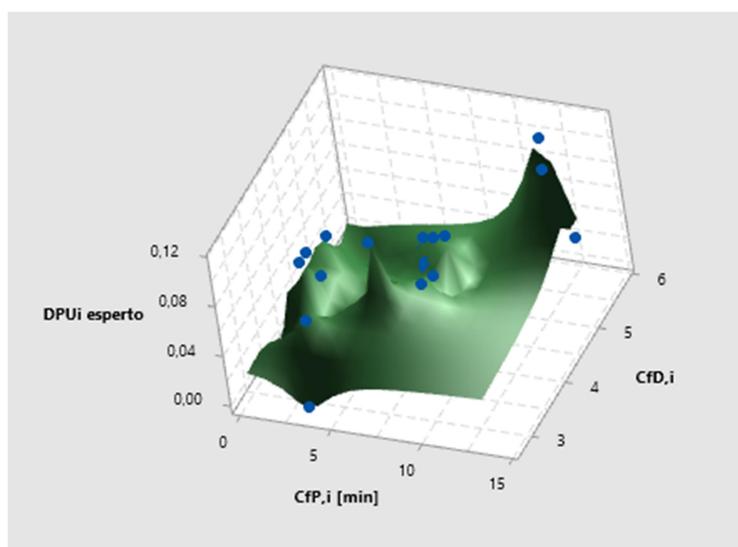


Figura 44 - Seconda approssimazione di superficie risultante rappresentativa della relazione tra $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ e il numero di DPU_i fornito da esperto aziendale, conseguente all'eliminazione dei dati riguardanti la WS 1 e la WS 27

La WS 11 è denominata *Preparazione piastra telaio prestiro per assemblaggio gruppo prestiro*. Da un lato, la piastra telaio del gruppo prestiro presenta volutamente, da progetto meccanico, imprecisioni dovute a necessità di ottimizzazione i costi di fornitura. La difettosità elevata segnalata dall'esperto aziendale per questa WS è dunque dovuta principalmente al conseguente aggiustaggio in fase di montaggio portato avanti dalla Risorsa addetta.

Eliminando quindi anche il picco di difettosità dovuto a questa ultima WS, si ottiene il grafico in [Figura 45](#) che mostra un andamento a legge di potenza, confermando così la bontà del modello di Su et al. (2010) anche quando applicato a una produzione non di serie e in buona parte customizzata.

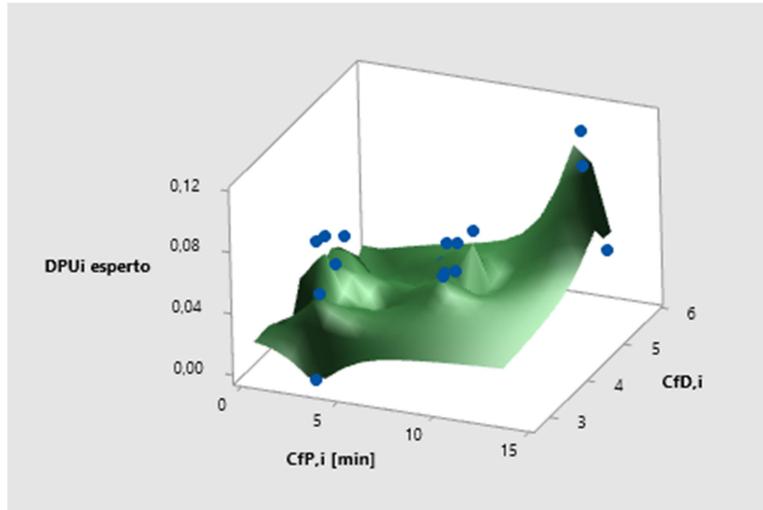


Figura 45 - Terza ed ultima approssimazione di superficie risultante rappresentativa della relazione tra $Cf_{P,i}$ e $Cf_{D,i}$ e il numero di DPU_i forniti da esperto aziendale, conseguente all'eliminazione dei dati riguardanti la WS 11

Infine, in Tabella 28 sono riportati i valori totali dell'indicatore dell'efficacia dell'ispezione, derivanti dal contributo di tutte le trenta WS, riportati in Tabella A11 e Tabella A12 secondo i due approcci in studio.

	Secondo modello elettromeccanico	Secondo la stima dell'esperto dei DPU_i
$D = \sum_{i=1}^m D_i$	5,0E-04	9,1E-03

Tabella 28 - Tabella riassuntiva con i valori dell'indicatore dell'efficacia dell'ispezione D risultante per le trenta WS del caso studio secondo i due approcci seguiti in questa Tesi

I dati sperimentali finali illustrati nella Tabella in alto sono stati riportati all'esperto aziendale interpellato nel corso di questo lavoro, che, in funzione della sua esperienza professionale e conoscenza del sistema produttivo nella sua interezza, ha confermato la correttezza del risultato raggiunto nonostante tra i due valori ci sia circa un ordine di grandezza di differenza.

5.2 L'indicatore del costo di ispezione

5.2.1 L'elaborazione dei dati sperimentali

Come indicato in [Capitolo 3, § 3.5.1](#), l'indicatore del costo dell'ispezione per il processo di assemblaggio meccanico è dato dalla somma dello stesso indicatore valutato per ognuna delle i-esime WS secondo

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^m C_{tot,i} = \sum_{i=1}^m [c_i + NRC_i * p_i * (1 - \beta_i) + URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i + NDC_i * p_i * \beta_i] \quad (23)$$

Tutti i parametri da cui dipende questo indicatore sono costanti una volta stimati o calcolati, ipotizzate valide le medesime considerazioni già fatte in [Capitolo 5, § 5.1](#), dall'elaborazione dei dati risulteranno due valori diversi del costo dell'ispezione che possono essere tra loro confrontati.

I valori risultanti di c_i , NRC_i , URC_i e NDC_i sono riportati in [Tabella 29](#) e [Tabella A13](#).

Numero WS	c_i [€]	NRC_i [€]	URC_i [€]	NDC_i [€]
2	0,12	0,37	0,37	1584
6	0,56	2,02	2,02	483
23	0,91	0,29	0,29	11,67

Tabella 29 - Valori di c_i , NRC_i , URC_i e NDC_i per le WS di interesse

[Tabella 30](#) e [Tabella A14](#) riassumono i valori calcolati componenti l'indicatore del costo dell'ispezione, nonché il costo dell'ispezione per la singola WS e al fondo il costo totale, con p_i derivante da DPU_i ottenuti con modello elettromeccanico.

Numero WS	c_i [€]	$NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$ [€]	$URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$ [€]	$NDC_i * p_i * \beta_i$ [€]	$C_{tot,i}$ [€]
2	0,12	0,0012	0,00183	0,0411	0,1663
6	0,56	0,0185	0,00799	0,0357	0,6243
23	0,91	0,0030	0,00145	0,0008	0,9159

Tabella 30 - Valori componenti l'indicatore del costo dell'ispezione e costo dell'ispezione per la singola WS con p_i derivante da DPU_i ottenuti con modello elettromeccanico

Tabella 31 ed Tabella A15 riportano gli stessi valori della Tabella e dell'Appendice precedente ricavati però con i valori forniti dall'esperto aziendale.

Numero WS	c_i [€]	$NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$ [€]	$URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$ [€]	$NDC_i * p_i * \beta_i$ [€]	$C_{tot,i}$ [€]
2	0,12	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
6	0,56	0,00183	0,00183	0,00183	0,00183
23	0,91	0,0104	0,0014	0,0029	0,9253

Tabella 31 - Valori componenti l'indicatore del costo dell'ispezione e costo dell'ispezione per la singola WS con p_i derivante da DPU_i ottenuti con l'approccio sperimentale

5.2.2 Commento ai risultati della sperimentazione

In Tabella 32 sono riportati i valori totali delle componenti dell'indicatore del costo dell'ispezione, dettagliati in Tabella A14 e Tabella A15, derivanti dal contributo di tutte le trenta WS.

		Secondo modello elettromeccanico	Secondo la stima dell'esperto dei DPU_i
Costo solo lavoro Risorsa montaggio meccanico [€]		56,66	
Contributi al costo dell'ispezione	$\sum_{i=1}^m c_i$ [€]	8,86	
	$\sum_{i=1}^m NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$ [€]	0,0486	0,8608
	$\sum_{i=1}^m URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$ [€]	0,00732	0,0560
	$\sum_{i=1}^m NDC_i * p_i * \beta_i$ [€]	0,1527	1,6543
	C_{tot} [€]	9,1227	11,4322

Tabella 32 - Tabella comparativa dei valori componenti l'indicatore del costo dell'ispezione e costo dell'ispezione di tutte le trenta WS del caso studio secondo i due approcci seguiti in questo scritto

Tra le componenti di C_{tot} , quella preponderante è c_i , il costo della singola attività di ispezione svolta dalla Risorsa in corso d'opera che è comune ad entrambi i modelli applicati in questo scritto non essendo legati ad alcuna probabilità.

Per NRC_i (costo di riparazione necessario della i -esima WS), URC_i (costo di riparazione conseguente a un falso positivo) ed NDC_i (costo di riparazione conseguente a un falso negativo), tra il risultato dato dal modello elettromeccanico e il risultato ottenuto con l'aiuto dell'esperto aziendale la differenza nelle cifre è in ogni caso di un ordine di grandezza.

Questo in ultima analisi è dovuto alla differenza nel valore della probabilità p_i (la probabilità del verificarsi del difetto nella i -esima WS) risultante dai due approcci utilizzati, dal momento che α_i (probabilità del verificarsi di falso positivo) e β_i (probabilità del verificarsi di un falso negativo) sono gli stessi.

In ogni modo, anche per questo risultato, come per quelli ottenuti in [Capitolo 5, §5.1.2](#), l'esperto aziendale consultato in merito ha ritenuto attendibile il valore di C_{tot} ottenuto.

E' utile sottolineare che, per dare un quadro complessivo dei costi, occorre aggiungere al valore di C_{tot} di [Tabella 32](#), circa 3000 euro, in cui rientrano altri costi di produzione del gruppo prestiro oggetto del presente lavoro di Tesi, primi tra tutti, quelli del materiale e del tempo non produttivo della Risorsa incaricata del montaggio (il così chiamato *tempo a non valore*).

Infine, da una semplice proporzione, risulta che il C_{tot} rappresenta, secondo entrambi i modelli, circa il 2% del costo totale del gruppo prestiro. Si tratta di una percentuale di costo più che accettabile a livello aziendale: l'esperto ritiene infatti che, vista la natura dell'assieme elettromeccanico oggetto dello studio, tale percentuale non debba superare il 5%.

Capitolo 6. Conclusioni

Diversi studi hanno dimostrato che gli errori degli operatori hanno un'influenza significativa sulle prestazioni dei processi di assemblaggio.

Nella presente Tesi si è utilizzato un modello innovativo derivante dal lavoro di diversi gruppi di ricerca (Hinckley, 1993, Shibata, 2002, Su et al., 2010) per prevedere il tasso di difettosità indotto dall'operatore, in cui la principale novità consiste nel collegamento stabilito tra la complessità del prodotto da assemblare e la probabilità di generare difetti. Inoltre, si è ricavato il costo totale dell'ispezione utilizzando una formulazione contenente al suo interno alcune delle componenti del modello precedentemente menzionato.

La metodologia proposta dalla letteratura è stata applicata al processo di produzione del gruppo prestiro, un assieme elettromeccanico facente parte di una macchina avvolgitrice ad anello rotante, da un lato per verificare l'applicabilità della stessa a produzioni costituite da piccoli lotti di prodotto e dall'altro per supportare la bontà delle attuali misure di ispezione previste a livello aziendale per il medesimo assieme.

Esaminando i valori riportati in [Tabella 28](#), si nota che tra il risultato fornito dal modello elettromeccanico per l'indicatore di efficacia dell'ispezione D e il medesimo ricavato sulla base dei dati forniti dall'esperto aziendale, la differenza è di un ordine di grandezza. Questo risultato non sorprende in quanto il modello elettromeccanico trae la sua origine dalla produzione di stampanti e *compact disk* (Shibata, 2002, Su et al., 2010), mentre il presente studio si focalizza su un sottogruppo di una macchina avvolgitrice quindi su un prodotto che è sempre di natura elettromeccanica ma con caratteristiche costruttive e di processo differenti. In particolare, in merito a queste ultime, per il gruppo prestiro si tratta di una produzione customizzata sulle necessità del cliente (produzione di piccoli lotti) con un volume che è di poche decine di pezzi all'anno.

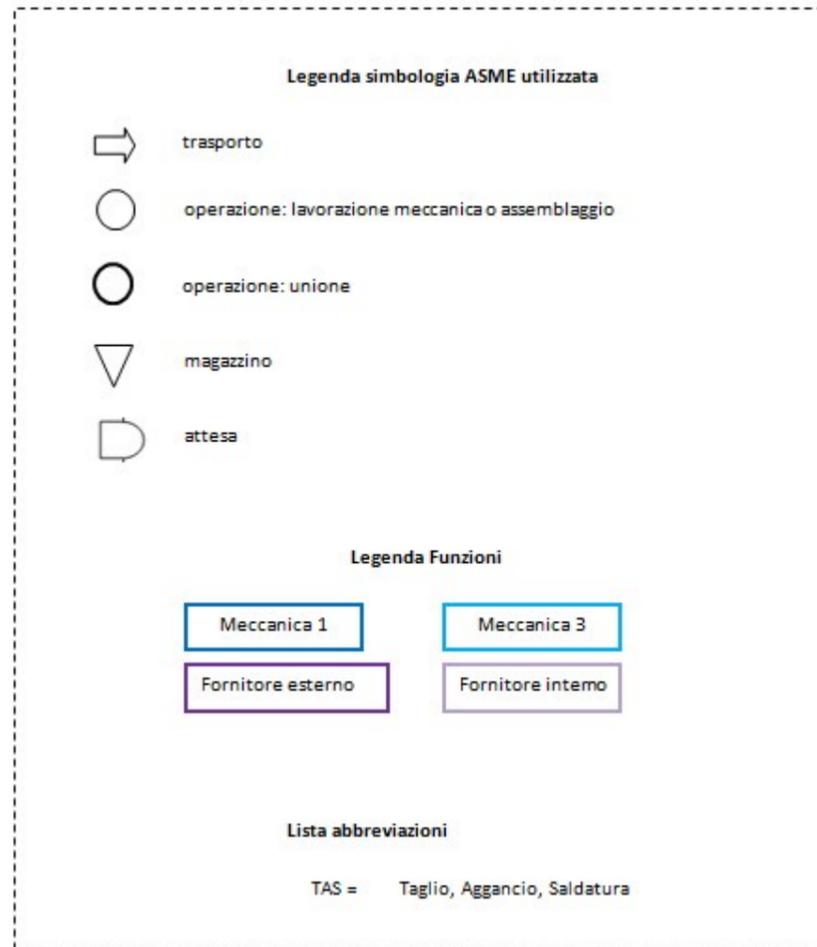
In ogni caso, occorre tener presente che il modello elettromeccanico fornisce un risultato in condizioni ideali. Come constatato con l'ausilio dell'esperto aziendale, premesso che tutti i progetti e i processi sono migliorabili, un tasso di difettosità riscontrato pari a $9 * 10^{-3}$ a livello aziendale risulta più che soddisfacente anche in virtù della funzione che l'assieme oggetto della presente Tesi assolve quando montato e messo in servizio su una macchina avvolgitrice ad anello rotante.

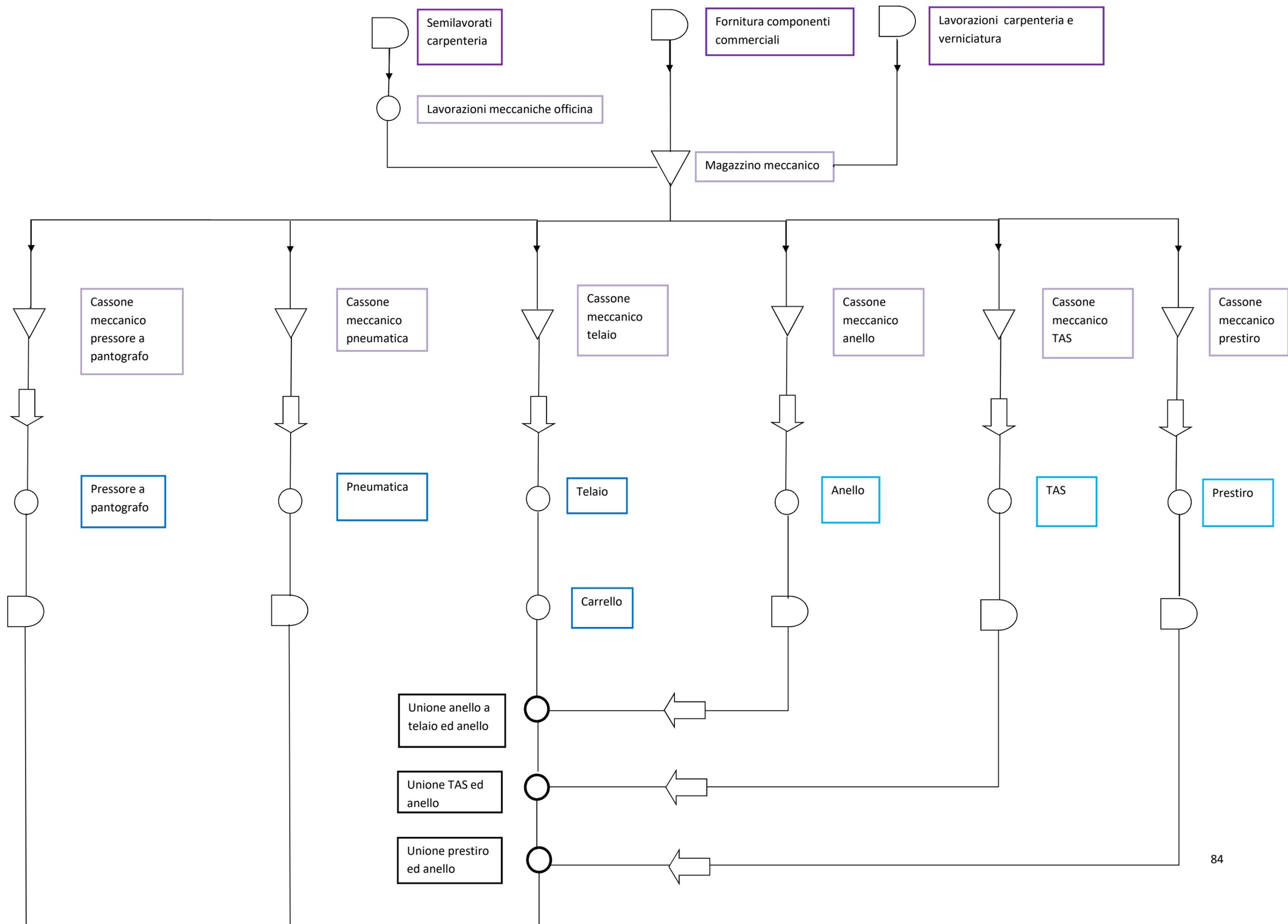
Per avere una informazione completa dal punto di vista della Qualità, l'indicatore dell'efficacia dell'ispezione visto sopra deve essere esaminato congiuntamente all'indicatore del costo totale dell'ispezione.

Infine, si sottolinea la possibilità di utilizzo diagnostico del modello di previsione del tasso di difettosità, un utilizzo non previsto dalla letteratura consultata per questa Tesi, ma risultante dalla pratica sperimentale. Basandosi sulla [Figura 43](#) che presenta alcuni valori anomali di DPU_i , l'esperto aziendale ha approfondito il motivo dell'elevato numero di difetti riscontrato nelle WS corrispondenti. Di seguito, quindi, il colloquio diretto con gli operatori del montaggio interessati ha permesso di individuare e gestire le relative fonti di difettosità.

Appendice

Figura A1





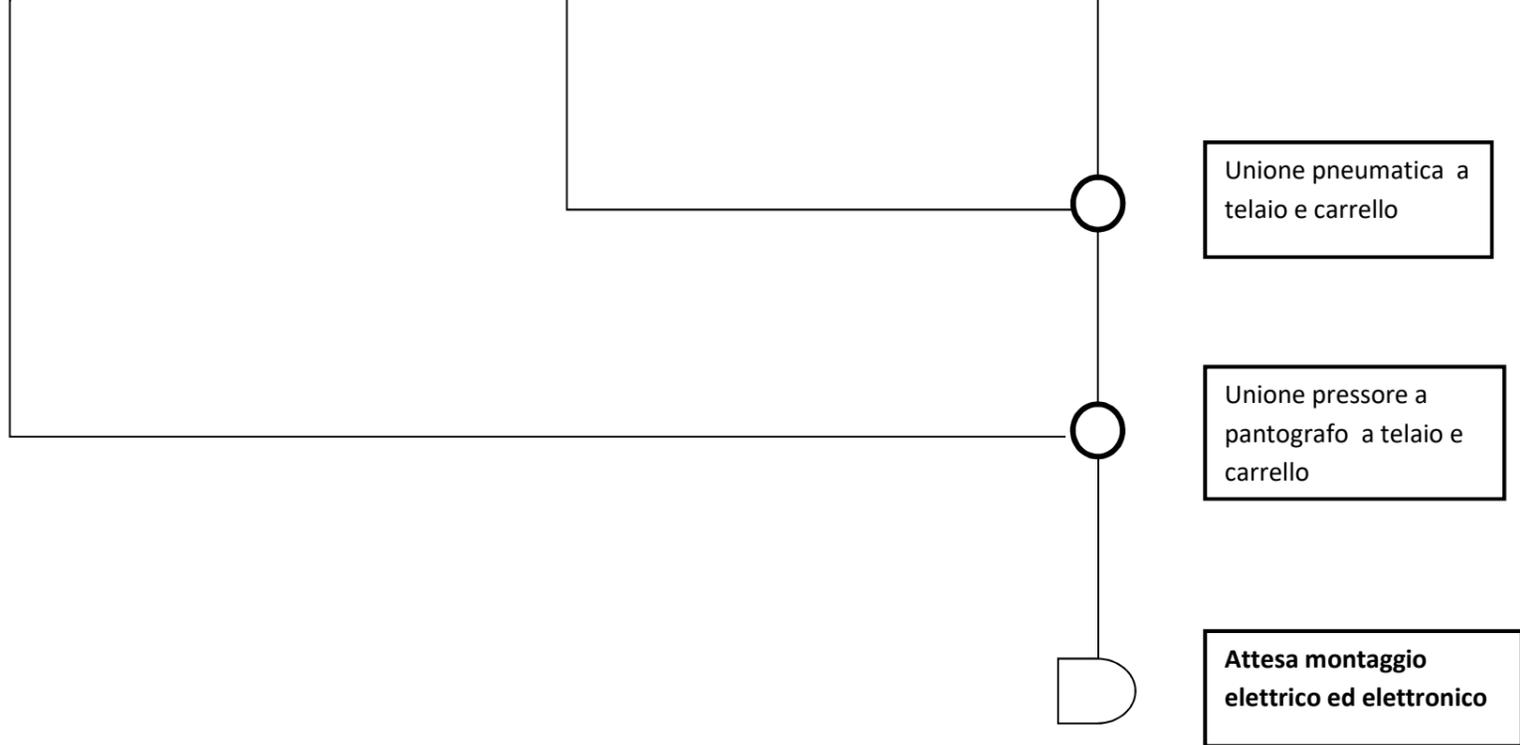
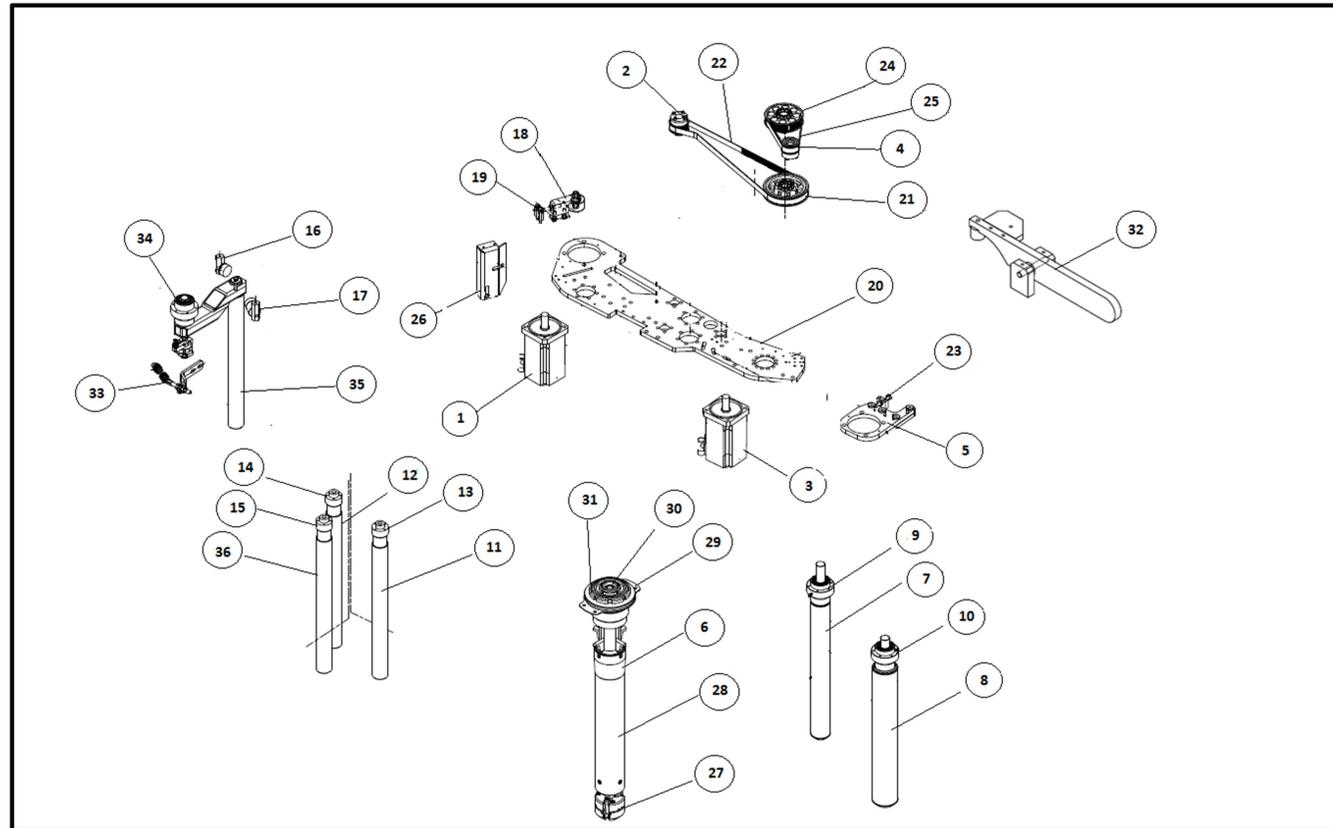
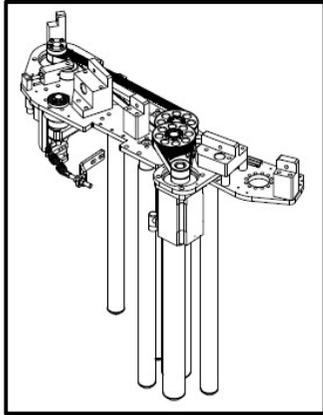
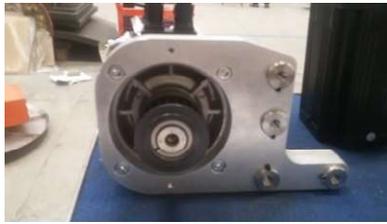


Tabella A2



Numero WS	Rif. disegno	Descrizione WS	Descrizione <i>job elements</i>	Qtà.	Attrezzi e macchinari utilizzati	Documentazione fotografica
1	-	Disposizione componenti da cassone meccanico su tavolo di lavoro	Disposizione rulli su banco di lavoro	5	Mano	
			Disposizione cuscinetti su banco di lavoro	12	Mano	
			Disposizione altri componenti su banco di lavoro	-	Mano	
2	1	Assemblaggio a banco gruppo motore 1	Pulizia albero motore 1	1	Mano	
			Inserimento distanziale albero motore 1	1	Mano	
			Inserimento forzato puleggia albero motore 1 e anello calettatore albero motore 1	1	Mano	
	2		Preserraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Chiave Morsa da banco	
			Serraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Chiave dinamometrica Morsa da banco	
			Sostituzione anelli golfari con viti motore 1	2	Mano Chiave	
			Serraggio viti anello calettatore puleggia motore 1	4	Mano Chiave	

3	3	Assemblaggio a banco gruppo motore 2	Pulizia albero motore 2	1	Mano	
			Inserimento distanziale albero motore 2	1	Mano	
			Inserimento forzato puleggia albero motore 2 e anello calettatore albero motore 2	1	Mano	
	4		Preserraggio viti anello calettatore puleggia motore 2	4	Chiave Morsa da banco	
			Serraggio viti anello calettatore puleggia motore 2	-	Chiave dinamometrica Morsa da banco	
			Sostituzione anelli golfari con viti motore 2	2	Mano Chiave	
4	5	Assemblaggio a banco piastra supporto motore 2	Pulizia superficie piastra supporto motore 2	-	Mano	
			Inserimento boccole in assieme piastra supporto motore 2 e staffa di appoggio piastra supporto motore 2	4	Pressa idraulica	
			Inserimento spine elastiche in boccole assieme piastra supporto motore 2 e staffa di appoggio piastra supporto motore 2	4	Martello gommato	

5	6	Assemblaggio a banco mandrino	Spacchettamento incarto mandrino	-	Mano Piccoli utensili da taglio	
			Inserimento molla in sede mandrino	1	Mano	
			Serraggio bullone di tenuta della molla in sede mandrino	-	Chiave	
6	7	Assemblaggio a banco rulli gommati	Pulizia albero rullo gommato 1	-	Mano	
	8		Pulizia albero rullo gommato 2	-	Mano	
			Inserimento ingrassatore su manicotto flangiato rullo gommato 1	-	Chiave	
			Inserimento ingrassatore su manicotto flangiato rullo gommato 2	-	Chiave	
			Ingrasso cuscinetti manicotto flangiato rullo gommato 1	2	Mano	
			Ingrasso cuscinetti manicotto flangiato rullo gommato 2	2	Mano	
			Ingrasso albero rullo gommato 1	-	Mano	
			Ingrasso albero rullo gommato 2	-	Mano	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede mozzo rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede mozzo rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
	9		Inserimento mozzo su albero rullo gommato 1	-	Pressa idraulica	
	10		Inserimento mozzo su albero	-	Pressa	

			rullo gommato 2		idraulica	
7	11	Assemblaggio a banco rulli folli	Pulizia albero rullo folle 1	-	Mano	-
	12		Pulizia albero rullo folle 2	-	Mano	
	36		Pulizia albero rullo folle 3	-	Mano	
			Ingrasso albero rullo folle 1	-	Mano	
			Ingrasso albero rullo folle 2	-	Mano	
			Ingrasso albero rullo folle 3	-	Mano	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede manicotto flangiato rullo folle 1	-	Pressa idraulica	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede manicotto flangiato rullo folle 2	-	Pressa idraulica	
			Inserimento cuscinetti e anello distanziale in sede manicotto flangiato rullo folle 3	-	Pressa idraulica	
	13		Inserimento manicotto flangiato su albero rullo folle 1	-	Pressa idraulica	
	14		Inserimento manicotto flangiato su albero rullo folle 2	-	Pressa idraulica	
15	Inserimento manicotto flangiato su albero rullo folle 3	-	Pressa idraulica			
8		Assemblaggio a banco tamponi gommati	Accorciamento parte in gomma tampone gommato 1	1	Molatrice da banco	
	16		Inserimento tampone gommato 1 in supporto esagonale tempone gommato 1	-	Chiave	
	17		Inserimento tampone gommato 2 in supporto esagonale tempone gommato 2	-	Chiave	

9	18	Assemblaggio a banco dispositivo tendicinghia	Inserimento rullino dispositivo tendicinghia in staffa rullino dispositivo tendicinghia	-	Mano Martello gommato	
			Inserimento staffa e tirante dispositivo rullino tendicinghia	-	Mano Chiave	
	19		Inserimento viti in staffetta dispositivo tendicinghia	2	Mano Chiave	
10		Assemblaggio a banco ruote condotte sistema di trasmissione	Introduzione anelli calettatori e distanziali in ruote condotte trasmissione	2	Martello gommato	
			Verniciatura con protettivo ruote condotte trasmissioni	-	Mano	
11	20	Preparazione piastra telaio prestiro per assemblaggio gruppo prestiro	Ripresa fori piastra telaio	8	Molatrice manuale	
			Seppiatura superficie piastra telaio	-	Seppiatrice manuale	
			Appoggio piastra telaio in posizione di lavoro su rastrelliera	-	Mano	
12		Montaggio rulli gommati su piastra telaio prestiro	Serraggio viti tenuta rullo gommato 1 su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
			Serraggio viti tenuta rullo gommato 2 su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
			Spacchettamento rullo gommato 1	-	Mano	
			Spacchettamento rullo gommato 2	-	Mano	

13		Montaggio rulli folli su piastra telaio prestiro	Serraggio viti tenuta rullo folle 1 su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
			Serraggio viti tenuta rullo folle 2 su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
			Serraggio viti tenuta rullo folle 3 su piastra telaio prestiro	12	Chiave dinamometrica	
			Spacchettamento rullo folle 1	-	Mano	
			Spacchettamento rullo folle 2	-	Mano	
			Spacchettamento rullo folle 3	-	Mano	
14		Montaggio motore 1 su piastra telaio	Serraggio bulloni tenuta motore 1 su piastra telaio	4	Chiave	-
15	21	Montaggio sistema trasmissione motore 1	Appoggio ruota condotta motore 1	1	Mano	
	22		Appoggio cinghia trasmissione motore 1	1	Mano	
16	23	Montaggio motore 2 su piastra telaio	Serraggio bulloni tenuta motore 2 su piastra supporto motore 2	4	Chiave	
			Serraggio bulloni tenuta piastra supporto motore 2 su telaio	4	Chiave	
			Inserimento tirante e bulloni in staffa tirante piastra supporto motore 2	-	Mano	
			Serraggio staffa tirante piastra supporto motore 2 in sede telaio prestiro	2	Chiave	

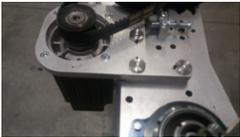
17	24	Montaggio sistema trasmissione motore 2	Appoggio ruota condotta motore 2	1	Mano	
	25		Appoggio cinghia trasmissione motore 2	1	Mano	
18	26	Montaggio staffa motore 1 su piastra telaio prestiro	Serraggio bulloni tenuta staffa motore 1 su piastra telaio	2	Chiave	-
19		Montaggio tendicinghia su piastra telaio prestiro	Serraggio bulloni tenuta tendighinghia su piastra telaio	2	Mano	
			Serraggio bulloni tenuta staffa tendighinghia su piastra telaio	2	Chiave	
20		Taratura sistema di trasmissione motore 1	Regolazione tensione cinghia trasmissione motore 1	-	Mano Martello gommato Blocchetto di riferimento	-
			Serraggio viti anello calettatore ruota condotta motore 1	10	Chiave dinamometrica	
21		Taratura sistema di trasmissione motore 2	Regolazione tensione cinghia trasmissione motore 2	-	Mano Martello gommato Blocchetto di riferimento	-
			Serraggio viti anello calettatore ruota condotta motore 2	10	Chiave dinamometrica	

Tabella A3

Numero WS	Tipo controllo per WS	Strumento di controllo per WS	Descrizione controllo WS	Attrezzi controllo WS
1	ii	VIS	Conteggio componenti presenti per il montaggio e confronto con distinta cassone meccanico	Mano
2	ii	VIS	Controllo pulizia effettiva albero motore 1	Mano
		MAN	Controllo allineamento assieme puleggia albero motore 1 e anello calettatore albero motore 1	
3	i	VIS	Controllo pulizia effettiva albero motore 2	Mano
		MAN		Calibro
		VIS	Conteggio componenti presenti per il montaggio e confronto con distinta cassone meccanico	Mano
		GEOM	Controllo correttezza dimensioni assieme anello calettatore albero motore 2 e puleggia albero motore 2	Morsa da banco
4	ii	VIS	Controllo pulizia superficie piastra supporto motore 2	Mano
		MAN	Controllo correttezza assemblaggio piastra superiore ed inferiore	Mano
5	i	VIS	Controllo presenza di tutti i componenti previsti per il sottoinsieme mandrino	Mano
		MAN		
		MECC	Controllo funzionamento molla mandrino	
6	i	VIS	Controllo pulizia albero rulli gommati	Mano
		MAN		
		MECC	Controllo corretta rotazione assieme rulli gommati	Mano
7	i	VIS	Controllo pulizia albero rulli folli	Mano
		MAN		
		MECC	Controllo corretta rotazione assieme rulli folli	Mano

8	ii	VIS	Controllo corretto posizionamento assieme tampone gommato 1 e supporto esagonale tampone gommato 1	Mano
		GEOM	Controllo corretto posizionamento assieme tampone gommato 2 e supporto esagonale tampone gommato 2	Mano
9	ii	VIS	Controllo allineamento assieme dispositivo tendicinghia	Mano
		MECC	Controllo funzionamento corretta rotazione rullino dispositivo tendicinghia	Mano
10	ii	VIS	Controllo penetrazione protettivo su superficie ruote condotte	Mano
		MECC	Controllo corretto posizionamento anelli calettatori in ruote condotte trasmissione	Mano
11	ii	VIS	Controllo aspetto estetico superficie piastra telaio prestiro	Mano
12	ii	MECC	Controllo corretta rotazione rulli gommati	Mano
		GEOM	Controllo allineamento rulli gommati su piastra telaio prestiro	Mano
13	ii	MECC	Controllo corretta rotazione rulli folli	Mano
		GEOM	Controllo allineamento rulli folli su piastra telaio prestiro	Mano
14	ii	MECC	Controllo corretto serraggio bulloni motore 1 su piastra telaio	Mano
15	ii	VIS	Controllo corretto posizionamento componenti in sede	Mano
16	ii	VIS	Controllo allineamento assieme staffa tirante piastra supporto motore 2 e piastra supporto motore 2 in sede telaio prestiro	Mano
		MECC	Controllo corretto serraggio bulloni motore 2 su piastra telaio	Mano

17	ii	VIS	Controllo corretto posizionamento componenti in sede	Mano
18	ii	VIS	Controllo corretto posizionamento carter motore 1	Mano
19	ii	GEOM	Controllo corretto allineamento assieme tendicinghia	Mano
		MECC	Controllo corretta rotazione rullino dispositivo tendicinghia	Mano
21	i	MECC	Controllo movimentazione cinghia trasmissione motore 1	Mano
		GEOM		
22	i	MECC	Controllo movimentazione cinghia trasmissione motore 2	Mano
		GEOM		
23	i	MECC	Controllo corretta rotazione mandrino su piastra telaio prestiro	Mano
		GEOM	Controllo allineamento assieme mandrino su piastra telaio prestiro	Mano
24	ii	GEOM	Controllo corretto allineamento tamponi su piastra telaio prestiro	Mano
25	i	MECC	Controllo funzionamento motore 1	Mano
		MAN	Controllo finale tiro cinghia trasmissione motore 1	Mano
			Controllo finale allineamento assieme trasmissione motore 1	Mano
26	i	MECC	Controllo funzionamento motore 2	Mano
		MAN	Controllo finale tiro cinghia trasmissione motore 2	Mano
			Controllo finale allineamento assieme trasmissione motore 2	Mano

27	ii	VIS	Controllo corretto allineamento assieme leva di sgancio mandrino	Mano
		MECC	Controllo corretta movimentazione leva di sgancio mandrino	Mano
28	i	MECC	Controllo corretta movimentazione leva di sgancio mandrino su piastra telaio prestiro	Mano
		GEOM	Controllo allineamento assieme leva di sgancio mandrino su piastra telaio prestiro	
29	ii	VIS	Controllo corretta rotazione rullo braccetto di compensazione	Mano
		GEOM	Controllo allineamento sistema camme	Calibro
		MECC		Riga metallica
				Blocchetto di riferimento
30	i	VIS	Controllo corretta movimentazione assieme braccetto di compensazione su piastra telaio prestiro	Mano
		MECC	Controllo corretto funzionamento rotazione rullo braccetto di compensazione	Mano

Tabella A4

Numero WS	Numero job elements	Tempo esecuzione operazione elementare 1 [s]	Tempo esecuzione operazione elementare 2 [s]	Tempo esecuzione operazione elementare 3 [s]	Tempo medio esecuzione operazione elementare [s]	Deviazione standard	Deviazione standard relativa
7	1	30	15	41	28,7	13,1	46%
	2	42	39	31	37,3	5,7	15%
	3	27	31	35	31,0	4,0	13%
	4	7	5	10	7,3	2,5	34%
	5	8	7	9	8,0	1,0	13%
	6	12	9	7	9,3	2,5	27%
	7	65	62	63	63,3	1,5	2%
	8	55	61	60	58,7	3,2	5%
	9	57	51	52	53,3	3,2	6%
	10	67	70	72	69,7	2,5	4%
	11	64	71	69	68,0	3,6	5%
	12	58	55	52	55,0	3,0	5%
8	1	95	65	83	81,0	15,1	19%
	2	60	44	59	54,3	9,0	16%
	3	66	102	82	83,3	18,0	22%
9	1	72	57	87	72,0	15,0	21%
	2	40	41	60	47,0	11,3	24%
	3	31	29	27	29,0	2,0	7%
10	1	13	10	16	13,0	3,0	23%
	2	10	15	9	11,3	3,2	28%
11	1	96	144	157	132,3	32,1	24%
	2	71	104	83	86,0	16,7	19%
	3	87	70	81	79,3	8,6	11%
12	1	198	289	176	221,0	59,9	27%
	2	79	98	97	91,3	10,7	12%
	3	4	2	6	4,0	2,0	50%
	4	3	5	4	4,0	1,0	25%

13	1	93	115	106	104,7	11,1	11%
	2	110	108	139	119,0	17,3	15%
	3	103	127	143	124,3	20,1	16%
	4	5	3	4	4,0	1,0	25%
	5	2	3	2	2,3	0,6	25%
	6	3	2	5	3,3	1,5	46%
14	1	237	229	200	222,0	19,5	9%
15	1	28	25	23	25,3	2,5	10%
	2	37	29	33	33,0	4,0	12%
16	1	220	232	225	225,7	6,0	3%
	2	83	92	89	88,0	4,6	5%
	3	38	46	41	41,7	4,0	10%
17	1	29	24	26	26,3	2,5	10%
	2	25	30	27	27,3	2,5	9%
18	1	61	50	65	58,7	7,8	13%
19	1	58	40	61	53,0	11,4	21%
	2	56	57	55	56,0	1,0	2%
20	1	125	75	105	101,7	25,2	25%
	2	250	246	242	246,0	4,0	2%
21	1	153	141	130	141,3	11,5	8%
	2	236	241	238	238,3	2,5	1%
22	1	108	124	101	111,0	11,8	11%
	2	18	29	24	23,7	5,5	23%
23	1	122	173	143	146,0	25,6	18%
	2	244	237	221	234,0	11,8	5%
	3	86	121	78	95,0	22,9	24%
	4	135	134	101	123,3	19,3	16%
	5	73	99	85	85,7	13,0	15%
	6	145	126	123	131,3	11,9	9%
24	1	85	64	74	74,3	10,5	14%
	2	60	73	69	67,3	6,7	10%
25	1	70	66	71	69,0	2,6	4%
26	1	76	73	67	72,0	4,6	6%
27	1	74	69	71	71,3	2,5	4%
28	1	309	304	301	304,7	4,0	1%
	2	85	100	103	96,0	9,6	10%
	3	87	70	81	79,3	8,6	11%

29	1	136	164	149	149,7	14,0	9%
	2	14	26	30	23,3	8,3	36%
	3	5	4	5	4,7	0,6	12%
	4	200	208	193	200,3	7,5	4%
	5	19	25	37	27,0	9,2	34%
	6	34	44	49	42,3	7,6	18%
	7	123	68	82	91,0	28,6	31%
	8	166	142	157	155,0	12,1	8%
	9	51	69	64	61,3	9,3	15%
30	1	203	197	209	203,0	6,0	3%
	2	79	50	56	61,7	15,3	25%
	3	77	46	83	68,7	19,9	29%

Tabella A5

Numero WS	Numero difetti per anno (dato 2018)
1	10
2	2
3	2
4	1
5	0
6	6
7	3
8	0
9	2
10	0
11	4
12	1
13	1
14	0
15	0
16	1
17	2
18	0
19	2
20	2
21	2
22	0
23	2
24	0
25	3
26	3
27	10
28	0
29	5
30	0

Tabella A6

Responsabile Area Tecnica																																
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	P1	2	4	5	6	3	4	3	1	4	1	3	4	4	4	7	3	7	2	2	2	2	2	4	3	1	1	4	5	5	4	
	P2	3	4	4	4	5	7	4	4	3	4	6	5	4	5	4	5	5	3	4	4	4	5	6	3	4	4	3	4	6	5	
	P3	3	5	5	4	3	6	6	3	6	8	7	9	9	9	9	9	9	8	9	10	10	8	8	6	7	7	6	7	9	8	
	P4	3	5	5	6	4	5	5	4	4	3	2	4	4	5	6	5	6	5	4	6	6	5	6	7	6	6	4	5	5	5	
	P5	9	8	8	5	8	5	4	3	3	4	3	6	7	5	4	5	4	6	4	4	4	7	5	4	3	3	3	4	7	3	
	P6	9	3	3	2	4	9	9	2	3	4	3	6	6	5	5	5	5	4	4	6	4	6	6	4	3	3	4	4	9	6	
	P7	2	3	7	4	6	4	4	2	3	2	1	3	3	2	4	2	5	3	4	4	4	3	3	3	2	3	3	4	4	3	3
	P8	7	2	2	2	6	7	7	2	2	2	7	7	7	3	3	2	2	3	2	1	1	7	7	2	2	2	3	3	7	7	
	P9	1	2	2	3	4	8	7	1	2	2	5	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	5	5	2	2	2	4	2	7	4	
	P10	6	8	8	8	8	9	9	4	3	4	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	5	9	9	9	9	3	9	4	9
	P11	1	5	5	2	6	7	6	1	4	5	1	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	3	2	2	2	4	2	7	5

Responsabile Area Tecnica											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	3	7	2	3	5	6	8	4	2	4
P2	1/3	1	4	2	1	2	1	4	4	2	6
P3	1/7	1/4	1	2	2	3	2	5	7	3	8
P4	1/2	1/2	1/2	1	2	4	2	5	4	2	3
P5	1/3	1	1/2	1/2	1	2	4	6	7	5	2
P6	1/5	1/2	1/3	1/4	1/2	1	3	8	7	6	3
P7	1/6	1	1/2	1/2	1/4	1/3	1	2	4	2	1
P8	1/8	1/4	1/5	1/5	1/6	1/8	1/2	1	4	2	4
P9	1/4	1/4	1/7	1/4	1/7	1/7	1/4	1/4	1	4	3
P10	1/2	1/2	1/3	1/2	1/5	1/6	1/2	1/2	1/4	1	2
P11	1/4	1/6	1/8	1/3	1/2	1/3	1	1/4	1/3	1/2	1

Responsabile Area Produttiva																															
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	P1	2	3	4	7	4	5	4	1	3	4	3	4	4	5	8	4	6	3	4	3	3	4	5	3	3	3	4	5	5	4
	P2	2	3	4	5	4	6	3	3	2	4	4	5	3	4	5	4	5	2	3	6	6	5	5	3	5	5	3	4	3	4
	P3	2	4	4	7	2	5	6	2	3	6	4	9	8	8	9	8	9	8	8	9	9	6	6	6	7	7	6	6	7	8
	P4	2	4	4	4	3	7	3	2	2	4	1	3	3	4	7	4	7	6	5	7	7	5	7	5	6	7	6	5	5	6
	P5	8	5	5	4	4	3	3	1	2	2	3	5	7	4	3	4	3	6	3	3	3	5	4	3	3	3	2	3	4	2
	P6	7	2	2	2	3	6	5	2	1	3	4	6	6	5	4	5	4	4	4	4	3	6	6	3	3	3	3	3	6	5
	P7	1	4	6	5	6	5	4	1	2	3	2	4	4	3	5	4	5	4	4	5	4	4	4	2	4	4	4	3	4	4
	P8	6	3	3	3	5	6	6	1	1	2	3	7	7	4	4	4	3	3	2	1	3	7	6	3	3	3	3	4	7	6
	P9	0	5	5	6	6	8	5	2	6	1	4	4	4	5	3	4	3	3	3	3	3	2	4	2	2	2	2	3	5	2
	P10	2	5	5	4	6	7	7	3	4	5	5	6	7	4	8	5	6	5	7	6	5	4	6	6	4	4	3	6	6	5
	P11	0	5	6	5	6	7	6	3	4	5	4	4	4	4	5	2	5	3	2	5	5	3	5	5	5	5	4	5	6	7

Responsabile Area Produttiva											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	6	7	4	2	5	7	7	5	4	5
P2	1/6	1	6	4	1	2	1	3	4	2	5
P3	1/7	1/6	1	2	4	3	3	5	7	5	8
P4	1/4	1/4	1/2	1	4	5	2	3	5	4	2
P5	1/2	1	1/4	1/4	1	2	2	3	3	4	1
P6	1/5	1/2	1/3	1/5	1/2	1	2	3	4	2	3
P7	1/7	1	1/3	1/2	1/2	1/2	1	3	3	2	2
P8	1/7	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1	4	3	4
P9	1/5	1/4	1/7	1/5	1/3	1/4	1/3	1/4	1	3	3
P10	1/4	1/2	1/5	1/4	1/4	1/2	1/2	1/3	1/3	1	3
P11	1/5	1/5	1/8	1/2	1	1/3	1/2	1/4	1/3	1/3	1

Risorsa montaggio meccanico 1 (livello esperienza: apprendistato)																															
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	P1	4	3	3	5	2	3	3	2	4	5	7	1	1	1	2	3	2	1	1	7	7	1	8	2	1	1	4	4	5	2
	P2	6	7	7	8	2	8	8	2	6	1	3	5	5	5	6	6	6	4	4	4	4	3	6	7	1	1	4	4	4	4
	P3	1	3	3	4	3	3	3	4	5	7	8	4	4	5	5	5	5	7	5	8	8	4	5	3	3	3	5	8	6	4
	P4	1	3	3	2	3	2	2	2	3	1	1	2	2	6	5	5	5	3	5	1	1	4	4	1	1	1	4	4	6	6
	P5	6	5	5	5	1	7	6	1	3	3	9	6	5	5	3	3	3	1	2	3	3	6	6	5	2	2	3	3	6	6
	P6	4	3	3	4	1	7	7	2	1	4	6	7	8	5	4	4	4	1	2	5	5	7	7	4	2	2	3	3	5	5
	P7	1	1	1	2	4	5	5	2	4	1	1	4	4	3	7	4	7	2	3	8	8	1	8	5	1	1	3	5	5	5
	P8	4	4	4	5	4	7	7	1	2	4	8	9	8	5	2	6	2	2	3	5	5	7	7	6	0	0	5	5	7	7
	P9	3	5	5	6	5	8	8	5	7	1	9	6	6	4	1	5	1	2	1	1	1	8	4	4	1	1	5	4	8	2
	P10	1	5	5	4	7	3	3	3	7	10	7	8	8	5	5	5	5	4	5	10	10	1	5	3	4	4	6	3	8	5
	P11	0	7	7	8	9	8	8	10	9	9	9	8	8	7	9	7	9	8	1	1	6	8	6	8	5	5	8	5	5	8

Risorsa montaggio meccanico 1 (livello esperienza: apprendistato)											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	2	1/2	1/4	1/6	3	5	3	7	1/5	6
P2	1/2	1	5	1/6	3	1/4	2	2	4	7	7
P3	2	1/5	1	1/3	1/2	1/5	3	1/2	6	5	6
P4	4	6	3	1	3	2	5	1/4	7	7	5
P5	6	1/3	2	3	1	2	1/3	1/5	8	8	3
P6	1/3	4	5	1/2	1/2	1	5	6	6	7	5
P7	1/5	1/2	1/3	1/5	3	1/5	1	3	5	5	6
P8	1/3	1/2	2	4	5	1/6	1/3	1	6	6	6
P9	1/7	1/4	1/6	1/7	1/8	1/6	1/5	1/6	1	1/2	1/5
P10	5	1/7	1/5	1/7	1/8	1/7	1/5	1/6	2	1	1/8
P11	1/6	1/7	1/6	1/5	1/3	1/5	1/6	1/6	5	8	1

Risorsa montaggio meccanico 2 (livello esperienza: media)																															
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	P1	3	6	6	5	2	1	1	6	3	6	2	3	3	1	6	2	6	1	2	0	0	0	2	2	3	3	1	2	2	1
	P2	3	5	5	10	4	10	10	6	6	1	0	5	5	6	4	5	4	6	5	4	4	1	5	6	1	1	0	5	4	4
	P3	1	3	3	3	5	2	2	4	4	9	4	2	2	3	1	2	1	2	3	1	1	7	1	3	2	2	3	1	3	2
	P4	0	3	3	3	1	2	2	1	2	2	1	3	3	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	1	3	3	2	2	0	3
	P5	1	6	6	2	6	3	2	0	2	1	10	7	7	9	2	8	2	0	3	3	3	9	7	5	10	10	1	5	4	4
	P6	1	5	5	4	8	7	7	1	1	3	5	9	9	3	3	5	3	2	1	4	4	9	6	4	5	5	2	2	6	7
	P7	2	7	7	5	7	9	9	3	5	0	2	3	3	1	9	2	9	1	3	5	5	5	9	6	6	6	1	5	6	6
	P8	1	4	4	5	6	8	8	2	1	3	1	8	8	5	4	5	4	3	1		6	9	8	5	4	4	2	6	9	7
	P9	0	8	8	9	10	7	7	5	9	0	4	5	5	6	1	4	1	5	4	5	5	1	7	4	3	3	0	5	4	4
	P10	0	2	2	1	6	6	6	6	8	10	6	4	4	1	3	2	3	1	6	3	3	2	1	3	2	2	1	3	9	1
	P11	0	5	9	8	10	9	9	10	9	8	9	7	7	8	9	4	9	5	1	9	9	0	8	9	9	9	5	9	7	7

Risorsa montaggio meccanico 2 (livello esperienza: media)											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	1/6	3	1/8	1/7	4	3	1/5	6	9	2
P2	6	1	1/8	1/5	1/9	1/2	4	8	7	1/4	7
P3	1/3	8	1	1/8	7	1/8	7	1/5	2	4	9
P4	8	5	8	1	1/2	5	8	1/7	1/4	9	7
P5	7	9	1/7	2	1	1/2	5	7	5	9	2
P6	1/4	2	8	1/5	2	1	3	1/6	6	5	¼
P7	1/3	1/4	1/7	1/8	1/5	1/3	1	1/8	5	1/2	6
P8	5	1/8	5	7	1/7	6	8	1	8	7	5
P9	1/6	1/7	1/2	4	1/5	1/6	1/5	1/8	1	1/9	1/6
P10	1/9	4	1/4	1/9	1/9	1/5	2	1/7	9	1	9
P11	1/2	1/7	1/9	1/7	1/2	4	1/6	1/5	6	1/9	1

Risorsa montaggio meccanico 3 (livello esperienza: media)																																
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	P1	1	5	5	6	6	6	6	6	5	7	8	7	7	7	6	7	7	5	7	7	7	7	8	8	5	6	7	7	6	7	7
	P2	5	3	3	6	6	6	6	6	4	6	3	6	6	5	7	5	6	3	5	3	5	5	6	7	6	2	3	2	6	6	7
	P3	1	6	6	7	6	7	6	6	4	6	1	5	6	6	7	7	7	2	7	7	7	7	7	7	4	4	7	7	7	7	7
	P4	1	8	8	8	7	8	7	6	7	1	6	7	7	8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	6	6	8	8	8	8	8	8
	P5	7	5	5	5	9	8	7	4	4	3	8	9	5	8	5	7	2	5	4	5	5	7	8	2	2	2	4	8	9	3	
	P6	7	7	7	5	5	5	5	5	5	1	9	9	6	6	5	6	3	5	5	8	8	8	8	2	2	3	6	7	8	3	
	P7	5	5	7	7	7	5	4	7	6	7	7	7	7	7	5	7	4	5	5	7	7	8	8	8	8	8	7	6	7	8	4
	P8	7	1	2	5	7	7	7	4	5	1	6	8	6	7	5	6	2	5	5	5	5	8	8	2	2	5	6	7	8	4	
	P9	1	10	10	7	7	8	9	5	4	1	8	9	7	8	5	8	3	5	5	8	8	8	9	8	8	7	4	3	4	3	
	P10	1	8	8	8	9	8	8	7	7	5	7	8	9	9	9	5	8	5	5	8	8	8	10	1	8	8	8	10	9	7	8
	P11	2	6	6	6	6	8	8	5	7	2	4	8	6	7	7	5	7	3	5	7	8	8	1	8	4	4	3	4	8	8	

Risorsa montaggio meccanico 3 (livello esperienza: media)											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	1/9	1/9	1/8	1/6	1/6	6	6	1/8	1/8	1/8
P2	9	1	9	1/5	6	1/6	8	6	1/9	1/5	1/5
P3	9	1/9	1	8	4	6	6	6	5	6	6
P4	8	5	1/8	1	5	6	6	6	6	6	6
P5	6	1/6	1/4	1/5	1	5	1/4	1/7	6	6	1/7
P6	6	6	1/6	1/6	1/5	1	7	1/6	6	1/7	1/7
P7	1/6	1/8	1/6	1/6	4	1/7	1	6	1/5	1/8	5
P8	1/6	1/6	1/6	1/6	7	6	1/6	1	1/6	1/7	1/6
P9	8	9	1/5	1/6	1/6	1/6	5	6	1	6	6
P10	8	5	1/6	1/6	1/6	7	8	7	1/6	1	7
P11	8	5	1/6	1/6	7	7	1/5	6	1/6	1/7	1

Risorsa montaggio meccanico 4 (livello esperienza: lunga)																															
Numero parametro	Numero WS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	P1	2	3	3	6	5	6	6	2	2	6	3	5	5	6	7	6	7	5	6	7	7	6	6	6	5	5	4	4	5	5
	P2	2	3	3	6	3	7	3	2	2	4	2	2	2	4	6	4	6	2	3	8	8	5	5	3	6	6	5	5	3	3
	P3	1	4	4	8	2	6	6	1	1	5	2	7	7	8	9	8	9	6	7	9	9	5	5	6	8	8	6	6	6	6
	P4	1	4	4	3	2	8	2	1	1	6	1	3	3	4	9	4	9	7	7	9	9	6	6	4	8	8	6	6	7	7
	P5	5	2	2	3	1	2	2	0	0	1	4	5	5	4	2	4	2	6	2	3	3	4	4	2	3	3	2	2	1	2
	P6	5	2	2	4	2	4	2	0	0	1	5	6	6	5	3	5	3	4	4	3	3	6	6	2	3	3	2	2	3	4
	P7	1	6	6	7	6	7	4	1	1	4	3	6	6	5	6	6	6	5	5	6	6	6	6	3	6	6	4	3	5	6
	P8	5	5	5	4	3	5	4	0	0	2	1	7	7	6	5	6	5	3	4	3	3	5	5	4	5	5	5	4	6	5
	P9	0	6	6	8	4	8	2	0	0	2	4	3	3	5	4	5	4	2	3	4	4	2	2	2	3	3	2	3	4	3
	P10	0	7	7	5	5	6	6	1	1	3	2	6	6	4	6	4	6	5	6	5	5	5	5	6	3	3	7	6	7	7
	P11	0	5	5	7	3	5	3	0	0	2	2	3	3	2	5	2	5	3	5	4	4	5	5	5	4	4	5	6	5	6

Risorsa montaggio meccanico 4 (livello esperienza: lunga)											
Num. parametro	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
P1	1	8	7	7	2	6	8	2	6	7	6
P2	1/8	1	6	6	2	3	1/3	2	5	3	2
P3	1/7	1/6	1	3	7	3	4	6	6	8	8
P4	1/7	1/6	1/3	1	7	6	2	2	7	6	2
P5	1/2	1/2	1/7	1/7	1	1/2	1/3	1/2	1/3	3	1/2
P6	1/6	1/3	1/3	1/6	2	1	3	2	4	6	2
P7	1/8	3	1/4	1/2	3	1/3	1	1/3	1/2	4	7
P8	1/2	1/2	1/6	1/2	2	1/2	3	1	1/2	1/3	1/2
P9	1/6	1/5	1/6	1/7	3	1/4	2	2	1	3	2
P10	1/7	1/3	1/8	1/6	1/3	1/6	1/4	3	1/3	1	1/2
P11	1/6	1/2	1/8	1/2	2	1/2	1/7	2	1/2	2	1

Tabella A7

Numero WS	α_i	β_i
1	1,0%	1,5%
2	0,5%	0,8%
3	0,5%	0,8%
4	0,3%	0,5%
5	0,2%	0,5%
6	0,4%	0,8%
7	0,4%	0,8%
8	0,1%	0,1%
9	0,3%	1,0%
10	0,4%	0,6%
11	0,5%	0,3%
12	0,2%	0,2%
13	0,2%	0,2%
14	0,3%	0,3%
15	0,4%	0,8%
16	0,3%	0,3%
17	0,4%	0,8%
18	0,2%	0,2%
19	0,5%	0,9%
20	0,2%	0,2%
21	0,2%	0,2%
22	0,5%	0,7%
23	0,5%	0,7%
24	0,2%	0,2%
25	0,5%	1,2%
26	0,5%	1,2%
27	0,3%	0,3%
28	0,2%	0,2%
29	0,8%	1,2%
30	0,5%	0,5%

Tabella A8

Numero WS	c_i [s]	c_i [ore]	NRC_i [s]	NRC_i [ore]	URC_i [s]	URC_i [ore]	NDC_i [s]	NDC_i [ore]
1	34	0,009	120	0,033	120	0,033	0	34
2	20	0,006	60	0,017	60	0,017	0	20
3	52	0,014	120	0,033	120	0,033	0	52
4	41	0,011	60	0,017	60	0,017	0	41
5	125	0,035	140	0,039	140	0,039	0	125
6	92	0,026	330	0,092	330	0,092	0	92
7	73	0,020	360	0,100	360	0,100	0	73
8	23	0,006	30	0,008	30	0,008	0	23
9	7	0,002	122	0,034	122	0,034	0	7
10	13	0,004	14	0,004	14	0,004	0	13
11	174	0,048	300	0,083	300	0,083	0	174
12	47	0,013	24	0,007	24	0,007	0,3	47
13	44	0,012	24	0,007	24	0,007	0,5	44
14	42	0,012	8	0,002	8	0,002	0,25	42
15	16	0,004	60	0,017	60	0,017	0,17	16
16	50	0,014	20	0,006	20	0,006	0,17	50
17	27	0,008	60	0,017	60	0,017	0,2	27
18	22	0,006	4	0,001	4	0,001	0,2	22
19	17	0,005	4	0,001	4	0,001	0,17	17
20	60	0,017	8	0,002	8	0,002	0,17	60
21	57	0,016	16	0,004	16	0,004	0,17	57
22	52	0,014	30	0,008	30	0,008	0	52
23	149	0,041	48	0,013	48	0,013	0,3	149
24	7	0,002	12	0,003	12	0,003	0,2	7
25	13	0,004	70	0,019	70	0,019	0	13
26	20	0,006	70	0,019	70	0,019	0	20
27	48	0,013	92	0,026	92	0,026	0	48
28	56	0,016	14	0,004	14	0,004	0,2	56
29	42	0,012	50	0,014	50	0,014	0	42
30	27	0,008	12	0,003	12	0,003	0,2	27

Tabella A9

Numero WS	$N_{a,i}$	TAT_i [s]	TAT_i [min]	$Cf_{P,i}$ [min]
1	3	477,67	7,96	7,84
2	6	438,00	7,30	7,07
3	6	456,67	7,61	7,38
4	3	357,33	5,96	5,84
5	3	235,00	3,92	3,80
6	12	742,00	12,37	11,90
7	12	489,67	8,16	7,69
8	3	218,67	3,64	3,53
9	3	148,00	2,47	2,35
10	2	24,33	0,41	0,33
11	3	297,67	4,96	4,84
12	4	320,33	5,34	5,18
13	6	357,67	5,96	5,73
14	1	222,00	3,70	3,66
15	2	58,33	0,97	0,89
16	4	518,00	8,63	8,48
17	2	53,67	0,89	0,82
18	1	58,67	0,98	0,94
19	2	109,00	1,82	1,74
20	2	347,67	5,79	5,72
21	2	379,67	6,33	6,25
22	2	134,67	2,24	2,17
23	6	815,33	13,59	13,36
24	2	141,67	2,36	2,28
25	1	69,00	1,15	1,11
26	1	72,00	1,20	1,16
27	1	71,33	1,19	1,15
28	3	480,00	8,00	7,88
29	9	754,67	12,58	12,23
30	3	333,33	5,56	5,44

Tabella A10

Numero WS	$Cf_{D,i}$
1	2,81
2	4,38
3	4,56
4	5,06
5	4,31
6	5,69
7	4,89
8	2,76
9	3,48
10	3,68
11	4,21
12	5,35
13	5,14
14	5,09
15	5,40
16	4,94
17	4,94
18	4,22
19	4,27
20	5,19
21	5,21
22	5,20
23	5,59
24	4,13
25	4,07
26	4,25
27	4,06
28	4,72
29	5,54
30	4,96

Tabella A11

Numero WS	$Cf_{P,i}$ [min]	$Cf_{D,i}$	DPU_i	$N_{a,i}$	p_i	D_i
1	7,84	2,81	0,19%	3	0,2%	2,9E-05
2	7,07	4,38	0,32%	6	0,3%	2,6E-05
3	7,38	4,56	0,36%	6	0,4%	2,9E-05
4	5,84	5,06	0,32%	3	0,3%	1,6E-05
5	3,80	4,31	0,14%	3	0,1%	7,2E-06
6	11,90	5,69	0,93%	12	0,9%	7,4E-05
7	7,69	4,89	0,43%	12	0,4%	3,4E-05
8	3,53	2,76	0,07%	3	0,1%	6,8E-07
9	2,35	3,48	0,06%	3	0,1%	5,7E-06
10	0,33	3,68	0,01%	2	0,0%	3,1E-07
11	4,84	4,21	0,19%	3	0,2%	5,7E-06
12	5,18	5,35	0,29%	4	0,3%	5,9E-06
13	5,73	5,14	0,32%	6	0,3%	6,3E-06
14	3,66	5,09	0,18%	1	0,2%	5,3E-06
15	0,89	5,40	0,03%	2	0,0%	2,6E-06
16	8,48	4,94	0,49%	4	0,5%	1,5E-05
17	0,82	4,94	0,03%	2	0,0%	2,0E-06
18	0,94	4,22	0,02%	1	0,0%	4,8E-07
19	1,74	4,27	0,05%	2	0,1%	4,8E-06
20	5,72	5,19	0,32%	2	0,3%	6,4E-06
21	6,25	5,21	0,36%	2	0,4%	7,2E-06
22	2,17	5,20	0,09%	2	0,1%	6,6E-06
23	13,36	5,59	1,04%	6	1,0%	7,3E-05
24	2,28	4,13	0,07%	2	0,1%	1,4E-06
25	1,11	4,07	0,03%	1	0,0%	3,4E-06
26	1,16	4,25	0,03%	1	0,0%	3,8E-06
27	1,15	4,06	0,03%	1	0,0%	8,7E-07
28	7,88	4,72	0,42%	3	0,4%	8,3E-06
29	12,23	5,54	0,92%	9	0,9%	1,1E-04
30	5,44	4,96	0,28%	3	0,3%	1,4E-05
Totale	-	-	-	-	-	5,0E-04

Tabella A12

Numero WS	DPU_i	$N_{a,i}$	p_i	D_i
1	18,18%	3	17,1%	2,6E-03
2	3,64%	6	3,6%	2,9E-04
3	3,64%	6	3,6%	2,9E-04
4	1,82%	3	1,8%	9,0E-05
5	0,00%	3	0,0%	0,0E+00
6	10,91%	12	10,4%	8,3E-04
7	5,45%	12	5,3%	4,3E-04
8	0,00%	3	0,0%	0,0E+00
9	3,64%	3	3,6%	3,6E-04
10	0,00%	2	0,0%	0,0E+00
11	7,27%	3	7,1%	2,1E-04
12	1,82%	4	1,8%	3,6E-05
13	1,82%	6	1,8%	3,6E-05
14	0,00%	1	0,0%	0,0E+00
15	0,00%	2	0,0%	0,0E+00
16	1,82%	4	1,8%	5,4E-05
17	3,64%	2	3,6%	2,9E-04
18	0,00%	1	0,0%	0,0E+00
19	3,64%	2	3,6%	3,2E-04
20	3,64%	2	3,6%	7,2E-05
21	3,64%	2	3,6%	7,2E-05
22	0,00%	2	0,0%	0,0E+00
23	3,64%	6	3,6%	2,5E-04
24	0,00%	2	0,0%	0,0E+00
25	5,45%	1	5,5%	6,5E-04
26	5,45%	1	5,5%	6,5E-04
27	18,18%	1	18,2%	5,5E-04
28	0,00%	3	0,0%	0,0E+00
29	9,09%	9	8,7%	1,0E-03
30	0,00%	3	0,0%	0,0E+00
Totale	-	-	-	9,1E-03

Tabella A13

Numero WS	c_i [€]	NRC_i [€]	URC_i [€]	NDC_i [€]
1	0,21	0,73	0,73	0
2	0,12	0,37	0,37	1584
3	0,32	0,73	0,73	1592
4	0,25	0,37	0,37	87
5	0,76	0,86	0,86	569
6	0,56	2,02	2,02	483
7	0,45	2,20	2,20	273
8	0,14	0,18	0,18	11
9	0,04	0,75	0,75	31
10	0,08	0,09	0,09	47
11	1,06	1,83	1,83	224
12	0,29	0,15	0,15	11,67
13	0,27	0,15	0,15	17,50
14	0,26	0,05	0,05	8,75
15	0,10	0,37	0,37	66
16	0,31	0,12	0,12	5,83
17	0,17	0,37	0,37	99
18	0,13	0,02	0,02	6
19	0,10	0,02	0,02	5,83
20	0,37	0,05	0,05	5,83
21	0,35	0,10	0,10	5,83
22	0,32	0,18	0,18	0,00
23	0,91	0,29	0,29	11,67
24	0,04	0,07	0,07	5,83
25	0,08	0,43	0,43	0,00
26	0,12	0,43	0,43	0,00
27	0,29	0,56	0,56	25
28	0,34	0,09	0,09	5,83
29	0,26	0,31	0,31	106
30	0,17	0,07	0,07	5,83

Tabella A14

Numero WS	c_i	$NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$	$URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$	$NDC_i * p_i * \beta_i$	$C_{tot,i}$
1	0,21	0,0014	0,00732	0,0000	0,2165
2	0,12	0,0012	0,00183	0,0411	0,1663
3	0,32	0,0026	0,00365	0,0463	0,3704
4	0,25	0,0011	0,00110	0,0014	0,2542
5	0,76	0,0012	0,00171	0,0041	0,7709
6	0,56	0,0185	0,00799	0,0357	0,6243
7	0,45	0,0093	0,00876	0,0093	0,4734
8	0,14	0,0001	0,00018	0,0000	0,1409
9	0,04	0,0004	0,00224	0,0002	0,0456
10	0,08	0,0000	0,00034	0,0000	0,0798
11	1,06	0,0035	0,00915	0,0013	1,0772
12	0,29	0,0004	0,00029	0,0001	0,2880
13	0,27	0,0005	0,00029	0,0001	0,2698
14	0,26	0,0001	0,00015	0,0000	0,2569
15	0,10	0,0001	0,00147	0,0002	0,0995
16	0,31	0,0006	0,00036	0,0001	0,3066
17	0,17	0,0001	0,00147	0,0002	0,1668
18	0,13	0,0000	0,00005	0,0000	0,1345
19	0,10	0,0000	0,00012	0,0000	0,1041
20	0,37	0,0002	0,00010	0,0000	0,3670
21	0,35	0,0004	0,00019	0,0000	0,3489
22	0,32	0,0002	0,00092	0,0000	0,3189
23	0,91	0,0030	0,00145	0,0008	0,9159
24	0,04	0,0001	0,00015	0,0000	0,0430
25	0,08	0,0001	0,00214	0,0000	0,0817
26	0,12	0,0001	0,00214	0,0000	0,1245
27	0,29	0,0002	0,00169	0,0000	0,2952
28	0,34	0,0004	0,00017	0,0000	0,3428
29	0,26	0,0028	0,00242	0,0117	0,2735
30	0,17	0,0002	0,00037	0,0001	0,1657
Totale	8,86	0,0486	0,00732	0,1527	9,1227

Tabella A15

Numero WS	c_i	$NRC_i * p_i * (1 - \beta_i)$	$URC_i * (1 - p_i) * \alpha_i$	$NDC_i * p_i * \beta_i$	$C_{tot,i}$
1	0,21	0,1235	0,0061	0,0000	0,3374
2	0,12	0,0130	0,0018	0,4539	0,5909
3	0,32	0,0261	0,0035	0,4562	0,8035
4	0,25	0,0066	0,0011	0,0079	0,2661
5	0,76	0,0000	0,0017	0,0000	0,7656
6	0,56	0,2077	0,0072	0,4011	1,1782
7	0,45	0,1161	0,0083	0,1162	0,6867
8	0,14	0,0000	0,0002	0,0000	0,1407
9	0,04	0,0265	0,0022	0,0111	0,0826
10	0,08	0,0000	0,0003	0,0000	0,0798
11	1,06	0,1297	0,0085	0,0477	1,2493
12	0,29	0,0026	0,0003	0,0004	0,2906
13	0,27	0,0026	0,0003	0,0006	0,2724
14	0,26	0,0000	0,0001	0,0000	0,2568
15	0,10	0,0000	0,0015	0,0000	0,0992
16	0,31	0,0022	0,0004	0,0003	0,3084
17	0,17	0,0131	0,0014	0,0285	0,2081
18	0,13	0,0000	0,0000	0,0000	0,1345
19	0,10	0,0009	0,0001	0,0019	0,1068
20	0,37	0,0018	0,0001	0,0004	0,3689
21	0,35	0,0035	0,0002	0,0004	0,3525
22	0,32	0,0000	0,0009	0,0000	0,3187
23	0,91	0,0104	0,0014	0,0029	0,9253
24	0,04	0,0000	0,0001	0,0000	0,0429
25	0,08	0,0231	0,0020	0,0000	0,1045
26	0,12	0,0231	0,0020	0,0000	0,1473
27	0,29	0,1019	0,0014	0,0136	0,4103
28	0,34	0,0000	0,0002	0,0000	0,3424
29	0,26	0,0264	0,0022	0,1111	0,3963
30	0,17	0,0000	0,0004	0,0000	0,1654
Totale	8,86	0,8608	0,0560	1,6543	11,4322

Bibliografia

- Aft, L. S. (2000). "Work Measurement and Methods Improvement". Hoboken: Wiley.
- Albenga, A. (2018). "Studio ed ottimizzazione di un modello matematico per l'ottimizzazione di processo di avvolgimento di pallet con film estensibile". Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- Baruffaldi, A. (2018). "Valle Belbo tech 4.0 – indagine sull'industria 4.0 nel territorio di Canelli, Nizza e Valle Belbo". Apro Tech.
- Ben-Arieh, D. (1994). "A Methodology for Analysis of Assembly Operations' Difficulty". International Journal of Production Research.
- Bilancio di esercizio Tosa Group S.p.a. (2017).
- Boothroyd, G. (1987). "Design for Assembly – the Key to Design for Manufacturing". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Boothroyd, G. (1996). "Design for Manufacture and Assembly: The Boothroyd-Dewhurst Experience". In Design for X. Dordrecht: Springer.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano D. A. (2007). "Indicatori e misure di prestazione per la gestione dei processi". Il Sole 24 Ore.
- Franceschini, F., Galetto, M., Genta, G., Maisano, D. A. (2016). "Evaluating Quality-Inspection Effectiveness and Affordability in Short-Run Productions". 2nd International Conference on Quality Engineering and Management. Sampaio, P. et al.
- Franceschini, F., Galetto, M., Genta, G., Maisano, D. A. (2018). "Selection of quality-inspection procedures for short-run productions". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Franceschini, F., Galetto, M., Genta, G. (2018). "Product complexity and design of inspection strategies for assembly manufacturing processes". International Journal of Production Research.
- Hinckley, C. M. (1993). "A Global Conformance Quality Model. A New Strategic Tool for Minimizing Defects Caused by Variation, Error, and Complexity". Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering Department, Stanford University.
- Hinckley, C. M., P. Barkan. (1995). "A Conceptual Design Methodology for Enhanced Conformance Quality". Sandia Report.
- Montgomery, D. C. (2013). "Statistical Quality Control: A Modern Introduction". Hoboken: Wiley.
- Rother, C., Shook, L., (2009). "Learning to see". Lean Enterprise Institute.

Shibata, H., (2002). "Global assembly quality methodology: A new method for evaluating assembly complexities in globally distributed manufacturing". Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering Department, Stanford University.

Shin, D., Wysk, R. A., Rothrock, L. (2006). "An Investigation of Human Material Handler on Part Flow in Automated Manufacturing Systems". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.

Su, Q., L. Liu, Whitney, D. E. (2010). "A Systematic Study of the Prediction Model for Operator-Induced Assembly Defects Based on Assembly Complexity Factors". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.

Vineyard, M., Amoako-Gyampah, K., Meredith, J. R. (1999). "Failure rate distributions for flexible manufacturing systems: An empirical study". Eur. J. Oper. Res.

Wei, C. C., Chien C. F., Wang, M. J. (2005). "An AHP-Based Approach to ERP System Selection." International Journal of Production Economics.

Xiaoqing, T., Bo, W., Shuchun, W. (2010). "Quality Assurance Model in Mechanical Assembly". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

Yamagiwa, Y. (1988). "An Assembly Ease Evaluation Method for Product Designers: DAC". Techno Japan.

<https://www.tosagroup.com/>

<http://whc.unesco.org/en/list/1390>, Criterion iii

<http://www.at.camcom.gov.it/>

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro, sono numerose le persone che hanno contribuito al suo svolgimento e che desidero quindi ringraziare in questa sede.

Per primi, il Prof. Maurizio Galetto del Dipartimento di Ingegneria Gestionale del Politecnico di Torino e i suoi collaboratori, il Prof. Gianfranco Genta e la Dottoressa Elisa Verna, senza i quali questa Tesi non avrebbe avuto ne principio ne utile fine.

Grazie naturalmente a Serena Tosa e Fabio Tosa, Amministratori Delegati e proprietari della Tosa Group S.p.a.: sempre presenti con affetto nelle parole dei loro dipendenti, a loro va la mia riconoscenza per avermi ospitato a “casa” per questa prima ed indimenticabile esperienza lavorativa.

Con profonda gratitudine, ricordo tutti coloro che ho incontrato in Officina (e siete davvero tanti per nominarvi uno ad uno), per aver condiviso la vostra esperienza lavorativa e le vostre storie di vita, perché per chi come me muove i primi passi nel mondo del lavoro, l’aspetto umano caratterizza un’azienda quanto quello professionale.

Un ringraziamento dedicato va a Diego Cortese e al suo Responsabile, Massimo Cerutti, per la pazienza e la professionalità con cui hanno saputo supportare il mio lavoro nella loro quotidianità. Grazie davvero.

Un grazie particolare all’Ing. Lori, per la consulenza tecnica prestata nel corso dello svolgimento di questo scritto. E per le Jeep, gli aeroplanini e i Lego. Un caro saluto, Giovanni.

Ed infine, all’Ing. Tacchella.

Per l’esempio, l’ascolto attento, i consigli condivisi e la saggezza mostrata.

Perché non avrei potuto trovare una migliore risposta alla domanda “cosa vuoi fare da grande”.

Grazie di cuore, Andrea.